

**ҚАРАҒАНДЫ
УНИВЕРСИТЕТІНІҢ
ХАБАРШЫСЫ
ВЕСТНИК
КАРАГАНДИНСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА**

ISSN 0142-0843

ФИЗИКА сериясы
№ 1(69)/2013
Серия **ФИЗИКА**

Қаңтар–ақпан–наурыз
1996 жылдан бастап шығады
Жылына 4 рет шығады

Январь–февраль–март
Издается с 1996 года
Выходит 4 раза в год

Собственник РГП

**Карагандинский 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, | редактор д-р техн. наук; |
| Т.А.Кокетайтеги, | д-р физ.-мат. наук; |
| Н.Х.Ибраев, | д-р физ.-мат. наук; |
| А.О.Саулебеков, | д-р физ.-мат. наук; |
| Л.М.Ким, | д-р физ.-мат. наук; |
| К.М.Арынгазин, | д-р пед. наук; |
| И.В.Брейдо, | д-р техн. наук; |
| С.Д.Джуманов, | д-р физ.-мат. наук (Узбекистан); |
| М.М.Кидибаев, | д-р физ.-мат. наук (Кыргызстан); |
| З.Ж.Жанабаев, | д-р физ.-мат. наук; |
| Г.В.Климушева, | д-р физ.-мат. наук (Украина); |
| С.А.Кумеков, | д-р физ.-мат. наук; |
| В.М.Лисицын, | д-р физ.-мат. наук (Россия); |
| И.А.Огородников, | д-р физ.-мат. наук (Россия); |
| Г.И.Пилипенко, | д-р физ.-мат. наук (Россия); |
| С.В.Плотников, | д-р физ.-мат. наук; |
| Л.А.Пунг, | д-р физ.-мат. наук (Эстония); |
| А.Ж.Турмухамбетов, | д-р физ.-мат. наук; |
| К.Ш.Шункеев, | д-р физ.-мат. наук; |
| Л.В.Чиркова, | ответственный секретарь канд. техн. наук, доцент |

Редакторы *Ж.Т.Нұрмұханова*
Редактор *И.Д.Рожнова*
Техн. редактор *В.В.Бутяйкин*

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

Басуға 26.03.2013 ж. қол қойылды.
Пішімі 60×84 1/8.
Офсеттік қағазы.
Көлемі 9,25 б.т.
Таралымы 300 дана.
Бағасы келісім бойынша.
Тапсырыс № 899.

Подписано в печать 26.03.2013 г.
Формат 60×84 1/8.
Бумага офсетная.
Объем 9,25 п.л. Тираж 300 экз.
Цена договорная. Заказ № 899.

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. 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

КОНДЕНСАЦИЯЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ

| | |
|--|----|
| <i>Әбуова Ф.У., Ақылбеков А.Т., Үсейінов А.Б., Әбуова А.У., Қаптағай Г.</i> MgF ₂ кристалындағы Н орталықтарының тұрақтылығы. Алғашқы принциппен есептеу..... | 3 |
| <i>Жарекешев И.Х.</i> Холлдың кванттық эффектіндегі спектралдық корреляциялардың статистикасы | 8 |
| <i>Ыбыраев Н.Х., Аймұханов А.К., Серіков Т.М.</i> Родамин бояғыштарымен сенсублизацияланған Гретцель ұяшықтарының фотovoltaикалық қасиеттері..... | 15 |

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ

| | |
|--|----|
| <i>Құсайынов Қ., Дүйсенбаева М.С., Алысова Г., Танашев Е., Толынбеков А.</i> Суасты ұшқын разрядының шұбаркөл көмірінің құрылымына әсері..... | 21 |
| <i>Нүсіпбеков Б.Р., Хасенов А.Қ., Ахметова Г.Қ., Дүйсембекова Ә.С., Бейсенбек А.Ж.</i> Электрондық өндірісте қолданылатын шикізатты өндеу технологиясы | 26 |

ТЕХНИКАЛЫҚ ФИЗИКА

| | |
|---|----|
| <i>Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Кишлова А.А.</i> Берілістің талшықты-оптикалық желілерінің мониторинг мақсаттары..... | 31 |
| <i>Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Оганезов Э.С.</i> Мониторинг жүйелерін құру принциптері және салыстырмалы талдауы | 37 |
| <i>Колесников В.А., Байсағов Я.Ж.</i> Жүйелердің ақпараттық-өлшегіштік ұқсастықтар әдісі және жобалау..... | 45 |
| <i>Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н., Юров В.М., Гученко С.А.</i> Ионды-плазмалық жабуларды қалыптастырған кездегі автотолқынды процестер | 57 |
| <i>Мехтиев А.Д., Әлімов М.Ш., Боборыкин И.В., Дворкин С.В., Муравлев В.С.</i> Мониторингқа және жергілікті орналастаруына арналған сенсорлық торлардың өндірісте қолданысы..... | 68 |
| АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР | 73 |

СОДЕРЖАНИЕ

ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

| | |
|--|----|
| <i>Абуова Ф.У., Ақылбеков А.Т., Усеинов А.Б., Абуова А.У., Қаптағай Г.</i> Стабилизация Н центров в кристалле MgF ₂ . Расчеты из первых принципов | 3 |
| <i>Жарекешев И.Х.</i> Статистика спектральных корреляций в квантовом эффекте Холла..... | 8 |
| <i>Ибраев Н.Х., Аймуханов А.К., Сериков Т.М.</i> Фотovoltaические свойства ячеек Гретцеля, сенсублизированных родаминовыми красителями..... | 15 |

ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

| | |
|--|----|
| <i>Кусаинов К., Дүйсенбаева М.С., Алысова Г.К., Танашев Е., Толынбеков А.</i> Влияние подводного искрового разряда на структуру шубаркульских углей..... | 21 |
| <i>Нусупбеков Б.Р., Хасенов А.К., Ахметова Г.К., Дюсембекова А.С., Бейсенбек А.Ж.</i> Технология обработки сырья для электронной промышленности..... | 26 |

ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

| | |
|--|----|
| <i>Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Кишлова А.А.</i> Задачи мониторинга волоконно-оптических линий передачи..... | 31 |
| <i>Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И., Югай В.В., Оганезов Э.С.</i> Сравнительный анализ и принципы построения систем мониторинга | 37 |
| <i>Колесников В.А., Байсағов Я.Ж.</i> Метод аналогий и проектирование информационно-измерительных систем..... | 45 |
| <i>Лауринас В.Ч., Завацкая О.Н., Юров В.М., Гученко С.А.</i> Автоволновые процессы при формировании ионно-плазменных покрытий... | 57 |
| <i>Мехтиев А.Д., Әлімов М.Ш., Боборыкин И.В., Дворкин С.В., Муравлев В.С.</i> Применение сенсорных сетей для мониторинга и локального определения местоположения в промышленности..... | 68 |
| СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ..... | 73 |

КОНДЕНСАЦИЯ ЛАНҒАН КҮЙДІҢ ФИЗИКАСЫ ФИЗИКА КОНДЕНСИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

УДК 538.911

Ф.У.Абуова, А.Т.Акылбеков, А.Б.Усеинов, А.У.Абуова, Г.Каптагай

*Евразийский национальный университет им. Л.Н.Гумилева, Астана
(E-mail: fatika_82@mail.ru)*

Стабилизация Н-центров в кристалле MgF_2 . Расчеты из первых принципов

В статье предложены результаты расчетов основных центров окраски (называемых так же, как Н-центры). Эти исследования проведены в большом масштабе и основаны на неэмперических расчетах теории функционала плотности с использованием гибридных обменно-корреляционных функций, внедренных в код *Crystal09*. Для того чтобы понять поведение материала по отношению к облучению и его оптические свойства, были проанализированы электронная структура, релаксация атомной геометрии и распределение плотности заряда. Показано, что энергетическая ориентация с направлением (110) является самой главной для Н-центров в кристаллах MgF_2 .

Ключевые слова: crystal, ab-initio, DOS, рутил, теория функционала плотности.

Введение

В настоящее время теоретические исследования фторидов LiF , BaF_2 , CaF_2 широко распространены, что связано с «привлекательной простотой» (с научной точки зрения) их высокосимметричного кубического строения. Класс фторидов вызывает большой технологический и фундаментальный интерес в связи с их многочисленными применениями, обусловленными их прозрачностью в широком диапазоне длин волн.

Фторид магния (MgF_2) является важным щелочноземельным фторидом, который привлекает много внимания из-за широкой области применения в качестве оптического материала для антибликовых покрытий и поляризаторов света. Монокристалл MgF_2 определен как новый оптический материал для полупроводниковой литографии из-за его характерных переходов в вакуумной ультрафиолетовой области. Фторид магния имеет несколько технологических приложений, в том числе используется для электролиза руды алюминия и создания антибликовых покрытий, для которых структура поверхности и качество имеют первостепенное значение. Фторид магния является прозрачным в чрезвычайно широком диапазоне длин волн. Известно, что окна, линзы, призмы и другие оптически прозрачные системы, изготовленные из MgF_2 , могут использоваться во всем диапазоне длин волн — от 0,120 мкм (вакуумного ультрафиолета) до 8,0 мкм (инфракрасного излучения). Помимо этого, еще одним полезным свойством MgF_2 является его радиационная стойкость. Энергия, необходимая для создания первичных стабильных радиационных дефектов, намного выше, чем для других щелочно-галогенидных кристаллов и лежит в интервале температур 5–300 К [1].

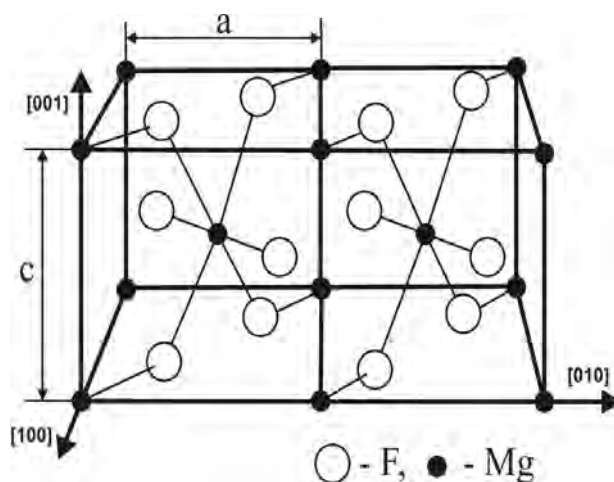
Благодаря физическим свойствам, имеющим огромную важность, этот материал незаменим в различных отраслях науки и техники (в конструировании космических телескопов, стенок ядерных реакторов и т.д.). Выяснение возможных физических механизмов образования дефектов при облучении высокоэнергетическим излучением (рентгеновское излучение, гамма-лучи) представляет большой научный интерес. С момента начала изучения MgF_2 проведено значительное количество экспериментальных работ [2–4]. Однако для выяснения таких важных вопросов, как природа химической связи в кристалле MgF_2 на атомарном строении необходимо привлечение теоретических расчетов. Для понимания многочисленных физических свойств MgF_2 очень важны знания его атомарной и

электронной структуры. Несмотря на широкий круг практического применения в различных технологических и промышленных целях, теоретически многие свойства MgF_2 остаются малоизученными и недостаточно описанными. Для описания электронных свойств, перераспределения заряда, строения и релаксации кристаллической структуры MgF_2 с дефектом на атомном уровне хорошо себя зарекомендовали *ab initio* расчеты с использованием теории функционала плотности. Ранее подобные расчеты для основных свойств поверхностных [5, 6] и объемных [7, 8] дефектов в MgF_2 уже проводились. При этом рассчитанные свойства MgF_2 хорошо согласуются с экспериментальными данными.

В настоящей работе представлены результаты неэмпирических расчетов моделирования (110) и (001) ориентированных Н-центров (интерстициальных атомов фтора) в объеме кристалла MgF_2 . Полученные результаты были обсуждены в анализе перераспределения заряда между дефектом и окружающей его кристаллической структурой. Энергетика периодического дефекта оценивалась с помощью расчета плотности состояния (DOS).

Модель и метод расчета

Для описания объемного образца MgF_2 была выбрана модель расширенной ячейки (суперъядчейки) с матрицей расширения ($2 \times 2 \times 2$), которая содержит 6 % дефектов. Кристаллическая структура из двух элементарных ячеек MgF_2 представлена на рисунке 1. При нормальных условиях MgF_2 имеет структуру рутила с тетрагональной решеткой и группой симметрии $P4_2/mnm$ с двумя формульными единицами в элементарной ячейке. Экспериментальные постоянные решетки для MgF_2 — 4,615 Å ($a = b$) и 3,043 Å. В качестве отправной точки для наших расчетов мы использовали оптимизированные постоянные решетки MgF_2 ($a = b = 4,654$ Å и $c = 3,139$ Å).



a, c — постоянные решетки

Рисунок 1. Общая структура MgF_2

Расчеты были выполнены в коде *Crystal09* [8], с использованием локализованных базисов на основе функций Гаусса. В отличие от плоской волны, в *Crystal09* используются локализованные наборы атомных базисов. Дополнительным преимуществом *Crystal09* является возможность расчета изолированных 2D слэбов «плит», без искусственной периодичности по оси z , перпендикулярной поверхности слэба. Расчеты проводились с использованием гибридного обменно-корреляционного функционала ВЗРВ с учетом спиновой поляризации [9], который дает хорошее согласие расчетов с экспериментальными данными по оптической запрещенной зоне, в отличие от функционалов (9,5 эВ (ВЗРВ), 19,65 эВ (HF), 6,9 эВ (GGA-PBE), экспериментальное значение — 12,5 эВ [4]).

Интегрирование обратной решетки для зоны Бриллюэна выполнено сеткой Пэка-Монкхорста $5 \times 5 \times 5$ [10]. Для достижения высокой точности для кулоновского перекрытия, кулоновского проникновения, обменного перекрытия первого обменного псевдоперекрытия и второго обменного псевдоперекрытия были выбраны следующие точности сходимости: 10^7 , 10^8 , 10^7 , 10^7 и 10^{14} соответственно [11]. В наших расчетах для MgF_2 мы использовали подход, разработанный Катти для атома F [12] и Маккарти и Харрисоном [13] для атома Mg. Эффективные атомные заряды были рассчитаны с использованием анализа заселенности по Малликену [14].

В рассматриваемой модели важной задачей являлось определение природы химической связи между введенными атомами фтора (Н-центрами) и собственными атомами фтора в регулярной решетке. Известно, что типичные дырочные дефекты в щелочно-галогидных кристаллах и фторидах, называемые еще как разделенные внедрения (или «гантели») в синглетном состоянии (один неспаренный электрон) [15] являются дополнением к F-центрам (вакансиям фтора).

Результаты и их анализ

В результате расчетов получены релаксированная геометрия решетки, эффективные атомные заряды и межатомная заселенность связи, а также изучены зонная структура дефектной системы и оценена энергетика образования дефектов (DOS) (рис. 2).

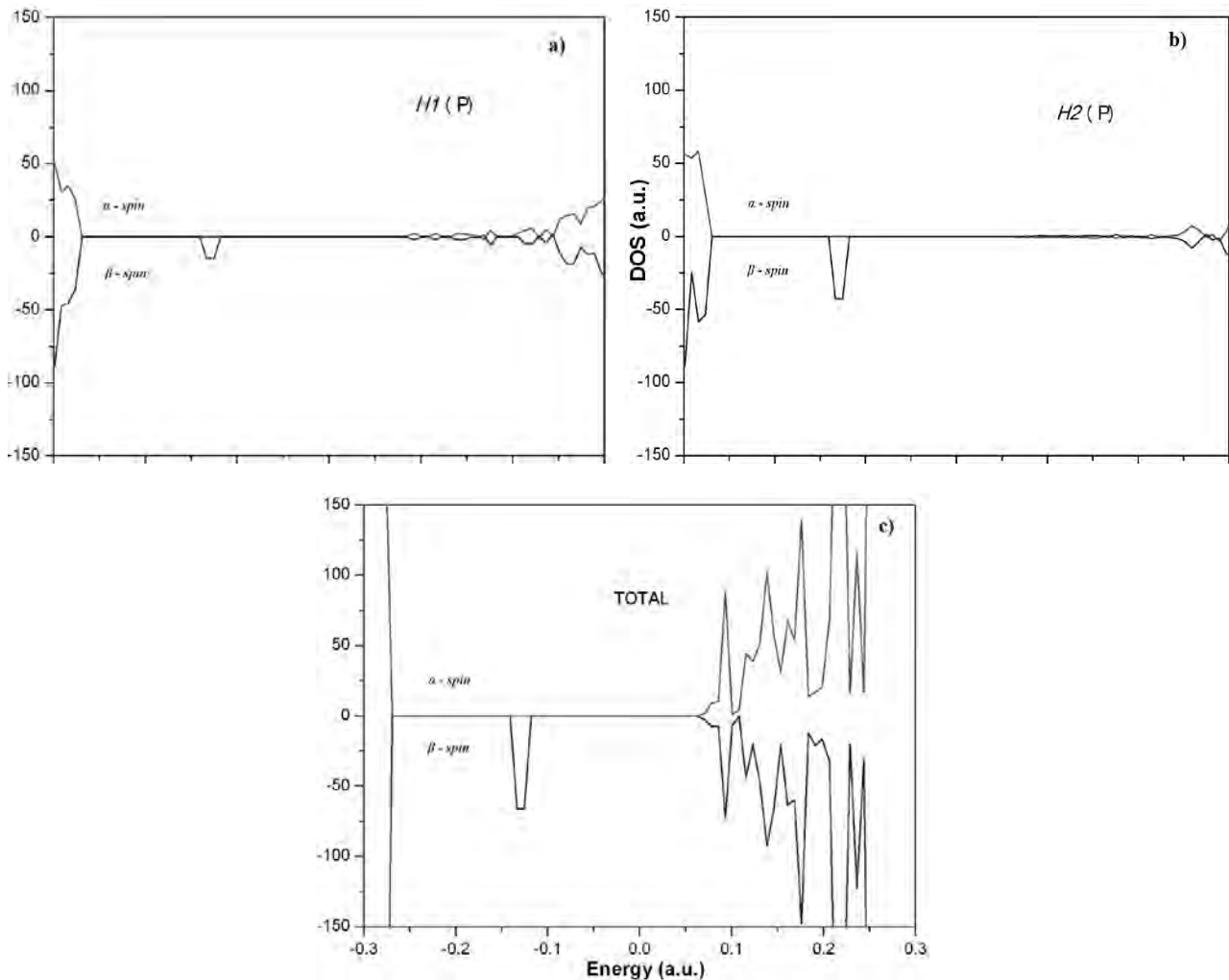


Рисунок 2. Проекционная и полная плотность состояния (DOS) спин-поляризованного состояния MgF_2 с Н-центром

На рисунке 3 (а, б) показаны две возможные ориентации Н-центров в направлении (110) и (001). Как показывает анализ, энергия формирования первой конфигурации на 0,37 эВ меньше, чем для второй. Это согласуется с известными экспериментальными данными [16]. Равновесное межатомное расстояние (110) и (001) ориентированных Н-центров — соответственно 1,96 Å и 1,82 Å. Стоит отметить, что в сравнении с межатомным расстоянием в свободной молекуле F_2^- , которое составляет 1,98 Å, межатомное расстояние в кристалле уменьшается, причем в большей степени по (001) направлению. Длины связи Н-центров во фторидах (BaF_2 , SrF_2 , CaF_2) аналогичны и составляют 1,98 Å [17].

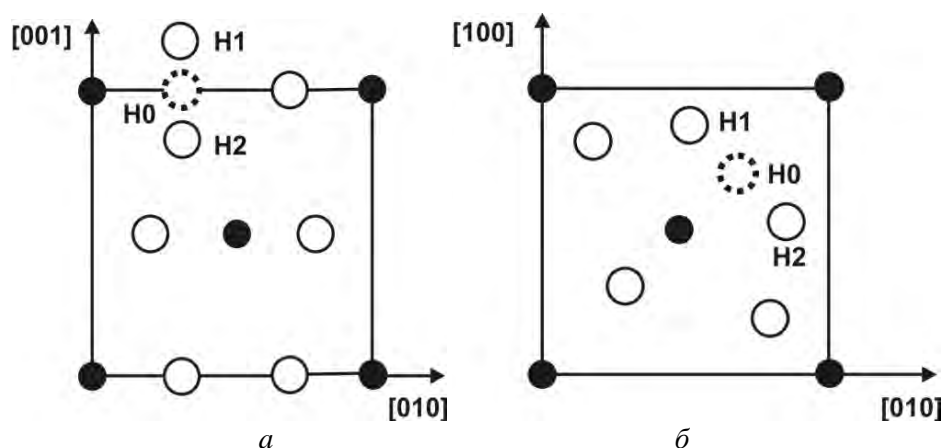


Рисунок 3. Схема (001) (а) и (110) (б) ориентированных Н-центров в кристалле MgF_2 ; H^0 — позиция атома фтора в регулярной решетке до формирования дефекта

Эффективные заряды атомов фтора и магния составляют $-0,9e$ и $1,80e$ соответственно (e — заряд электрона) [18–20]. Это указывает на ионную структуру этого материала. После введения дополнительного атома фтора в междоузельное положение в направлении (110) (рис. 2), электронная плотность распределяется на ближайших двух атомах фтора почти равномерно (эффективный заряд введенного атома фтора составляет $-0,59e$, а соседних двух атомов, H1 и H2 , по $-0,68e$).

После формирования химической связи с введенным атомом фтора эффективные заряды двух ближайших атомов Н-центра вдоль направления (100) становятся $0,46e$ каждого, между тем полный спин этих атомов фтора составляет $0,92\mu_B$. То есть данный дефект очень близок к классической модели Н-центра.

В случае ориентации Н-центра вдоль направления (110) (рис. 2б) атомные заряды соседних атомов фтора распределяются очень ассиметрично: $-0,31e$ (H1) и $-0,77e$ (H2). Такое распределение заряда подтверждается прямыми экспериментальными наблюдениями. Также оценены спины этих атомов, которые составили соответственно $0,62\mu_B$ и $0,23\mu_B$ (μ_B — магнетон Бора). Важно отметить, что отклонение молекулярной оси от направления (110) по расчетам составляет 13° (экспериментальное значение отклонения по [21] составляет 3°).

Выводы

В данной работе приведены расчеты из первых принципов кубического MgF_2 , который представляет научный и технологический интерес в качестве радиационно-стойкого материала. Проведенные *ab initio* DFT расчеты Н-центров в кристалле MgF_2 показали, что наиболее предпочтительной геометрической конфигурацией Н-центров является (110) направление. Причем, в направлении (110) энергетическое состояние Н-центра на $0,37$ эВ меньше, чем в направлении (001).

Исходя из расчетов, ориентация Н-центра относительно молекулярной оси отклонена на 13° , что качественно согласуется с экспериментальными данными, которые дают угловое смещение, равное 3° . В случае (110) ориентации Н-центра атомный заряд и спин распределяются относительно симметрично. Для (001) направления распределения плотности заряда и спина, наоборот, ассиметричны, что указывает на энергетически нестабильное состояние.

Полученные результаты расчетов Н-центров из «первых принципов» могут быть положены в дальнейшие теоретические расчеты радиационных дефектов в кристалле MgF_2 , таких как френкелевская F-Н пара (анионная вакансия, захватившая электрон, связанная с междоузельным атомом фтора).

References

- 1 Blunt R.F., Cohen M.I. Irradiation-Induced Color Centers in Magnesium Fluoride // Phys. Rev. — 1967. — Vol. 153. — P. 1031.
- 2 Tanimura K., Itoh N., Hauashi T., Nishimura H. // J. Phys. Soc. Jap. — 1992. — Vol. 61. — P. 1366.

- 3 Yoshinari T., Iwano H., Hirai M. F-H center formation by the optical conversion in self-trapped excitons in KCl crystals // J. Phys. Soc. Jap. — 1978. — Vol. 45, No. 3. — P. 936–943.
- 4 Jouanin C., Gout C. // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1972. — Vol. 5, No 15. — P. 1945–1952.
- 5 Buckton M.R., Pooley D. The radiation damage process in MgF₂ // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1972. — Vol. 5. — P. 1553.
- 6 Catti M., Pavese A., Dovesi R., Roetti C., Causa M. Quantum-mechanical Hartree-Fock self-consistent-field study of the elastic constants and chemical bonding of MgF₂ (sellaite) // Phys. Rev. — 1991. — B 44. — P. 3509.
- 7 Babu K.R., Lingam Ch.B., Auluck S., Tewari S.P., Vaitheeswaran G. Structural, thermodynamic and optical properties of MgF₂ studied from first-principles theory // J. Solid State Chem. — 2011. — Vol. 184. — P. 343.
- 8 Vassilyeva A.F., Eglitis R.I., Kotomin E.A., Dauletbekova A.K. Ab initio calculations of MgF₂ (001) and (011) surface structure // Physica. — 2010. — B 405. — P. 2125.
- 9 Vassilyeva A.F., Eglitis R.I., Kotomin E.A., Dauletbekova A.K. Ab initio calculations of the atomic and electronic structure of MgF₂ (011) and (111) surfaces // Cent. Eur. J. Phys. — 2011. — Vol. 9. — P. 515.
- 10 Shi H., Eglitis R.I., Borstel G. Ab initio calculations of the CaF₂ electronic structure and F centers // Phys. Rev. — 2005. — B 72. — P. 105–109.
- 11 Shi H., Eglitis R.I., Borstel G. Ab Initio Calculations of Hydroxyl Impurities in CaF₂ // J. Phys.: Condens. Matter. — 2006. — Vol. 18. — P. 8367.
- 12 Saunders V.R., Dovesi R., Roetti C., Causa M., Harrison N.M., Orlando R., Zicovich-Wilson C.M. CRYSTAL User Manual // University of Torino, Torino, Italy, 2006.
- 13 Becke A.D. Density-functional thermochemistry. III. The role of exact exchange // J. Chem. Phys. — 1993. — Vol. 98. — P. 5648.
- 14 Monkhorst H.J., Pack J.D. Dependence of Magnetism on Doping Concentration in V-Doped Bulk ZnO // Phys. Rev. — 1976. — B 13. — P. 5188.
- 15 Catti M., Dovesi R., Pavese A., Saunders V.R. Energetics, structure and compressibility of NaF determined by the periodic Hartree-Fock method // J. Phys.: Condens. Matter. — 1991. — Vol. 3. — P. 4151.
- 16 McCarthy, Harrison N.M. Ab Initio Determination of the Bulk Properties of MgO // Phys. Rev. — 1994. — B 49. — P. 8574.
- 17 Catlow C.R.A., Stoneham A.M. Ionicity in solids // J. Phys. C: Solid State Phys. — 1983. — Vol. 16. — P. 4321.
- 18 Stoneham A.M. Theory defects in solids. — Cambridge Univ. press, 1975.
- 19 Norman C.D., Halliburton L.E. Radiation-induced fluorine interstitial atoms in MgF₂ // Phys. Rev. — 1977. — B 15. — P. 5883.
- 20 Yue L., Jia R., Shi H., He X., Eglitis R.I. First-principles calculations for the H center in SrF₂ crystals // J. Phys. Chem. — 2010. — A 114. — P. 8444.
- 21 Ueda Y. ESR study of hole centers in MgF₂ crystals irradiated with X-rays and neutrons at low temperatures // J. Phys. Soc. Japan. — 1976. — Vol. 41. — P. 1255.

Ф.У.Әбуова, А.Т.Ақылбеков, А.Б.Үсеинов, А.У.Әбуова, Г.Қаптағай

MgF₂ кристалындағы H-орталықтарының тұрақтылығы. Алғашқы принциппен есептеу

Негізгі кемтіккік ақаулардың, яғни түйінаралық фтор атомының есептеулерінің, нәтижелері көрсетілген (H бояу орталықтары деп аталатын). Бұл есептеулер *Crystal09* кодында жүзеге асырылған ауыспалы-корреляциялы ВЗРВ функционалын қолдану арқылы *ab initio* есептеулері жүргізілді. Материалдың сәулелендіруге және оптикалық қасиетін түсіну үшін біз электрондық құрылымын, атомдық геометриясын, зарядтардың таралу тығыздықтарын қарастырдық. Есептеулердің нәтижесі MgF₂ кристалы үшін энергетикалық ең тиімді бағдар болып (110) бағыты болып табылатыны анықталды.

F.U.Abuova, A.T.Akilbekov, A.B.Usseinov, A.U.Abuova, G.Kaptagai

Stabilization of the H-centers in MgF₂ crystals. First-principles calculations

Offered the results of calculations for basic colour centers (also referred to as H-colour centers) in the bulk. This study is based on the large scale *ab initio* DFT calculations using hybrid ВЗРВ exchange-correlation functional as implemented into *Crystal09* code. In order to understand the behaviour of the material with respect to irradiation and its optical properties, we analyzed the electronic structure, atomic geometry, charge density distribution. It is shown that the most energetically preferred orientation of the H center in MgF₂ crystals is (110) direction.

И.Х.Жарекешев

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы
(E-mail: isa2020@mail.ru)***Статистика спектральных корреляций в квантовом эффекте Холла**

Изучена критическая статистика уровней энергии в квантовом эффекте Холла. Вычислены плотность состояний и распределение межуровневых расстояний в центре нижней зоны Ландау для режима сильного магнитного поля. Показано, что статистическая мера — параметр Меты — проявляет скейлинговое поведение. Прямой диагонализацией решеточного гамильтониана оценен критический индекс длины локализации. Обсуждена связь между спектральными флуктуациями и мультифрактальностью волновых функций электрона.

Ключевые слова: электронная проводимость, критические явления, двумерный электронный газ, квантовый эффект Холла, электронная локализация.

1. Введение

В настоящий момент полной теории квантового эффекта Холла (КЭХ) не существует. Тем не менее, многие аспекты этого фундаментального явления в физике конденсированного состояния хорошо изучены и поняты. До сих пор используются две независимые взаимно дополняющие теоретические модели для качественного и количественного описания почти всех особенностей экспериментальных данных по КЭХ: модель краевых состояний и модель перехода локализация–делокализация. В модели краевых состояний полный электрический ток в образце обеспечивается узкими каналами вдоль границ образца. Транспортные свойства этих краевых каналов были широко исследованы как теоретически, так и экспериментально [1, 2]. С аналитической точки зрения эти краевые состояния связывают с хиральной жидкостью Латтинжера (chiral Luttinger liquid) [2].

Вторая модель берет за основу концепцию фазового перехода металл–изолятор, вызванного разупорядочением потенциальных энергий примесных атомных узлов. Он приводит к тому, что происходит резкий скачкообразный переход от локализованных состояний носителей заряда к делокализованным (распространенным) состояниям. Причем этот переход наблюдается в центре каждой зоны Ландау, которые становятся уширенными за счет беспорядка. Преимуществом такого подхода является то, что он объясняет скейлинговые соотношения температурной зависимости полуширины пиков, измеренной в экспериментах по осцилляциям Шубникова – де Газа и максимальным наклоном холловского сопротивления [3]. Различные исследования по КЭХ показывают, что длина локализации ξ электронных состояний расходится по шкале энергий при критическом значении энергии E_c согласно алгебраическому закону [4]:

$$\xi = \xi_0 \left| \frac{E_c}{E - E_c} \right|^{\nu}, \quad (1)$$

где ξ_0 — коэффициент пропорциональности порядка единицы; ν — критический индекс длины локализации. Наиболее точные и надежные к настоящему времени значения критического индекса были получены при помощи компьютерного моделирования Хукештайном и Крамером: $\nu = 2,34 \pm 0,1$ [5]. В противоположность фазовому переходу Андерсона (традиционному переходу металл–изолятор), который наблюдается в трехмерных неупорядоченных системах, переход от локализации к делокализации в квантовом эффекте Холла является неполным (т.е. незаконченным), так как области распространенных состояний вообще не существует. По обе стороны от критического значения энергии E_c находятся только локализованные состояния. Точно на энергии E_c в нижней зоне Ландау расположено одно-единственное электронное состояние, пространственная структура которого не относится ни к локализованным, ни к делокализованным состояниям. Принято считать, что волновая функция этого критического состояния обладает мультифрактальными свойствами.

2. Цель работы и методика исследования

Целью статьи является исследование скейлинговых свойств функции распределения межуровневых расстояний на переходе локализация–делокализация в целочисленном квантовом эффекте Холла. При этом будет рассматриваться только центр нижней зоны Ландау. Эта актуальная и интересная задача, поскольку предполагается, что статистика уровней энергии будет обладать *критическими* свойствами, присущими фазовым переходам в термодинамике. Такое критическое поведение должно быть непосредственно связано с пространственными характеристиками волновых функций электрона, в частности, с их мультифрактальными особенностями (см. раздел 3). Чтобы рассчитать функцию распределения межуровневых интервалов, а также спектр мультифрактальности, нам необходимо получить полный набор собственных значений и собственных функций решеточного гамильтониана в модели сильной связи. Для этого мы выбрали прямой путь численной диагонализации матриц, соответствующих указанному гамильтониану. Причем проводится усреднение по ансамблю неупорядоченных двумерных образцов при фиксированном значении магнитного поля.

Методика вычислений описана в разделе 4, более подробное ее описание дано в опубликованных нами работах [6–9]. По найденным результатам точных значений энергий электрона в дискретном спектре строятся гистограммы выборки для плотности состояний. В разделе 5 анализируются статистические свойства электронного спектра с использованием таких характеристик, как параметр Меты и распределение межуровневых интервалов $P(s)$. Первый, как ожидается, должен показать критическое поведение и скейлинг конечного размера, которые позволят вычислить критический индекс радиуса локализации — фундаментальной величины в физике квантового эффекта Холла. В заключительном разделе 6 представлены выводы.

3. Мультифрактальные свойства критических волновых состояний

В настоящей работе мы исследуем спектральные флуктуации вблизи мультифрактального электронного состояния, приближение к которому вызывается беспорядком примесного потенциала. В частности, свойства мультифрактальности собственных волновых функций играют важную роль при рассмотрении статистических корреляций [10]. Структура квантово-механического состояния $\phi_{M,E}$ для конечной системы объемом M^d и с энергией E определяется набором моментов q согласно формуле $P_q(M, E, a) = \sum p_i(M, E, a)^q$, где $p_i(M, E, a)$ — вероятность найти частицу внутри квадрата $\Lambda_i(a)$ со стороной a равна

$$p_i(M, E, a) = \sum_{R \in \Lambda_i(a)} |\phi_{M,E}(R)|^2. \quad (2)$$

При этом обобщенная фрактальная размерность D_q определяется следующим выражением:

$$D_q(M, E) = \lim_{a \rightarrow 0} \frac{\log P_q(M, E, a)}{(q-1) \log(a/M)}. \quad (3)$$

Собственная функция называется мультифрактальной, если она обладает многими различными значениями D_q для разных моментов q . Какая-либо мера или объект не являются фрактальными (или мультифрактальными), если обобщенная размерность D_q просто равна размерности Евклидова пространства d безотносительно к номеру момента q .

Фрактальные размерности D_q непосредственно связаны с диффузным поведением волновой функции. По броуновскому движению частицы можно судить о квантовой диффузии. Например, среднестатистическое ожидание квадрата расстояния от начального момента диффузионного процесса (другими словами, от точки зарождения волнового пакета) пропорционально квадрату времени $\langle R^2 \rangle = t^2$. Такое поведение характерно для распространенных волновых состояний. В отличие от последних, для мультифрактальных состояний в d -мерном пространстве выполняется другое соотношение [11]:

$$\langle R^2 \rangle = t^{D_2-d}. \quad (4)$$

Мультифрактальные собственные функции также возникают в критической точке обычного перехода Андерсона, наблюдаемого в трехмерных неупорядоченных системах [12, 13]. Наглядная иллюстрация мультифрактального состояния, полученного прямой численной диагонализацией трехмерной модели Андерсона в центре зоны, приведена на рисунке 1 работы [14]. В точке локализационного перехода собственное состояние электрона является мультифрактальным на всех масштабах длин, поскольку длина локализации расходится. Отметим здесь, что предварительные ис-

следования по мультифрактальным свойствам критических состояний в квантовом эффекте Холла проводились ранее в работах [15, 16].

4. Модель для компьютерных симуляций

Для расчета спектральных корреляций и мультифрактальности мы используем двумерную модель Андерсона с диагональным беспорядком, где магнитное поле входит в задачу через фазовый множитель Пайерлса [17]. Тогда гамильтониан нашей решеточной модели \mathbf{H} имеет следующий вид в представлении вторичного квантования:

$$\mathbf{H} = \sum_R \varepsilon_R |R\rangle\langle R| + \sum_{\Delta} V_{R,R+\Delta} |R+\Delta\rangle\langle R|. \quad (5)$$

Энергии ε_R измеряются в единицах модуля прыжкового элемента $|V_{R,R+\Delta}|$, а все масштабы длины — в единицах постоянной решетки. Состояния $|R\rangle$ соответствуют узлам простой кристаллической решетки. Энергии на узлах ε_R , которые в наших компьютерных симуляциях задаются генератором случайных чисел, распределены равномерно внутри интервала энергий от $-W/2$ до $W/2$. Таким образом, ширина интервала W играет роль степени разупорядочения (или беспорядка) узельных примесных потенциалов. Второй член в гамильтониане (5) описывает кинетическую энергию электронов.

Мы учитываем квантовые прыжки только между ближайшими узлами двумерной решетки R и $R+\Delta$. Поэтому интегралы квантово-механического перекрытия равны комплексной единице:

$$t_{r,r+\Delta} = \begin{cases} \exp(\mp 2\pi i \alpha k), & \Delta = \pm e_x, R \otimes e_y = k, \\ 1, & \Delta = \pm e_y, \end{cases} \quad (6)$$

где α является величиной магнитного потока на единичную (элементарную) ячейку $\alpha = eB/hc$. Здесь напряженность магнитного поля B , вектор которого направлен перпендикулярно поверхности нашей двумерной системы, величина элементарного заряда e , постоянная Планка h и скорость света c . Квант магнитного потока равен $\Phi_0 = hc/e$.

Мы диагонализировали матрицы гамильтониана (5), соответствующие конечным квадратным системам, линейные размеры которых равны $L = 50, 80, 100, 200$, используя метод Ланцоша для решения задач на собственные значения комплексных матриц [18]. Методика и схема диагонализации разреженных матриц, отвечающих гамильтониану (5), приведены в работах [19, 20]. Для того чтобы получить более надежные статистические данные по спектральным корреляциям, была обработана целая выборка из ансамбля образцов. Значения беспорядка было выбрано $W = 0,7; 2,0; 3,0; 5,0$.

Величина напряженности магнитного поля была подобрана так, чтобы удовлетворить условию совместимости с решеткой и граничными условиями $\alpha = 0,1$ и $0,01$. Следует обратить внимание на то, что эта вынужденная процедура связана с недостатками решеточных моделей. В отличие от континуальных моделей КЭХ, здесь мы вынуждены избегать фрустрации решетки. В частности, в решеточных моделях невозможно смоделировать эффект левитации критических уровней в слабых магнитных полях. (Если, разумеется, не учитывать длинно-масштабные корреляции неупорядоченного потенциала.) В континуальном же представлении указанное явление подтверждается, и глобальная фазовая диаграмма КЭХ воспроизводится.

На рисунке показана плотность состояний $\rho(E)$ для магнитного поля $\alpha = 0,1$ в области нижних зон Ландау. Поскольку спектр симметричен по отношению к центру общей зоны E_0 , на рисунке 1 изображена только нижняя (отрицательная) часть зоны, которая полностью симметрична верхней (положительной) части зоны. Как видно из рисунка, энергетическая зона модели сильной связи расщепляется на десять ($1/\alpha$) подзон (линия 1). С увеличением беспорядка W ширина зон Ландау постепенно увеличивается (кривая 2). При этом максимумы зон снижаются, а промежутки плотности состояний между ними становятся ненулевыми. Постепенно зоны перекрываются друг другом (кривые 3 и 4) и, в конце концов, полностью сливаются в неосциллирующую и монотонно возрастающую с энергией плотность состояний (кривая 5).

В противоположном случае, т.е. в пределе исчезающего беспорядка и при конечном магнитном поле, должен получиться ряд вырожденных дискретных уровней, соответствующих уровням Ландау в решеточном представлении. Если магнитное поле стремится к нулю, то плотность состояний переходит к результату сильной связи для $d = 2$. На рисунке результат для плотности состояний в двумерной упорядоченной системе для термодинамического предела ($L = \infty$) показан кривой 5.

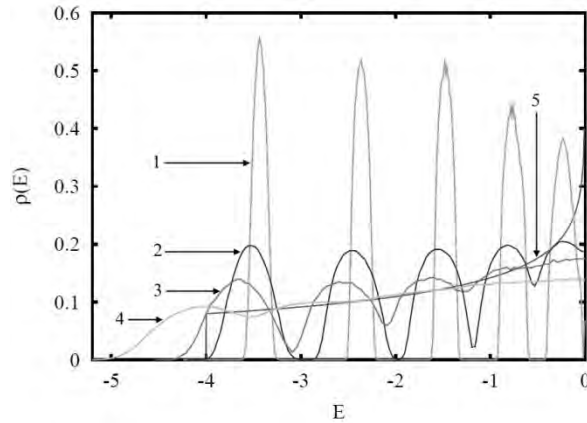


Рисунок. Плотность одночастичных состояний $\rho(E)$ двумерного электронного газа в магнитном поле $\alpha = 0,1$ для различной степени беспорядка $W = 0,7$ (1); $2,0$ (2); $3,0$ (3); $5,0$ (4). Размер квадратной системы $L \times L = 50 \times 50$. Результаты получены после усреднения по ансамблю из 200 образцов. Также показана плотность состояний для модели сильной связи при $W = 0$ и $B = 0$ (5)

5. Распределение интервалов между ближайшими уровнями и параметр Меты

Мы вычислили статистику корреляций уровней энергии в форме функции распределения межуровневых интервалов $P_c(s)$ вблизи критической энергии $E = -3,455$, т.е. в центре нижней зоны Ландау для разных размеров системы. Напряженность магнитного поля выбиралась равной $\alpha = 0,1$ и фиксированной для всех размеров системы. Данные компьютерного моделирования показали, что никакой зависимости функции распределения межуровневых расстояний $P_c(s)$ от размеров системы L не обнаружено. Этот результат проверялся для разных размеров $L = 50, 80, 100$ и 200 . Все точки на графике, соответствующие разным линейным размерам образцов, лежат на одной кривой, близкой к функции распределения расстояний между ближайшими уровнями энергии для гауссового унитарного ансамбля для хаотических матриц. Подобная масштабная инвариантность характерна для критических ансамблей. Аналогичные результаты получены для напряженности магнитного поля $\alpha = 0,01$.

Вычисления критического распределения $P_c(s)$ в присутствии однородного магнитного поля сравнивались с данными по критической статистике без магнитного поля. При этом отмечается отличие по высоте максимумов, а также в поведении функции $P_c(s)$ на малых и больших интервалах s . Известно, что распределение Пуассона описывает статистику уровней энергии, лежащих в локализованной области, а распределение Вигнера справедливо для собственных энергий, соответствующих электронным состояниям в делокализованной области. Наш результат демонстрирует для критической функции $P_c(s)$ существенное отличие от обоих фундаментальных распределений. Причем расхождение от пуассоновского распределения намного больше, чем от вигнеровского распределения.

Поведение функции $P_c(s)$ при малых интервалах является квадратичным, как и ожидается в унитарном случае. Проверено, что поведение функции распределения на больших межуровневых интервалах хорошо описывается экспоненциальной функцией: $P_c(s) \sim \exp(-\gamma s)$ со скоростью спада $\gamma = 2,4$. Такая простая функциональная форма и темп спада похожи на случай критической симплектической статистики для $d = 2$, изученной нами ранее в работе [21].

Чтобы найти положение критического мультифрактального состояния на шкале энергий в наинизшей зоне Ландау, мы использовали статистическую меру, величину для описания спектральных корреляций. Она называется мерой Меты и имеет следующий вид:

$$I_0 = \int_0^\infty ds \int_s^\infty ds' \int_{s'}^\infty P(s'') ds'' \quad (7)$$

Этот интеграл может быть вычислен со сравнительно высокой точностью. Его преимущество по отношению к другим статистическим характеристикам, используемым для тех же целей, заключается в том, что он не требует дополнительных подгоночных параметров, как, например, параметр оттачивания по Броди [22]. Кроме того, он свободен от «верхних отсечек», так как интегрирование проводится по всему спектру, как следует из уравнения (7), в отличие от статистики Δ_3 [23, 24].

Были проведены тестовые вычисления на основе модели (5) статистической меры — параметра Меты I_0 по формуле (5) для различных размеров исследуемой двумерной системы при магнитном по-

ле $\alpha = 0,1$ в низшей зоне Ландау. При этом для численного моделирования выбрана узкая область энергий с наиболее распространенными электронными состояниями (см. плотность состояний на рисунке вокруг первой зоны Ландау). Единственным свободным параметром при вычислении I_0 является ширина интервала, из которого выбираются собственные значения. Поскольку I_0 зависит от положения в зоне, целесообразно выбирать интервал энергии как можно узким. Недостатком этого метода, однако, является то, что число собственных значений, требуемых для гарантированной точности, определяет нижний предел ширины интервала. В этом случае мы подбираем такую ширину, что интеграл I_0 остается фиксированным, если ширина интервала уменьшается до тех пор, пока флуктуации не станут слишком большими.

Наименьшее значение интеграла I_0 соответствует критическому значению энергии $E_c = -3,455$. Причем его минимум совпадает для всех размеров L исследуемой системы. Согласно теории подобия, в этой точке пересекаются все линии зависимости статистики от энергии. Наблюдается некоторое систематическое отклонение от общей точки пересечения, которое можно объяснить эффектами конечного размера [25]. Эти эффекты можно учесть, если включить в теорию дополнительные поля, которые служат поправками конечного размера к скейлинговому закону.

Слева и справа от этой точки статистика уровней показывает тенденцию к сильной локализации. Чем больше размер системы, тем круче вверх поднимаются ветви параболы $I_0(E)$. Согласно формуле (1) электронные состояния вдали от критической энергии E_c становятся все более локализованными, если размеры системы увеличиваются. Логично, что такое поведение дает возможность достаточно точно рассчитать критический индекс длины локализации ν . Он оказался равным $\nu = 2,4 \pm 0,1$. Такое значение достаточно хорошо совпадает со значением критического показателя, полученного в работе [5], в которой использовались совсем другие независимые методы исследования. (Подробности этих вычислений и связанных с ними исследований будут приведены в последующих публикациях.)

Следует ожидать, что в пределе бесконечного размера исследуемой системы останется лишь перевернутая δ -функция. Это и есть индикация положения критического мультифрактального состояния электрона по шкале энергии для квантового эффекта Холла. С другой стороны, это подтверждает факт существования масштабно-инвариантной критической статистики уровней для КЭХ.

Авторами работы [26] был предложен аналитический подход, который доказывает, что сжимаемость спектра в критической точке может характеризоваться мультифрактальными свойствами критических волновых функций, рассмотренных выше в разделе 3. В терминах мультифрактальной размерности $D_2 = d - \mu$ сжимаемость электронного спектра равна

$$K_c = \lim_{\langle N \rangle \rightarrow \infty} \frac{d \langle \delta^2 N \rangle}{d \langle \delta N \rangle} = \frac{\mu}{2d} = \frac{d - D_2}{2d} < \frac{1}{2}, \quad (8)$$

где $\langle \delta N^2(E) \rangle \equiv \langle [N(E) - \langle N(E) \rangle]^2 \rangle$ — дисперсия числа уровней энергии в произвольном интервале энергии шириной E , а $\langle N(E) \rangle$ — его среднее значение. Угловые скобки означают усреднение по ансамблю реализаций.

Результаты наших компьютерных вычислений фрактальной размерности μ и критической сжимаемости K_c до сих пор удовлетворяли этому соотношению для размерности $d \leq 3$ [27, 28]. В режиме квантового эффекта Холла мы получили $K_c = 0,135$. Это значение вполне согласуется со значением мультифрактального момента второго порядка $D_2 = d - \mu = d(1 - 2K_c) \approx 1,46$ [12].

В заключение следует отметить, что спектральная сжимаемость K_c меньше, чем в трехмерном случае [25], указывая на то, что внутренняя жесткость кластеров уровней усиливается с понижением размерности системы d . Отметим, что пуассоновский процесс никакой жесткостью не обладает ($K_p \equiv 1$). Однако точность по $\langle \delta N^2 \rangle$ все же не так высока, чтобы достичь точный предел насыщения при $\langle N \rangle \geq 1$ и, как следствие, обеспечить желаемую и надежную оценку для мультифрактальной размерности μ из формулы (8). Необходимо отметить, что требуется независимый дополнительный компьютерный расчет спектра мультифрактальности критических собственных электронных функций на переходе от локализации к делокализации, чтобы с большой точностью и достоверностью найти соотношение между статистикой уровней и статистикой амплитуд волновых состояний в КЭХ.

6. Выводы

В режиме целочисленного квантового эффекта Холла были вычислены плотности состояний и функция распределения интервалов между ближайшими дискретными уровнями энергии $P(s)$. Для этого использовалась модель Андо с диагональным беспорядком примесных центров. Анализ

полученных после численного моделирования результатов показал, что функция распределения $P(s)$ вблизи центра нижней зоны Ландау проявляет размерно-независимый характер. Это свидетельствует о масштабно-инвариантной статистике в критической точке перехода «локализация-делокализация» между плато в КЭХ в термодинамическом пределе $L \rightarrow \infty$. Показано, что важная статистическая мера — параметр Меты, который учитывает особенности как длинномасштабных, так и коротко-масштабных корреляций, проявляет скейлинговое поведение. По нему можно вычислить критический индекс длины локализации. В пределах погрешности компьютерных симуляций он оказался близким к значениям, известным в литературе и полученным другими методами (например, методом трансфер-матриц). И наконец, статистика уровней для критической энергии в целочисленном КЭХ связана со спектром мультифрактальности, соответствующей критической волновой функции электронов. Полученное нами значение критической сжимаемости хорошо согласуется с фрактальной размерностью.

References

- 1 Prange R., Girvin S. The Quantum Hall Effect. — Berlin: Springer Verlag, 1990. — 213 p.
- 2 Hajdu J. Introduction to the Theory of the Quantum Hall Effect. — VCH Verlag, 1994. — 308 p.
- 3 Haug R.J. Quantum Hall effect experiments // Quantum Transport in Semiconductor Submicron Structures / NATO ASI Series, Kluwer Academic Publisher, 1996. — Vol. 326. — P. 21–27.
- 4 Ando T. Numerical study of symmetry effects on localization in two dimensions // Phys. Rev. B. — 1989. — Vol. 40. — P. 5325–5328.
- 5 Huckestein B., Kramer B. One-parameter scaling in the lowest Landau band: Precise determination of the critical behavior of the localization length // Phys. Rev. Lett. — 1990. — Vol. 64. — P. 1437–1440.
- 6 Zharekeshev I.Kh. Probability of the level number in a given energy interval in disordered quantum systems // Eurasian Physical Technical Journal. — 2010. — Vol. 7, No. 1(13). — P. 56–60.
- 7 Zharekeshev I.Kh. The two-level correlation function and the form-factor // Eurasian Physical Technical Journal. — 2010. — Vol. 7, No. 1(13). — P. 61–67.
- 8 Zharekeshev I.Kh. The relation of the chaotic conductivity fluctuations with the electron energy level statistics in disordered quantum systems // Izvestiya NAN RK. Series: physics and mathematics. — 2010. — No. 2(270). — P. 27–30.
- 9 Zharekeshev I.Kh. Spectral rigidity at the mobility edge // Vestnik Evraziyskogo nazional'nogo universiteta. — 2010. — Vol. 77, No. 4. — P. 41–48.
- 10 Chalker J.T., Lerner I.V., Smith R. Random walks through the ensemble: Linking spectral statistics with wave-function correlations in disordered metals // Phys. Rev. Lett. — 1996. — Vol. 77. — P. 554–557.
- 11 Schweitzer L. Multifractal properties of critical eigenstates in two-dimensional systems with symplectic symmetry // J. Phys. C. — 1995. — Vol. 7. — P. L281–L287.
- 12 Brandes T., Huckestein B., Schweitzer L. Critical dynamics and multifractality fractal exponents at the Anderson transition in 3D disordered systems // Ann. Phys. — 1996. — Vol. 5. — P. 633–645.
- 13 Zharekeshev I.Kh., Kramer B. Advanced diagonalization in models of quantum disordered systems // Computer Physics Communications. — 1999. — Vol. 121/122. — P. 502–504.
- 14 Zharekeshev I.Kh. Iterative calculation of electron wave functions in quantum nanoclusters // Vestnik KarGU. Series Physics. — 2010. — Vol. 58, No. 2. — P. 29–33.
- 15 Pook W., Janssen M. Multifractality and scaling in disordered mesoscopic systems // Z. Phys. — 1991. — Vol. 52. — P. 565–570.
- 16 Huckestein B., Kramer B., Schweitzer L. Characterization of the electronic states near the centre of the Landau bands under quantum Hall effect conditions // Surf. Science. — 1992. — Vol. 263. — P. 125–128.
- 17 Peierls R. Zur Theorie des Diamagnetismus von Leitungselektronen // Z. Phys. — 1933. — Vol. 80. — P. 763–788.
- 18 Cullum J.K., Willoughby R.K. Lanczos algorithms for large symmetric eigenvalue problems / Ed. by Birkhauser. — Boston, USA, 1985. — 355 p.
- 19 Schweitzer L., Batsch M., Zharekeshev I.Kh. Zum Metall-Isolator-Uebergang in ungeordneten zweidimensionalen Systemen // Tagung der Deutscher Physikalischer Gesellschaft. — Regensburg, 1998. — P. HL24.
- 20 Zharekeshev I.Kh. Mobility edge in a magnetic field at the Anderson transition studied by the transfer-matrix method // NNC RK Bulletin. — 2011. — Vol. 48, No. 4. — P. 136–141.
- 21 Schweitzer L., Zharekeshev I.Kh. Critical level spacing distribution of two-dimensional disordered systems with spin-orbit coupling // J. Phys.: Condens. Matter. — 1995. — Vol. 7. — P. L377–L382.
- 22 Brody T.A. Statistical measure for the repulsion of energy levels // Nuovo Cimento Lett. — 1973. — Vol. 7. — P. 482–484.
- 23 Zharekeshev I.Kh., Schweitzer L., Batsch M., Kramer B. Universal level statistic and spin-orbit scattering at the disorder-induced metal-insulator transition in 2d systems // Abstr. Workshop on Localization and Transport in Disordered and Low-Dimensional Systems. — Karlsruhe, Germany, 1995. — P. 33.
- 24 Zharekeshev I.Kh. Magnetic flux controlled crossover between critical ensembles at the metal-insulator transition // Vestnik KarGU. Series Physics. — 2012. — No. 1(65). — P. 20–25.

25 *Batsch M., Schweitzer L.* Level statistics in quantum Hall regime // Proceedings of the Intern. Conf on High magnetic fields in semiconductor physics. — Wurzburg, Germany, 1997. — P. 59–63.

26 *Chalker J.T., Kravtsov V.E., Lerner I.V.* Spectral rigidity and eigenfunction correlations at the Anderson transition // Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. — 1996. — Vol. 64, No. 5. — P. 355–360.

27 *Zharekeshev I.Kh.* Chaotic and critical fluctuations in spectra of disordered systems at higher dimensions // Zhurnal problem evoluzii otkrytyh system. — 2010. — Vol. 1, No. 12. — P. 14–24.

28 *Zharekeshev I.Kh.* Random matrix theory and scaling of the level statistics // Vestnik Evraziyskogo nazional'nogo universiteta. — 2010. — Vol. 77, No. 4. — P. 35–40.

И.Х.Жарекешев

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы

Холлдың кванттық эффектiсiндегi спектралдық корреляциялардың статистикасы

Холлдың кванттық эффектiсiндегi энергия деңгейлерiнiң критикалық статистикасы зерттеледi. Асимптотикалық режiм үшiн Ландау зонасының орталығында спектралдық корреляциялық функциясы есептеледi. Статистикалық өлшем — Меhta параметрi — скэйлингiдiк қасиеттi айқындайтындығы көрсетiлген. Торлы гамильтонианың тiкелей диагонализациялануы локализация ұзындығының критикалық индекспен бағаланады. Спектралдық флуктуация мен көпфракталды электронның толқындық функциясының арасындағы қатынас анықталған.

Түйiн сөздер: электрондық өткiзгiштiк, критикалық құбылыстар, екi өлшемдегi электрондық газ, Холлдың кванттық эффектiсi, электрондық локализациясы.

I.Kh.Zharekeshev

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty

Statistics of spectral correlations in the quantum Hall effect

The critical level statistics in the integer quantum Hall effect is studied. The density of states and level spacing distribution computed for strong magnetic field regime in the center of the lowest Landau band. The statistical measure, Mehta parameter is shown to exhibit scaling behavior. The critical exponent of the localization length is estimated by direct diagonalising the lattice Hamiltonian. The link between the spectral fluctuations and the multifractality of the electron wave states is discussed.

Key words: electron conductivity, critical phenomena, two-dimensional electron gas, quantum Hall effect, electron localization.

Н.Х.Ибраев, А.К.Аймуханов, Т.М.Сериков

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

Фотовольтаические свойства ячеек Гретцеля, сенсibilизированных родаминовыми красителями

В статье приведены результаты исследования фотовольтаических свойств ячеек Гретцеля на основе пористых пленок широкозонного полупроводника диоксида титана, допированного молекулами родаминовых красителей. Установлено, что электролитические ячейки Гретцеля на основе пористых пленок полупроводника и молекул красителей обладают явными фотовольтаическими свойствами. На наличие фотовольтаических свойств проверялось семейство родаминовых красителей. Отмечено, что плотность тока в ячейке зависит от спектра поглощения активного слоя, поэтому поглощение должно быть в оптимальной спектральной области, чтобы обеспечить максимальное использование солнечного спектра. Обнаружено, что наилучшими фотовольтаическими показателями обладает миристинат родамина БЖ.

Ключевые слова: родаминовые красители, диоксид титана, электролитические ячейки Гретцеля, пористые пленки.

Введение

Существует большое количество разнообразных типов солнечных элементов. В настоящее время наиболее распространёнными из них являются элементы на основе монокристаллического кремния, изготовление которых является довольно дорогим, а срок службы их ограничен. Эти недостатки стимулируют поиск новых типов преобразователей солнечной энергии в электрическую [1].

Органические материалы занимают особое место среди солнечных элементов. В частности, КПД солнечных элементов на основе нанокристаллов диоксида титана, покрытых органическим красителем, достигает порядка ~11 %. В основе таких солнечных элементов лежит широкозонный полупроводник, обычно TiO_2 , который покрыт монослоем органического красителя. Как правило, донорами в такой ячейке выступают органические красители, поглощающие излучение в видимой и ближней ИК-области спектра. Акцепторами электрона, в зависимости от типа ячейки, могут выступать оксиды металлов, фуллерены, полимерные полупроводники.

Одним из важнейших элементов солнечной ячейки является редокс-электролит, обеспечивающий восстановление окисленного красителя и тем самым замыкающий цикл генерации заряда (окисления-восстановления красителя) [2]. Фотоэлектрод такого устройства представляет собой нанопористую пленку TiO_2 , осажденную на поверхность проводящей пленки на стекле. В качестве отражающего электрода используют тонкий слой Pt, осажденной на поверхность стекла. Пространство между двумя электродами заполняют электролитом. Принцип работы такого фотопреобразователя основан на фотовозбуждении красителя и быстрой инжекции электрона в зону проводимости TiO_2 . При этом молекула красителя окисляется, через элемент идет электрический ток, и на платиновом электроде происходит восстановление электролита. После чего электролит восстанавливает окисленный краситель [2]. В качестве красителей в этом преобразователе используют различные органические вещества, которые хорошо взаимодействуют с поверхностью наночастиц TiO_2 , легко отдают электроны при облучении солнечным светом, поглощают свет в широком спектральном диапазоне и обладают высокой устойчивостью в окисленном состоянии. Фотосенсибилизация широкозонных полупроводников, таких как TiO_2 , абсорбирующимися красителями приобрела практическую значимость после открытия пористых плёнок с очень высокой удельной поверхностью. Только первый монослой абсорбированного красителя приводит к эффективному электронному переносу от красителя в полупроводник, но светопоглощающая эффективность одного монослоя красителя очень мала [2].

В пористой плёнке, состоящей из наноразмерных частиц TiO_2 , эффективная поверхность увеличивается в 1000 раз, что делает возможным поглощение света даже одним монослоем красителя.

Доказано, что Ru-бипиридиневые комплексы являются наиболее эффективными фотосенсибилизаторами TiO_2 в солнечных элементах, благодаря наличию у них способности поглощать в широком спектральном диапазоне, сочетающейся с подходящими фотоэлектрохимическими свойствами

и высокой устойчивостью в окисленном состоянии. Тем не менее, другие красители, такие как Zn-тетракарбокисфенилпорфирин или кумарин, также используются [3].

Однако на сегодняшний момент очень мало исследований, целью которых является подбор наиболее оптимального по своим параметрам красителя из каждого класса для перспективного использования в органической фотоэнергетике. В целях получения высокого КПД подбирались красители, хорошо поглощающие свет в видимой области спектра. В связи с этим в настоящей работе представлены результаты исследований фотовольтаических характеристик классов родаминовых красителей.

Методика эксперимента

Плотность тока в солнечной батарее в первую очередь зависит от спектра поглощения активного слоя. Поглощение должно быть в оптимальной спектральной области, чтобы обеспечить максимальное использование солнечного спектра. Измерение спектров поглощения красителей проводилось на спектрофотометре Spekol 1500 (Analytik Jena) в растворе этанола. Концентрация красителей в растворе составляла $C = 10^{-5}$ моль/л.

Следует отметить, что ранее авторами исследован перенос электрона для ксантеновых красителей (эозин, Р6Ж, РБ), адсорбированных на поверхности TiO_2 . Среди них наиболее эффективным оказался эозин, который якорной карбоксильной группой, на которой сосредоточен отрицательный заряд, также закрепляется на поверхности TiO_2 . В связи этим было интересно, как проявят себя в фотовольтаике различные соли родаминовых красителей.

В качестве объектов исследования были различные соли родаминовых красителей, имеющие разные значения отрицательного заряда в противоионах. Среди них наибольшей поглощательной способностью обладает молекула пеларгоната родамина бЖ с максимальным значением коэффициента экстинкции $\epsilon_{\text{max}} = 119536$ моль $^{-1}$ ·л·см $^{-1}$. Кроме пеларгоната родамина бЖ, в группу красителей этого ряда, имеющих максимальное значение коэффициента экстинкции, входят стеарат родамина и адаманат родамина бЖ.

Спектроскопические характеристики спектров поглощения родаминовых красителей показаны в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Параметры спектров поглощения родаминовых красителей

| Тип красителя ($C = 10^{-5}$ моль/л) | $\lambda_{\text{abs max}}$, нм | $\Delta\lambda_{1/2\text{abs}}$, нм | ϵ_{max} , моль $^{-1}$ ·л·см $^{-1}$ | Интегральный коэффициент поглощения, $A(\epsilon)$ |
|--|---------------------------------|--------------------------------------|---|--|
| Бегенат родамина бЖ | 532 | 33 | 51078 | $2,02 \cdot 10^6$ |
| Стеарат бЖ | 531 | 39 | 110668 | $4,8 \cdot 10^6$ |
| Бутират бЖ | 529 | 38 | 56601 | $2,5 \cdot 10^6$ |
| Адаманат бЖ | 531 | 33 | 91907 | $3,8 \cdot 10^6$ |
| Пеларгонат бЖ | 531 | 34 | 72361 | $2,9 \cdot 10^6$ |
| Миристинат бЖ | 532 | 34 | 119536 | $4,9 \cdot 10^6$ |

Для изготовления рабочего электрода использовалось стекло ИТО в качестве токосъемника ($75 \times 25 \times 1,1$ мм, $r = 12$ Ом/см 2 , Aldrich), которое было очищено в моющем растворе с использованием ультразвуковой ванны в течение 15 мин, после промыто водой и этанолом. Затем стеклянные пластины ИТО погружали в водный раствор 40 ммоль TiCl_4 при 70 °С на 30 мин и промывали водой и этанолом.

Для получения пленки нанокристаллического TiO_2 был приготовлен раствор, содержащий порошок коллоидного TiO_2 . Раствор готовился следующими образом: 6 г коллоидного TiO_2 растирали в фарфоровой ступке с небольшим количеством деионизированной воды (2 мл) и ацетилацетона (0,2 мл). После образования вязкой пасты постепенно добавляли дополнительно 8 мл воды, продолжая растирание. Полученную смесь наносили на поверхность проводящей стеклянной пластинки трафаретной печатью. Такую процедуру трафаретной печати (нанесение, высушивание) повторяли до получения подходящей толщины — 12–14 мкм рабочего электрода. После высушивания пленок трафаретной печатью при 150 °С наносились два слоя пасты, дающей светорассеивающую пленку TiO_2 , содержащую 400 нм анатазные частицы толщиной 4–5 мкм. Электроды, покрытые пастой TiO_2 , по-

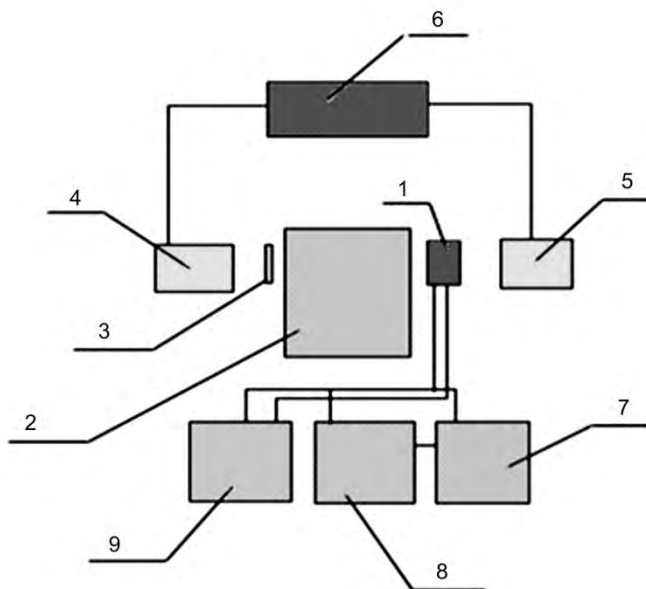
степенно нагревались в муфельной печи при 300 °С в течение 5 мин, при 450 °С в течение 15 мин и в конце 15 мин при 500 °С.

Двойную пленку TiO₂, сделанную таким образом, повторно обрабатывали 40 мМ раствором TiCl₄, затем вновь промывали водой и этанолом и спекали при 500 °С в течение 30 мин. После охлаждения до 80 °С электроды TiO₂ погружали в раствор красителя на 20 часов при комнатной температуре для уверенности прохождения полной сенсibilизации.

Пропитанный красителем электрод вынимался из сосуда и высушивался в сушильном шкафу. Высушенный электрод помещался на стол плёнкой вверх, а противоположный, покрытый катализатором (Pt), — сверху, проводящей стороной к плёнке TiO₂. Две противоположные стеклянные пластинки совмещались таким образом, чтобы вся плёнка была закрыта противоположным электродом, а часть электрода, не покрытая TiO₂, была открыта для контакта. Совмещённые электроды скрепляли зажимами. Несколько капель раствора йодида/трийодида наносили на поверхность пластинок таким образом, чтобы электролит равномерно покрывал всю поверхность пленки полупроводника. Чтобы защитить элемент от вредного воздействия УФ-излучения, на солнечный элемент помещали пластиковый светофильтр.

Вольтамперные характеристики (ВАХ) и спектральную зависимость фоточувствительности измеряли при освещении ячейки Гретцеля со стороны проводящего слоя излучением ксеноновой лампы в диапазоне длин волн 350–750 нм мощностью 70 мВт/см² на установке, представленной на рисунке 1. Измерения проводились в фотовольтаическом режиме при комнатной температуре. Процедура измерения спектральной чувствительности заключается в следующем: свет от лампы (4) через собирающую линзу (3) заполняет входную щель монохроматора (2); выделенное монохроматором излучение определенной длины волны освещает поверхность исследуемого образца 1. В процессе сканирования записываются показания вольтметра 9 при разрыве цепи измерительной схемы и амперметра 8 при нулевом значении сопротивления нагрузочного резистора (7) для каждого значения длины волны. Для расчета спектральной чувствительности ячейки полученные значения тока короткого замыкания и напряжения холостого хода следует разделить на число фотонов, при котором получено измеренное значение тока короткого замыкания и напряжения холостого хода.

При проведении измерений темновых и световых вольтамперных характеристик свет от лампы (5) заполняет непосредственно поверхность образца, изменяя значение сопротивления на магазине сопротивлений (7), записываются показания амперметра и вольтметра.



1 — солнечный элемент; 2 — монохроматор МС 80; 3 — собирающая линза; 4, 5 — ДКСШ — 200; 6 — блок питания лампы; 7 — магазин сопротивлений; 8 — амперметр UNI-T UT 803 (True RMS Multimeter); 9 — вольтметр FLUKE 8846A (Digit Precision Multimeter)

Рисунок 1. Блок-схема измерительной установки

Параметры вольтамперной кривой — напряжение холостого хода (U_{xx}), ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и фактор заполнения (FF). Фактор заполнения определяется по формуле

$$FF = \frac{(I_n \cdot U_n)}{I_{кз} \cdot U_{xx}}. \tag{1}$$

Максимальная эффективность солнечной батареи достигается в точке наибольшей энергии, в которой произведение тока на напряжение достигает максимума. В этой точке ток обозначается I_n , а напряжение — U_n , эта точка определяет реальную эффективность солнечной батареи. КПД солнечной батареи определяется по формуле

$$\eta, \% = \left(\frac{P_{эл}}{P_{света}} \right) \cdot 100 \%. \tag{2}$$

Результаты и их обсуждение

Одной из важных характеристик органических фотоэлементов, часто используемой для анализа функционирования элемента и оценки свойств красителя, является спектральная эффективность конверсии солнечного излучения, которая представляет спектральную зависимость fotocувствительности. На рисунке 2 представлен график зависимости fotocувствительности ячейки Гретцеля, sensibilizированной молекулами миристината родамина бж. Измерения проводились следующим образом: на каждой длине волны записывали значения тока короткого замыкания, полученные значения делили на показания мощности лампы на каждой длине волны, таким образом строили график зависимости спектральной чувствительности ячейки. Спектр фотовольтаической чувствительности миристината родамина имеет широкую бесструктурную полосу, простирающуюся от 450 нм до 650 нм. Максимум спектра фотовольтаической чувствительности ячейки приходится на 550 нм и смещен в длинноволновую область спектра относительно спектров поглощения раствора миристината родамина (рис. 2). Исследование спектров фотовольтаической чувствительности ячеек, sensibilizированных родаминовыми красителями, показало, что спектры чувствительности родаминовых красителей ячеек расположены в той же области, что и спектры их поглощения.

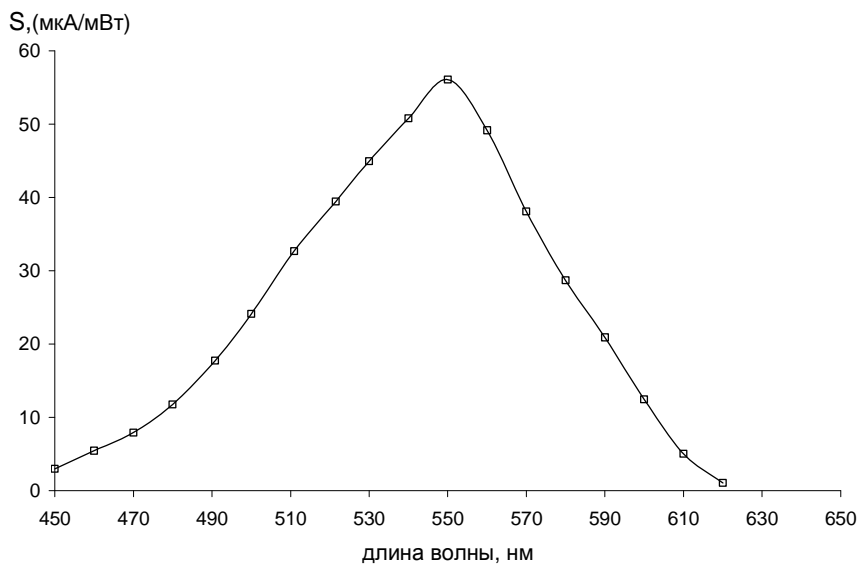


Рисунок 2. Спектральная чувствительность ячейки Гретцеля, допированной молекулами миристината родамина бж

На рисунке 3 представлены темновая и световая ВАХ ячейки Гретцеля, sensibilizированной молекулами миристината родамина бж. Как видно из рисунка, ВАХ нелинейная и имеет прямую и обратную ветви. ВАХ ячейки Гретцеля аналогична ВАХ полупроводникового прибора. Измерение темновой ВАХ проводилось при выключенном источнике света, при этом, изменяя значения сопро-

тивления на магазине сопротивлений, записывались показания амперметра и вольтметра. На рисунке 3 (кривая 1) показана темновая ВАХ. Как видно из графика, темновая ВАХ ячейки проходит через нулевое значение тока и напряжения. Изменения тока и напряжения составляют 2 мкА и 600 мВ соответственно.

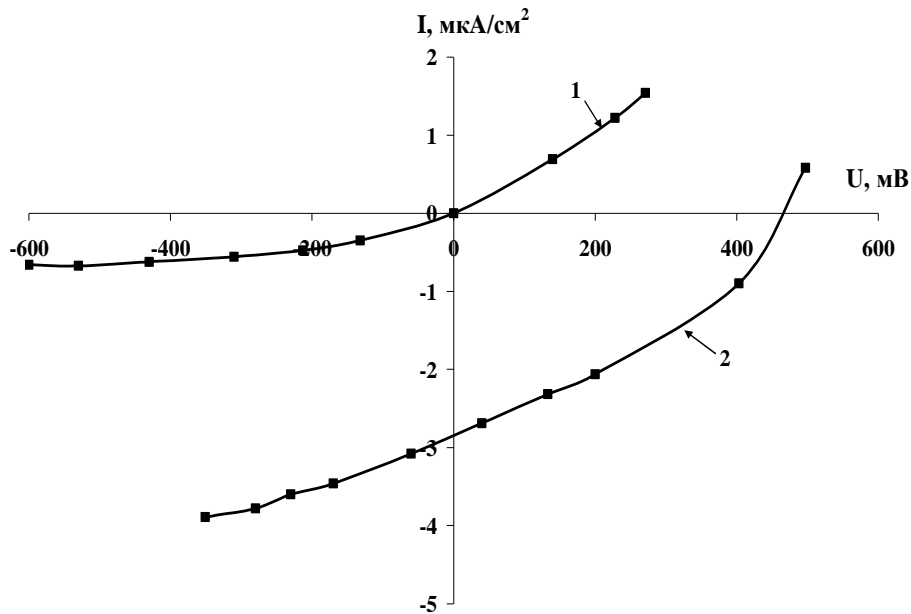


Рисунок 3. Темновая (1) и световая (2) ВАХ ячейки Гретцеля, допированной молекулами миристината родамина бЖ

При освещении ячейки ксеноновой лампой происходит фотовозбуждение электронов молекулы красителя и наблюдается инжекция носителей заряда от молекулы красителя в зону проводимости полупроводника. Окисленная молекула красителя восстанавливается посредством жидкого электролита трийодида йода, в результате чего по цепи течет ток. Этот процесс идет до тех пор, пока поверхность ячейки освещается светом. ВАХ ячейки, также нелинейная, в этом случае смещается вниз по оси значения токов и не проходит через нулевые значения токов и напряжений. При освещении ячейки смещение по оси токов составляет порядка 3 мкА, а изменение напряжения при освещении — порядка 500 мВ. По ВАХ ячеек для всех родаминовых красителей были определены значения напряжения холостого хода (U_{xx}), ток короткого замыкания ($I_{кз}$), фактор заполнения (FF).

Названные выше параметры определяли по методике, описанной в работе [4]. Полученные значения напряжения холостого хода (U_{xx}), тока короткого замыкания ($I_{кз}$) и фактора заполнения (FF) для всех родаминовых красителей показаны в таблице 2.

Т а б л и ц а 2

Параметры ячеек Гретцеля, допированных молекулами родаминовых красителей

| Краситель | U_{xx} , мВ | $I_{кз}$, мкА/см ² | U_{max} , мВ | I_{max} , мкА/см ² | FF | η , % |
|------------------------|---------------|--------------------------------|----------------|---------------------------------|------|------------|
| Миристинат родамина бЖ | 480 | 3,3 | 260 | 1,7 | 0,3 | 0,8 |
| Пеларгонат родамина бЖ | 337 | 3,0 | 198 | 1,0 | 0,2 | 0,4 |
| Стеарат родамина бЖ | 230 | 2,1 | 140 | 0,8 | 0,2 | 0,2 |
| Адаманат родамина бЖ | 290 | 2,9 | 160 | 1,2 | 0,2 | 0,4 |
| Бугират родамина бЖ | 230 | 1,2 | 107 | 0,7 | 0,2 | 0,1 |
| Бегенат родамина бЖ | 220 | 2,0 | 150 | 1,1 | 0,2 | 0,3 |

Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что сенсбилизация наночастиц диоксида титана родаминовыми красителями приводит к явной фотовольтаической активности ячейки. Свето-

вая и темновая ВАХ ячейки нелинейные и имеют прямую и обратную ветви, аналогичны ВАХ полупроводникового прибора. По ВАХ ячеек для всех родаминовых красителей были определены значения напряжения холостого хода (U_{xx}), ток короткого замыкания ($I_{кз}$) и фактор заполнения (FF). Обнаружено, что наилучшими фотовольтаическими показателями обладает миристинат родамина бЖ.

Список литературы

- 1 Трошин П.А., Любовская Р.Н., Разумов В.Ф. Органические солнечные батареи: структура, материалы, критические параметры и перспективы развития // Российские нанотехнологии. — 2008. — Т. 3, № 5–6. — С. 56–78.
- 2 Robertson N. Optimizing Dyes for Dye-sensitized Solar Cells // *Angew. Chem. Int.* — 2006. — № 45. — P. 2338–2345.
- 3 Kalyanasundaram K., Grätzel M. Applications of functionalized transition metal complexes in photonic and optoelectronic devices // *Coordination Chemistry Reviews.* — 1998. — № 77. — P. 347–414.
- 4 Алферов Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. Тенденции и перспективы развития солнечной фотоэнергетики // Физика и техника полупроводников. — 2004. — Т. 38, № 8. — С. 937–948.

Н.Х.Ыбыраев, А.К.Аймуханов, Т.М.Сериков

Родамин бояғыштарымен сенсбилизацияланған Гретцель ұяшықтарының фотовольтаикалық қасиеттері

Берілген жұмыста родамин бояғыштарының малекулаларымен сенсбилизацияланған кең жолақты шалаөткізгішті титан диоксидінің кеуекті қабыршақтарының негізіндегі Гретцель ұяшықтарының фотовольтаикалық қасиеттерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Қарастырылып отырған жұмыста шалаөткізгіштің кеуекті қабыршақтары негізіндегі электролиттік Гретцель ұяшығының және бояғыш малекулаларының фотовольтаикалық қасиеттері бар екені дәлелденді. Фотовольтаикалық қасиеттерінің бар болу-болмауын родамин бояғыштар қатарына кіретін органикалық бояғыштар тексерілді. Ұяшықтағы токтың тығыздығы активті қабаттың жұтылу спектріне тәуелді, сондықтан күн сәулесінің спектрінің ұтымды пайдалану мақсатында бояғыштардың жұтылу спектріне жақын болу керек. Зерттелген бояғыштардың қатарында фотовольтаикалық көрсеткіштері жоғары бЖ родамин миристинатында екеніне көз жеткізілді.

N.Kh.Ibraev, A.K.Aimukhanov, T.M.Serikov

The photovoltaic properties of the Grettzel' cells sensitized with rhodamine dyes

This paper presents the results of a study Grettzel photovoltaic cell properties based on wide-gap semiconductor porous films of titanium dioxide doped with rhodamine dye molecules. Found that the electrolytic cells Grettzel based porous films semiconductor and dye molecules have clear photovoltaic properties. On photovoltaic properties tested family rhodamine dyes. The current density in the cell depends on the absorption spectrum of the active layer, so the absorption should be in optimal spectral range to ensure maximum utilization of the solar spectrum. It was found that the best photovoltaic performance has miristinat rhodamine 6G.

References

- 1 Troshin P.A., Lubovskaya R.N., Razumov V.F. *Russian nanotechnologies*, 2008, 3, 5–6, p. 56–78.
- 2 Robertson N. *Angew. Chem. Int.*, 2006, 45, p. 2338–2345.
- 3 Kalyanasundaram K., Grätzel M. *Coordination Chemistry Reviews*, 1998, 77, p. 347–414.
- 4 Alferov G.I., Andreev V.M., Rumyantseva V.D. *Physics and technique semiconductors*, 2004, 38, 8, p. 937–948.

ЖЫЛУ ФИЗИКАСЫ ЖӘНЕ ТЕОРИЯЛЫҚ ЖЫЛУ ТЕХНИКАСЫ ТЕПЛОФИЗИКА И ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ТЕПЛОТЕХНИКА

УДК 621.7

К.Кусаиынов, М.С.Дуйсенбаева, Г.К.Алпысова, Е.Танашев, А.Толынбеков

*Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: M_o_l_d_i_r_89@mail.ru)*

Влияние подводного искрового разряда на структуру шубаркульских углей

Промышленные запасы углей составляют 664 млн т. Наличие долговременного запаса угля актуализирует проблему эффективной переработки шламов с переводом в жидкое состояние. В статье предложено использование электрогидравлического эффекта для переработки шламов каменных углей. Практика показывает, что применение электрогидравлической технологии приносит экономическую выгоду, поскольку позволяет существенно снизить вредные выбросы в окружающую среду.

Ключевые слова: электрогидроимпульсная установка, электрогидравлический эффект, шубаркульский уголь, водоугольное топливо, электроразряд.

На территории Казахстана сосредоточены огромные залежи бурых и каменных углей разной стадии метаморфизма, которые широко используются в основном для получения кокса, применяемого в металлургической промышленности, и для энергетических целей. Но эти запасы углей в настоящее время используются недостаточно эффективно — только основная масса угля, а шламы углей не перерабатываются. Развитие технологии ставит перед учеными вопрос о разработке оптимальных технологий переработки и использования углей. Принципиально важным решением для угольной энергетики может стать переход от прямого сжигания угля к приготовлению из углей различных качеств, в том числе и из отходов углеобогащения, водоугольного топлива [1].

Водоугольное топливо (ВУТ) — это смесь (суспензия) из мелкоизмельченного угля и воды. В ряде случаев в состав суспензии могут быть включены различные добавки, изменяющие стабильность, вязкость или иные свойства ВУТ. ВУТ может использоваться в качестве замены мазута, газа и угля. Основные преимущества ВУТ — снижение топливных затрат, по сравнению с мазутом и газом, а также снижение вредных выбросов, прежде всего NO_x , и технологические удобства использования угля в жидкой форме. Нами предложена электрогидроимпульсная технология переработки углей, в которой с помощью электроразряда в жидкости можно измельчить уголь до определенной фракции [2, 3].

Сущность этого способа состоит в том, что внутри объема жидкости в открытом или закрытом сосуде специально формируется импульсный электрический разряд (искровой, кистевой и др.). В зоне образования возникают сверхвысокие гидравлические давления, которые способны совершать полезную механическую работу и сопровождаются комплексом физических и химических явлений [4].

В лаборатории физики импульсных явлений в гетерогенных средах кафедры инженерной теплофизики им. профессора Ж.С.Акылбаева Карагандинского государственного университета им. Е.А.Букетова была подготовлена электрогидравлическая установка для обработки угля. Электрогидроимпульсная установка выполнена в виде конструктивных агрегатов, состоящих из генератора импульсных напряжений, управляемого разрядника, ячейки, блока поджига, делителя напряжения, токового шунта и пульта управления. Схема электрогидроимпульсной установки приведена на рисунке 1.

Экспериментальный стенд работает следующим образом. После включения пульта управления подается управляющее напряжение, генератор вырабатывает высоковольтные импульсы напряжения

заданной энергии, которые через управляемый разрядник и высоковольтные линии передаются на электродную систему рабочей ячейки участка с объектом исследования [5].

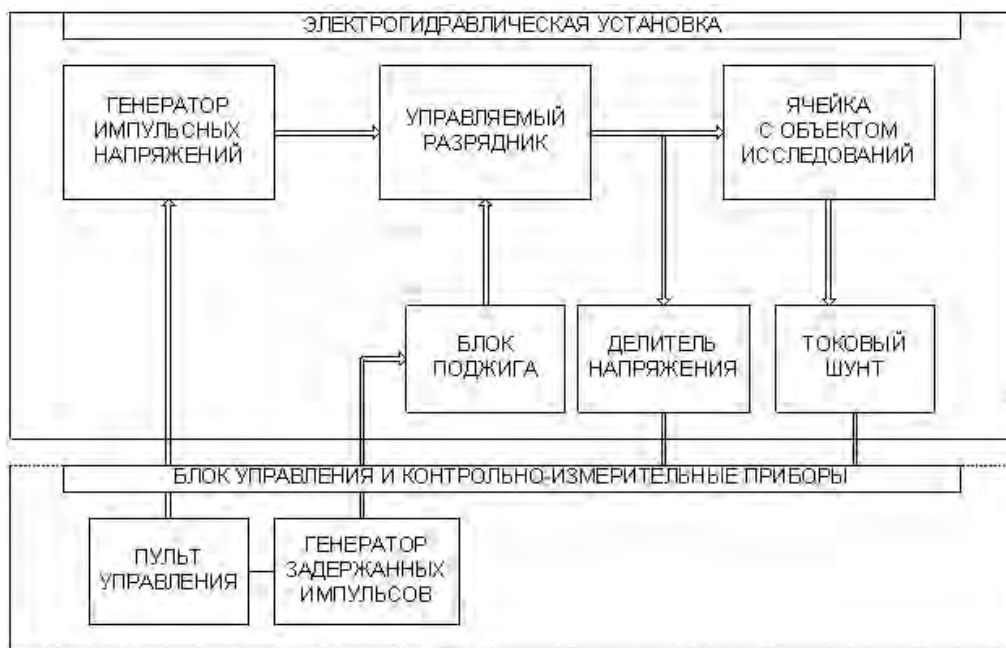
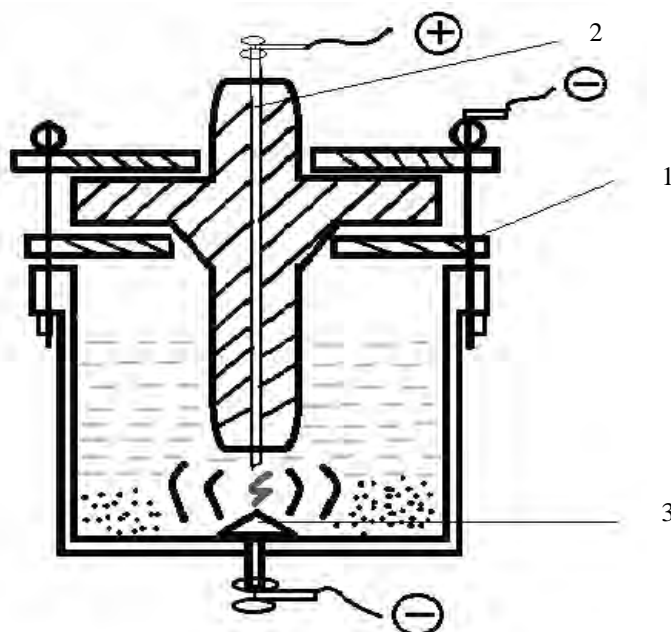


Рисунок 1. Блок-схема электрогидроимпульсной установки

Для проведения электрогидроимпульсной обработки угля была подготовлена рабочая ячейка электрогидравлической установки. Внутри ячейки установлены два измерительных электрода — один из них неподвижный, а второй был закреплен на микрометрический винт для регулировки расстояния между электродами. На рисунке 2 показан общий вид ячейки для дробления угля [6].



1 — крышка рабочей ячейки; 2 — электрод положительной полярности;
3 — металлический стержень отрицательной полярности

Рисунок 2. Рабочая ячейка для дробления

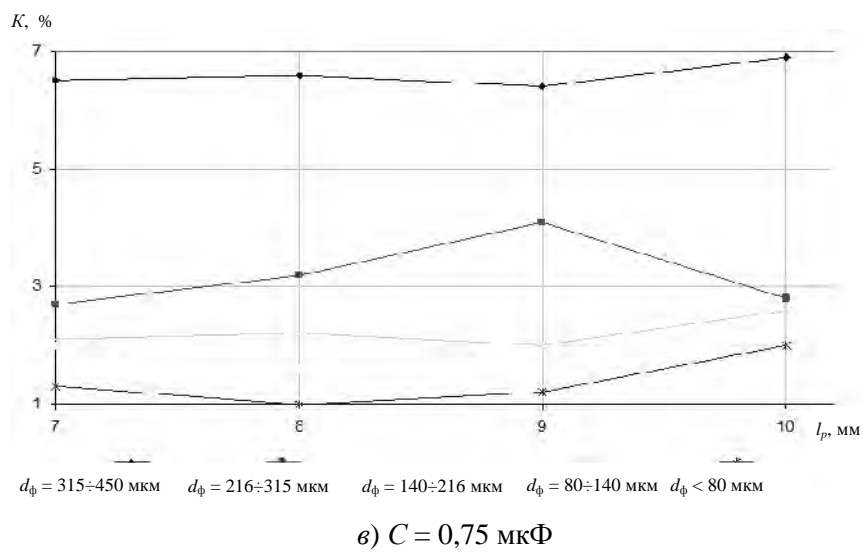
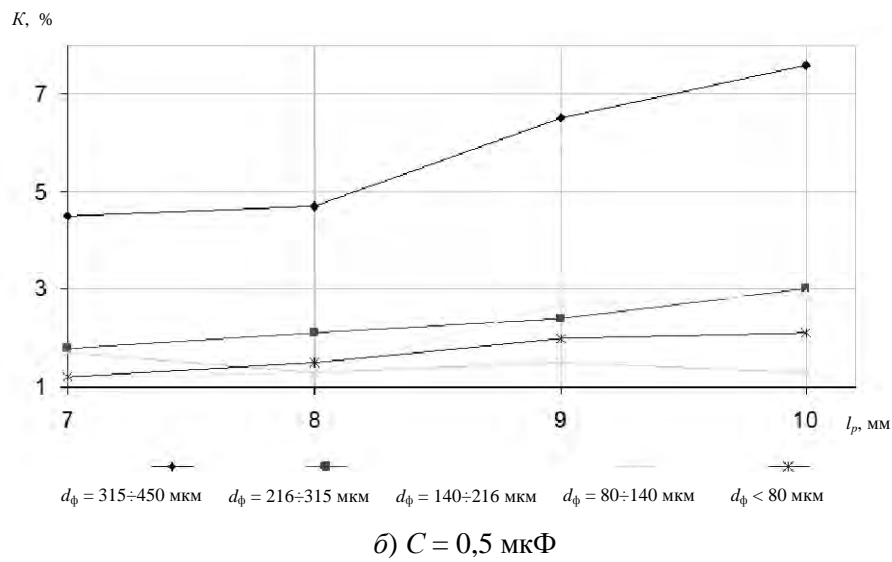
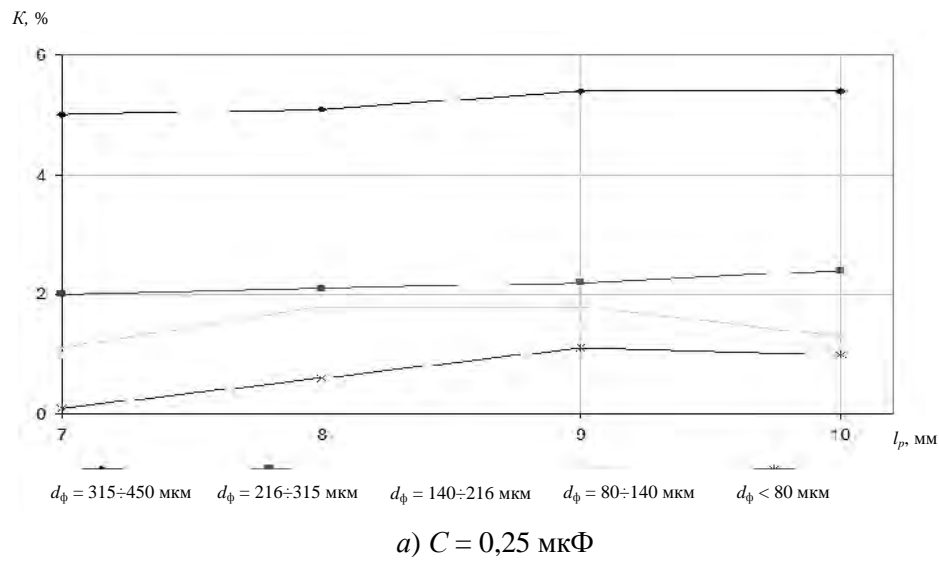


Рисунок 3. Графики зависимости степени измельчения от межэлектродного расстояния при разной емкости конденсаторов

В проведенных экспериментах определялись оптимальные параметры дробления угля при различных электрических параметрах электрогидроимпульсной установки. На рисунке 3 показаны графики зависимости степени измельчения от межэлектродного расстояния при разных емкостях конденсатора. Время обработки угля $t = 3$ мин, диаметр фракции угля $d = 8$ мм, расстояние управляемого разрядника $l_p = 7$ мм.

На рисунке 3а размер крупности угля $d = 8$ мм, расстояние между электродами изменяли — $l_p = 7, 8, 9, 10$ мм. Из графика видно, что при межэлектродном расстоянии $l_p = 7$ мм и при емкости конденсатора $C = 0,25$ мкФ количество частиц диаметром $d_{\phi} < 80$ мкм составляет 0,1 %, а при межэлектродном расстоянии $l_p = 10$ мм количество частиц диаметром $d_{\phi} < 80$ мкм составляет 1 %.

На рисунке 3б при межэлектродном расстоянии $l_p = 7$ мм и при емкости конденсатора $C = 0,5$ мкФ количество частиц диаметром $d_{\phi} < 80$ мкм составляет 1,2 %, а при межэлектродном расстоянии $l_p = 10$ мм — 2,1 %. При емкости конденсатора $C = 0,75$ мкФ и при межэлектродном расстоянии $l_p = 7$ мм (рис. 3в) количество частиц диаметром $d_{\phi} < 80$ мкм составляет 1,3 %, а при межэлектродном расстоянии $l_p = 10$ мм — 2 %.

На графиках видно, что при большем расстоянии между электродами количество фракций мелких размеров ощутимо выросло. Это можно объяснить тем, что с увеличением межэлектродного расстояния энергия электрогидравлического воздействия возрастает и, следовательно, возрастает эффективность дробления. Анализируя полученные результаты, можно сделать следующий вывод: оптимальными параметрами для измельчения угля до фракций $d < 80$ мкм являются межэлектродное расстояние $l_p = 10$ мм, рабочее напряжение на накопителе энергии в пределах 30 кВ и емкости батареи конденсаторов 0,75 мкФ.

Список литературы

- 1 http://www.enrc.com/files/16Feb09_AcquisitionShubarkolKomirRUS.pdf
- 2 Фальбе Ю.М. Химические вещества из угля. — М.: Химия, 1984.
- 3 Кузнецов Б.Н. Катализ химических превращений угля и биомассы. — Новосибирск: Наука, 1990.
- 4 Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности. — Л.: Машиностроение, 1986. — 253 с.
- 5 Кусаиынов К., Алпысова Г.К., Дуйсенбаева М.С. Электрогидроимпульсная обработка шубаркольского угля // Вестник Карагандинского ун-та. Сер. Физика. — 2012. — № 2(66). — С. 27–30.
- 6 Кусаиынов К., Алпысова Г.К., Дуйсенбаева М.С. Шұбаркөл көмірінің беттік құрылымына соққы толқындарының әсері // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 8-й Междунар. науч. конф., посвящ. 40-летию КарГУ им. акад. Е.А.Букетова. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. — С. 495–500.

Қ.Құсайынов, М.С.Дуйсенбаева, Г.К.Алпысова, Е.Танашев, А.Толынбеков

Суасты ұшқын разрядының Шұбаркөл көмірінің құрылымына әсері

Мақала Шұбаркөл көмірінің қалдықтарын электрогидравликалық технологиямен тиімді өңдеуге арналған. Кен орынының өндірістік қоры 664 млн т құрайды. Шұбаркөл кен орынының қорының мол болуына байланысты, көмір қалдықтарын тиімді өңдеп, сұйық отын алу маңызды болып отыр. Көмір қалдықтарын тиімді өңдеу үшін электрогидравликалық эффекті әдісі ұсынылып отыр. Электрогидравликалық әдісті қолдану экономикалық жағынан тиімді және қоршаған ортаға шығаратын зиянды заттарды азайтуға мүмкіндік береді.

K.Kusaiynov, M.S.Duysenbaeva, G.K.Alpysova, E.Tanashev, A.Tolynbekov

The influence of underwater spark discharge on the structure of Shubarkul coal

The technology is intended for creation of effective technology of processing of slimes of coals of the Shubarkulsky field. Industrial stocks of coals make 664 million tons. With existence of such long-term stock of the coal, the problem of effective processing of slimes with transfer to a liquid state which in big quantity are formed at industrial development of bulk of coals is actual. By us it is offered electrohydraulic effect for processing of slimes of coals. Application of electric hydraulic technique brings substantial economic benefits

and contributes to significantly reduce harmful emissions into the environment or recycle harmful waste products.

References

- 1 [http://www.enrc.com/files/16Feb09_Acquisition Shubarkol Komir RUS.pdf](http://www.enrc.com/files/16Feb09_Acquisition%20Shubarkol%20Komir%20RUS.pdf)
- 2 Falbe Yu.M. *Chemicals from coal*, Moscow: Khimiya, 1984.
- 3 Kuznetsov B.N. *Catalysis of chemical reactions of coal and biomass*, Novosibirsk: Nauka, 1990.
- 4 Yutkin L.A. *Electro-hydraulic effect and its application in industry*, Leningrad: Mashinostroenie, 1986, 253 p.
- 5 Kusaiynov K., Alpysova G.K., Duisenbayeva M.S. *Vestnik Karagandinskogo universiteta, Seriya Fizika* [Bulletin of Karaganda University, Series Physics], 2012, 2(66), p. 27–30.
- 6 Kusaiynov K., Alpysova G.K., Duisenbayeva M.S. *Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment: Materialy 8-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 40-letiyu KarGU imeni akademika E.A.Buketova* [Chaos and structures in nonlinear systems. Theory and experiment. Proceedings of the 8th International Scientific Conference dedicated to the 40th anniversary of KSU named after Academician E.A.Buketov], Karaganda: KarSU Publ., 2012, p. 495–500.

Б.Р.Нүсіпбеков, А.Қ.Хасенов, Г.Қ.Ахметова, Ә.С.Дүйсембекова, А.Ж.Бейсенбек

*Е.А.Бөкетов атындағы Қарағанды мемлекеттік университеті
(E-mail: ayanbergen@mail.ru)*

Электрондық өндірісте қолданылатын шикізатты өңдеу технологиясы

Мақала ғылым мен техника салаларын дамытуда маңызды материалды өңдеу жұмыстарына арналды. Кремнийдің түрлері мен қолдану аймағы қарастырылды. Табиғи минералдар мен техногендік шикізаттарды бөлшектеу мен ұнтақтаудың тиімді әдістерінің бірі — электроимпульстік технология. Ғылыми-зерттеу жұмыстары кезінде өнімді өңдеудің тиімді параметрлері келтірілді. Ұсынылып отырған технология арқылы металлургиялық кремнийді ұнтақтау жұмыстары кезінде алынған мәліметтер келешекте өндіріс орындарында қолданыс табуы мүмкін.

Кілтті сөздер: электроимпульсті технология, металлургиялық кремний, электрондық өндірісте қолданылатын шикізат, ұнтақтау дәрежесі, көлемдік коэффициенті, абразивті материал.

Осы уақытта қазіргі заманғы техника салаларын дамытуда ұнтақ және композициялық материалдардың рөлі үздіксіз өсуде. Бұл материалдардың арнайы ерекшеліктерін қамтамасыз етудің авиация және зымыран техникасын, химия, машина жасау, машиналар мен агрегаттарын пайдалану мүмкін емес. Құрастырма материалдарының қызмет мерзімін ұлғайтуға мүмкіндік беретін аспаптар мен тетіктердің жауапты бөлшектерінің ыстық және коррозиялық тұрақтылығын ұлғайтуға мүмкіндік беретін технологияның болмауы отандық машина жасау, энергетика, өңдеуші және ұқсатушы өнеркәсібі, жұмыстың жоғары ресурсымен сенімді техниканы құруда мұнай, химия, газ, сондай-ақ әр түрлі жөндеу өндірістерінде қатты қажеттілікті тудырды.

Сонымен қатар жартылайөткізгіш материалдарға сұраныстың жоғары қарқынмен өсуіне орай электронды өнеркәсіпте пайдаланылатын жартылайөткізгіш кремнийлер мен басқа да материалдар тапшы. Сол себепті қажетті технологияны дамыту және жартылайөткізгіш материалдарының ғылымды қажетсінетін өндірісін құру елімізді энергияның балама көзі ретіндегі микроэлектроника бұйымдары мен фотогальваникалық жүйелерді өндіруде жоғары дамыған елдердің әлеуетті серіктестерінің қатарына алып шығады.

Соңғы жылдарда ғылым мен техниканың әр түрлі салаларын дамытуда кремний маңызды орын алуда. Кремний карбиді (карборунд) — сұйық шыны мен металдық кремнийі бар карбид қоспасынан жасалатын өте қатты абразивті материал, кесу мен өңдеуге, сонымен қатар кемтіктерді тегістеуге, электр пештердегі силиттік қыздырғыштарды жасауға қолданылады. Темірде кремний бірқалыпты температурада 14 %-ға дейін ериді. Кремний легирленетін элемент ретінде алюминий және мыс балқымаларында, олардың беріктілігі мен коррозияны тұрақтылығын жоғарлату үшін қолданылады. Көбінесе болатқа кремний серпімділік пен аққыштық шегін арттыру үшін қосылады, бұл болаттан серіппе жасауға мүмкіндік береді.

Микроэлектрондық өндірістің көптеген бұйымдары үшін шикізат ретінде электрондық кремний қолданылады. Электрондық кремний металлургиялық кремнийден өңделіп алынады. Монокристалды кремний жартылайөткізгіш аспаптар үшін негізгі материал, нанокристалды кремний наноэлектроника элементтері ретінде, поликристалды кремний интегралды сұлбалардағы резисторлар және өткізгіштер, микрокристалды кремний күн батареялары, фотосенсорлар, транзисторларда негізгі элемент ретінде қолданыс табуда [1, 2].

Түрлі қосылыстардың құймаларын алуда кремний ұнтақ түрінде қолданылады. Бүгінгі таңда кремний ұнтағын алуда әр түрлі бөлшектеу мен ұнтақтау тәсілдері қолданылады (механикалық, пневмомеханикалық, аэродинамикалық, лазерлік, ультрадыбыстық және т.б.) [3].

Қазіргі кезде тау жыныстары мен кендерді бөлшектеу мен ұнтақтау облысындағы негізгі бағыттары келесілер: материалдарды бұзудың механикалық тәсілдеріне негізделетін техника мен технологиялық үрдістерді жетілдіру; бұзудың принципіалды жаңа тәсілдерін іздеу, зерттеу және олардың негізінде техника мен технологияның тиімді түрлерін жасап шығару.

Бірінші бағыт бұзудың ПӘК-ін және меншікті өнімділігін жоғарлату мақсатына негізделеді және бұл берік, сапалы, басқа құрылымды шаралардың пайдаланылуы негізінде жұмыс тәртібінің қарқындылығы, қондырғылардың өлшемдерін үлкейту, жалпы және меншікті қуат есебінде жоғары өнімділікті машина жасау мен бар машиналардың жетілдіруіне алып келеді.

Бұзудың осы принциптері негізінде жұмыс істейтін қондырғы мен механикалық тәсілдер теориялық жағынан жеткілікті түрде зерттелген және құрылымды құрастырылған, сондықтан мұнда жақсы одан әрі сапалы нәтижелер күтілмейді. Бөлшектеу мен ұнтақтаудың технологиялық дамуы материалдарды бұзудың механикалық тәсілдерінде негізделетін техника мен технологиялық үрдістерді жетілдіру, бұзудың принципіалды жаңа тәсілдерін іздеу, зерттеу және олардың негізінде техника мен технологияның тиімді түрлерін жасап шығару бағыттарына сай болуы қажет.

Бөлшектеу мен ұнтақтаудың механикалық тәсілдері және оларға негізделген техника мен технология көптеген маңызды кемшіліктерге ие болып келеді:

- берілетін электр энергиясы редукторларда механикалық энергияға көп трансформацияланады және тасымалдану кезінде энергияның маңызды бөлігі ұсақтаушы денелер арасында өзара соқтығысу кезінде жоғалады;
- бөлшектеу өнімдері футеровканың ұнтақтау денелерінің бөлшектерінің металдық қоспаларымен ластанады, бұл қосымша тазалауды қажет етеді;
- бөлшектеу мен ұнтақтаудың экономикалық көрсеткіштері тау жыныстары мен кендердің бұзылуы мен қаттылығына тәуелді;
- бөлшектеу қондырғыларының салыстырмалы бағасы мен күрделілігі, жұмыс бөлшектерінің тозуға төтеп бере алмауы негізінде пайдалану кезіндегі жөндеу аралық кезеңнің аздығы.

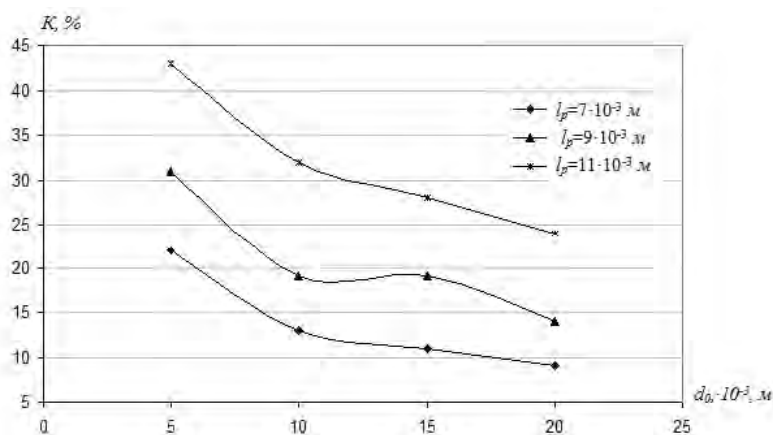
Сондықтан осы салада қолданбалы зерттеулер жүргізу мақсатында электроимпульсті технологияны қолдана отырып, металлургиялық кремнийді ұнтақтау жұмыстары орындалды.

Электроимпульсті технология энергетикалық, металлургиялық өндірістерде, коммуналдық-шаруашылық, машина құрастыруда, жылу алмастыру құбырларында пайда болған қақтарды тазартуда, бағалы заттар алу үшін өндірістерден шыққан қалдықтарды өңдеуде, минералды заттарды бөлшектеуде қолданылады [4, 5].

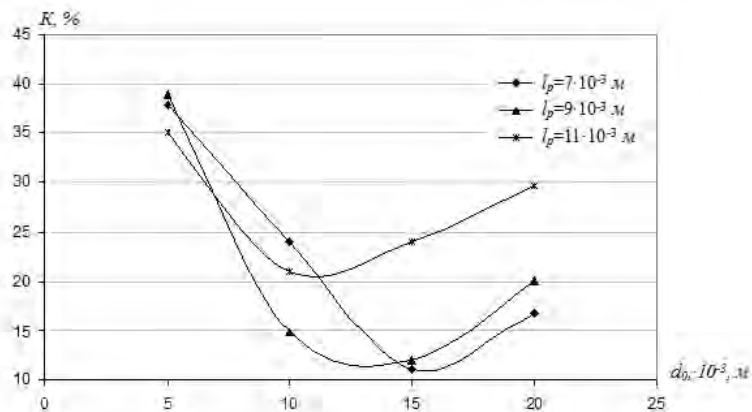
Ұсынылып отырған технологияның механикалық бөлшектегіштерге қарағанда бірден-бір ерекшелігі — жұмыс арнасының күрделі қозғалатын бөліктерден құралмай, қарапайым құрылымдық болаттан дайындалуына байланысты жұмыс кезінде қондырғының жұмыс бөлігі ұзақ уақыт пайдалануға мүмкіндік беруінде және өнімді өңдеу жұмыстары сұйық ортада орындалатындықтан, өңделуші өнім құрамындағы әр түрлі шаң-тозанды заттар қоршаған ортаға тарамайды. Бұл тәжірибеге дейінгі жұмыстарда осы қондырғыда кремнийді және оның басқа түрлерін бөлшектеу мен ұсақтау жұмыстары жүргізілмеген.

Электроимпульсті қондырғыда фракция диаметрі $d_0 = (5, 10, 15, 20) \cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремний разряд энергиясының $W = 100 \div 196$ Дж конденсатор батареяларының сыйымдылығының ($C = 0,25; 0,5; 0,75$ мкФ), разряд аралығының ара қашықтығының ($l_p = 7, 8, 9, 10, 11$ мм), коммутирлеуші құрылғыдағы кернеудің ($U = 20 \div 28$ кВ) әр түрлі мәндерінде өңделді (1-сур.).

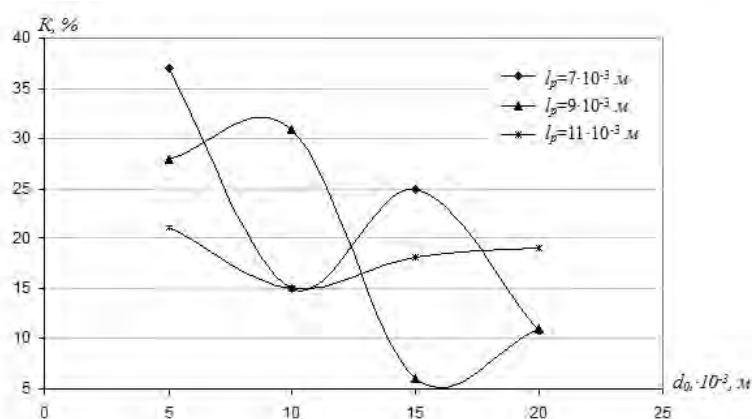
Металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәрежесінің ($K, \%$) өңделмеген өнім диаметріне (d_0) тәуелділіктері разряд аралығының ара қашықтығын (7, 8, 9, 10, 11) $\cdot 10^{-3}$ м өзгерте отырып, фракция диаметрі (5, 10, 15, 20) $\cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийді а) $1 \cdot 10^{-3}$ м-ге, ә) $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м-ге, б) $(4 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м-ге және фракция диаметрі (10, 15, 20) $\cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийдің в) $(6 \div 7) \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсақтағанда алынған нәтижелер бойынша салынды.



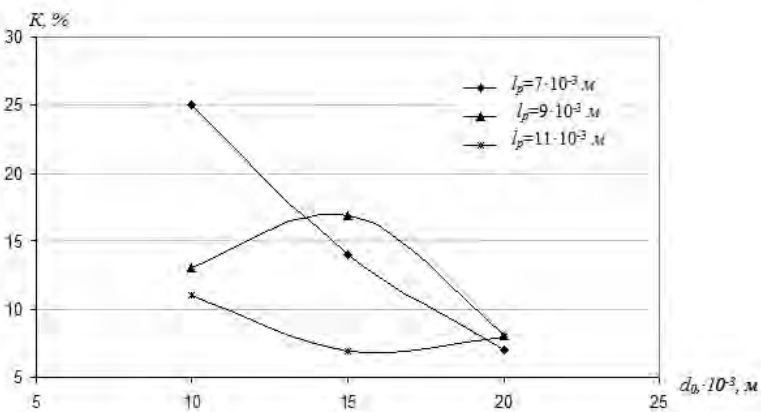
а) $d \leq 1 \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсақталған металлургиялық кремний



а) $(2 \div 3) \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсақталған металлургиялық кремний



б) $(4 \div 5) \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсақталған металлургиялық кремний



в) $(6 \div 7) \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсақталған металлургиялық кремний

1-сурет. Металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәрежесінің өңделмеген өнім диаметріне тәуелділіктері

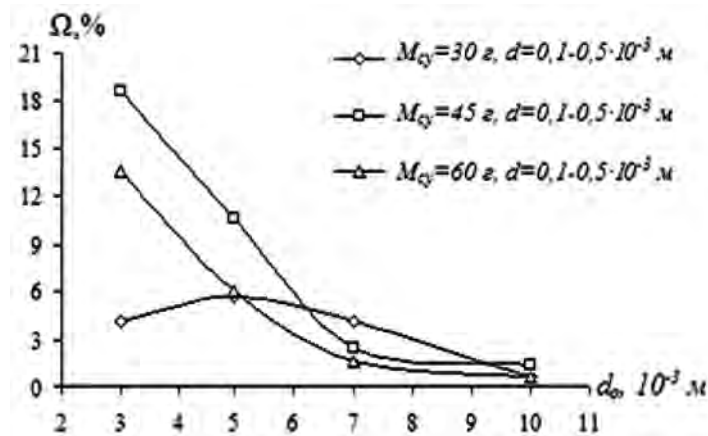
Келтірілген тәуелділіктерден разряд аралығының ара қашықтығын арттырған сайын өңделетін өнімнің ұсақталуы арта түсетінін байқаймыз: $(7 \div 11) \cdot 10^{-3}$ м өзгертілгенде диаметрі $1 \cdot 10^{-3}$ м-ге дейін ұсатылған металлургиялық кремний үшін фракция диаметрі $5 \cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәрежесі (22÷43) % аралығын, фракция диаметрі $10 \cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәрежесі (13÷32) %, фракция диаметрі $15 \cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәре-

жесі (11÷28) %, фракция диаметрі $20 \cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийдің ұсақталу дәрежесі (9÷24) % - ды құрады (1-сур., а).

Сонымен қатар металлургиялық кремнийді электроимпульстік технология арқылы ұсақтау жұмыстарында импульстар жиілігінің тиімді мәні анықталды. Импульстар жиілігінің әр түрлі мәндеріне қатысты зерттеулер разряд аралығының ара қашықтығы $11 \cdot 10^{-3}$ м конденсатор батареясының сыйымдылығы $0,75 \cdot 10^{-6}$ Ф коммутирлеуші құрылғыдағы кернеу $23 \cdot 10^3$ В кезінде орындалды.

Келесі жұмыстарда ұсақталған металлургиялық кремнийдің көлемдік коэффициентінің өңделетін өнім диаметріне тәуелділігі зерттелді (2-сур.).

Металлургиялық кремнийдің көлемдік коэффициентінің (Ω , %) өңделетін өнім диаметріне (d_0 , м) тәуелділігі фракция диаметрлері (3, 5, 7, 10) $\cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийді разряд аралық ара қашықтығының ($l_p = 10 \cdot 10^{-3}$ м), конденсатор батареясының сыйымдылығының ($C = 0,75 \cdot 10^{-6}$ Ф), және разряд энергиясының ($W = 273$ Дж) тұрақты мәндерінде $0,1 \div 0,5 \cdot 10^{-3}$ м ұсақталғанда алынды.



2-сурет. Бөлшектенген металлургиялық кремнийдің көлемдік коэффициентінің өңделетін өнім диаметріне тәуелділігі

Тәжірибелік зерттеулер жұмыс ұяшығындағы өңделуге дейінгі өнімнің көлемін өзгерте отырып, сұйықты үш түрлі деңгейде құйғанда жүргізілді. Бұл тәуелділікте жұмыс ұяшығына фракция диаметрлері (3, 5, 7, 10) $\cdot 10^{-3}$ м металлургиялық кремнийді салып, өңделетін өнімнің бетіменен бірдей деңгейде құйылатын судың мөлшерін бір жарым есеге арттыру арқылы өңдеу жұмыстарын жүргізгенде бөлшектенген металлургиялық кремнийдің көлемдік коэффициенті артатындығы байқалды.

Электроимпульстік технология арқылы металлургиялық кремнийді ұнтақтаудың тиімді параметрлері анықталды және өнімді өңдеу жұмыстары сұйық ортада орындалатындықтан, жұмыс сұйығының қажетті мөлшеріне сәйкес зерттеу нәтижелері ұсынылды. Зерттеулер кезінде алынған мәліметтер келешекте өндіріс орындарында металлургиялық кремнийді электроимпульсті технологиямен өңдегенде қолданыс табуы мүмкін.

Әдебиеттер тізімі

- 1 Самсонов Г.В. Силициды и их использование в технике. — Киев: Изд-во АН УССР, 1959. — 204 с.
- 2 Немчинова Н.В., Бельский С.С., Красин Б.А. Высокоочищенный металлургический кремний как базовый элемент для солнечной энергетики // Успехи современного естествознания. — 2006. — № 4. — С. 56–57.
- 3 Катков О.М. Выплавка технического кремния: Учебник. — Иркутск: Изд-во ИПУ, 1997. — 243 с.
- 4 Юткин Л.А. Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности: Учебник. — Л.: Машиностроение, 1986. — 253 с.
- 5 Гулый Г.А. Научные основы разрядно-импульсных технологий: Учебник. — Киев: Наук. думка, 1990. — 280 с.

Б.Р.Нусупбеков, А.К.Хасенов, Г.К.Ахметова, А.С.Дюсембекова, А.Ж.Бейсенбек

Технология обработки сырья для электронной промышленности

Статья посвящена проблеме обработки ценного материала в развитии отрасли науки и техники. Рассмотрены некоторые виды кремния и его применение. Показано, что электроимпульсная технология является одним из приемлемых способов дробления и измельчения природных минералов и техногенного сырья. Авторами представлены оптимальные параметры обработки продукта. Сведения, полученные при измельчении металлургического кремния с помощью предлагаемой технологии, в будущем могут быть применены в производстве.

B.R.Nusupbekov, A.K.Khasenov, G.K.Akhmetova, A.S.Dyusembekova, A.Zh.Beysenbek

Technology of processing of raw materials for electronic industry

Article is devoted for processing of valuable material in development of a branch of science and technology. Some types of silicium and it's application are considered. The electroimpulse technology is one of acceptable methods of crushing and milling of natural minerals and a technogenic raw materials. In research work optimal processing parameters of a product are presented. Information obtained from the milling of metallurgical silicium with help of offered technology in the future can be applied in production.

References

- 1 Samsonov G.V. *Silitsidy i ikh ispol'zovanie v tekhnike* [Silicides and their use in engineering], Kiev: Ukr. SA Publ., 1959, 204 p.
- 2 Nemchinova N.V., Belsky S.S., Krasin B.A. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya* [Success of modern natural science], 2006, 4, p. 56–57.
- 3 Katkov O.M. *Vyplavka tekhnicheskogo kremniya* [Smelting of silicon], Irkutsk: IPU Publ., 1997, 243 p.
- 4 Yutkin L.A. *Elektrogidravlicheskiy effekt i ego primeneniye v promyshlennosti* [Electrohydraulic effect and its application in industry], Leningrad: Mashinostroeniye, Leningradskoye otdeleniye, 1986, 253 p.
- 5 Guly G.A. *Nauchnye osnovy razryadno-impul'snykh tekhnologiy* [Scientific basis of the discharge-pulse technology], Kiev: Naukova dumka, 1990, 280 p.

УДК 621.391.63

Н.И.Горлов¹, А.Д.Мехтиев², В.И.Эйрих², В.В.Югай², А.А.Кшалова²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия;

²Карагандинский государственный технический университет

(E-mail: barton.kz@mail.ru)

Задачи мониторинга волоконно-оптических линий передачи

В статье рассмотрены особенности современных волоконно-оптических линий передачи. Даны практические примеры использования автоматизированных систем администрирования волоконно-оптических кабелей, включающих систему удаленного контроля оптических волокон (RFTS — Remote Fiber Test System). Приведены данные систем, которые одновременно решают задачи документирования волоконно-оптического кабельного хозяйства, оперативного обнаружения и локализации повреждения волоконно-оптических кабелей, прогнозирования повреждения оптических волокон на основе сравнения накопленной в процессе тестирования информации, отображения волоконно-оптической сети на электронную географическую карту местности. Проанализированы вопросы мониторинга трактов систем волнового уплотнения. Предложен пример наиболее распространенного способа контроля состояния системы.

Ключевые слова: мониторинг, система удаленного контроля, неисправности ВОЛС, системы удаленного контроля.

Согласно статистике объем передаваемой в мире информации и оказываемых услуг связи увеличивается по экспоненциальному закону. При этом реальный спрос на услуги связи постоянно превышает прогнозируемый. Очевидно, что сложившаяся ситуация эффективно стимулирует исследования и разработки по совершенствованию систем связи и телекоммуникаций, приводя к появлению новых технологий, направленных на обеспечение возможности передачи больших объемов различной информации с более высоким качеством. Одной из таких технологий, наиболее перспективной в аспекте обеспечения высокой пропускной способности, является передача информации в виде оптических сигналов по оптическому волокну.

Постоянный рост потребности в широкой полосе пропускания каналов связи привел к значительному росту объемов прокладки волоконно-оптических кабелей (ВОК) по всему миру. Данное обстоятельство выдвигает на ведущие позиции задачу централизованного контроля за сетевым волоконно-оптическим кабельным хозяйством в целях его документирования, своевременного обнаружения и оперативного устранения повреждений, возникающих в волоконно-оптических линиях связи. Простои линий связи сокращают доходы операторов, ухудшают их репутацию, уменьшают приток инвестиций, снижают качество обслуживания. В связи с этим в последнее время операторы связи начинают инвестировать немалые средства в развитие инфраструктуры своих волоконно-оптических сетей с акцентом на внедрение и совершенствование систем управления и автоматического мониторинга состояния линий и каналов связи.

Независимо от метода контроля оптических волокон такие системы должны обеспечивать:

- дистанционный контроль пассивных и активных волокон оптических кабелей;
- достоверное и своевременное документирование и составление отчетности;
- автоматическое обнаружение неисправностей волоконно-оптических линий и каналов связи с указанием их точного местоположения;
- контроль и управление процессом оповещения о повреждении оптических кабелей;

- проведение измерений параметров оптических волокон в ручном режиме;
- прогнозирование изменений параметров оптических кабелей.

Наиболее эффективно эти задачи решают автоматизированные системы администрирования волоконно-оптических кабелей, включающие систему удаленного контроля оптических волокон (RFTS — Remote Fiber Test System), программу привязки топологии сети к географической карте местности, а также базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля. Эти системы одновременно решают задачи документирования волоконно-оптического кабельного хозяйства, оперативного обнаружения и локализации повреждения волоконно-оптических кабелей, прогнозирования повреждения оптических волокон на основе сравнения накопленной в процессе тестирования информации, отображения волоконно-оптической сети на электронную географическую карту местности.

Особенности современных волоконно-оптических линий передачи (ВОЛП)

Интенсивное развитие волоконно-оптических линий передачи, высокая конкуренция операторов связи и высокая стоимость передаваемых по линиям связи информационных ресурсов выдвигают на ведущие позиции задачу централизованного контроля за сетевым волоконно-оптическим кабельным хозяйством с целью его документирования, своевременного обнаружения и скорейшего устранения повреждений, возникающих в ВОЛП.

Как известно, в волоконно-оптических системах передачи наибольшие потери времени на поиск и локализацию неисправностей, обуславливающих перерывы связи, имеют место при обрывах и нарушениях коммутации оптических кабелей. В большинстве случаев это связано с необходимостью проведения измерений на месте повреждения, что, в свою очередь, требует увеличения числа бригад для обслуживания кабельного хозяйства. Однако, помимо данного вида неисправностей линий связи, очень часто имеют место нарушения, вызванные изменением параметров оптического волокна с течением времени. Так, намокание кабеля, механические напряжения, вызванные, например, его провисанием, а также наличие неоднородностей волокна приводят к временным изменениям параметров оптических волокон и, как следствие, к непредвиденному изменению качества связи. Как правило, необратимые процессы деградации волокна определить достаточно сложно, так как для этого необходимо располагать статистическими данными, требующими проведения большого числа измерений, которые в полевых условиях не обеспечивают необходимой точности. Кроме этого, проведение таких измерений связано со значительными финансовыми, трудовыми и временными затратами.

Необходимо отметить, что объем передаваемой информации непрерывно увеличивается. Современная техника временного и спектрального мультиплексирования обеспечивает скорость передачи в канале более 40 Гбит/с, а число каналов передачи в одном оптическом волокне (ОВ) может достигать до 100 спектрально-мультиплексированных каналов.

Другим важнейшим следствием развития ВОЛП является увеличение длины регенерационных участков за счет развития техники широкополосных усилителей оптического сигнала.

Информационная емкость современного информационного канала на основе ВОЛП может составлять 1 Тбит/с для одного оптического волокна при расстояниях между регенераторами 200 км [1].

Совершенствование технологии увеличило срок службы ВОЛП, что при постоянном высоком приросте и минимальном выводе из эксплуатации обеспечило непрерывный количественный их рост [1].

Вместе с тем последовательные простои линий связи сокращают доходы операторов, ухудшают их репутацию, уменьшают приток инвестиций, снижают показатели качества обслуживания. В связи с этим в последнее время операторы связи начинают инвестировать немалые средства в развитие инфраструктуры своих волоконно-оптических сетей с акцентом на внедрение и совершенствование систем управления и автоматического мониторинга состояния линий и каналов связи.

Суммируя, отметим следующие особенности современного состояния ВОЛП:

- наблюдается значительный рост числа функционирующих ВОЛП;
- усложняется топология волоконно-оптических сетей;
- информационная емкость ВОЛП непрерывно увеличивается;
- увеличиваются доля информации и значимость трафика, передаваемых по ВОЛП;
- растет цена простоя ВОЛП при авариях.

ВОЛП становятся всеобъемлющими, все более сложными, увеличивается значимость этих систем. Поэтому повышение их надежности приобретает все более важное значение.

Все преимущества, которые дают волоконно-оптические системы передачи информации, можно реализовать лишь при условии строгого соблюдения технологии монтажа волоконно-оптического тракта и контроля параметров в процессе эксплуатации.

Основные задачи мониторинга

Независимо от метода контроля оптических волокон, система мониторинга должна обеспечивать:

- дистанционный контроль пассивных и активных волокон оптических кабелей;
- точное и своевременное документирование и составление отчетности;
- автоматическое обнаружение неисправностей с указанием их точного местоположения;
- контроль и управление процессом оповещения о повреждении оптических кабелей;
- проведение измерений параметров оптических волокон в ручном режиме;
- прогнозирование изменений параметров оптических кабелей;
- возможность расширения функциональности системы при внедрении новых технологий передачи на сети связи.

Наиболее эффективно перечисленные задачи могут быть решены с помощью систем автоматического мониторинга ВОЛП, включающих систему удаленного контроля оптических волокон, программу привязки топологии сети к электронной географической карте местности, а также базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля. Дистанционный контроль оптических волокон выполняется оптическим импульсным рефлектометром, диагностирующим состояние волокна по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов. При этом системы должны позволять проводить мониторинг как свободных, так и занятых волокон. В первом случае выполняется мониторинг свободных резервных оптических волокон, по состоянию которых судят об исправности всего волоконно-оптического кабеля. Во втором случае проводится мониторинг оптических волокон, по которым передается трафик систем передачи. Для реализации данного метода тестирования используется рабочая длина волны рефлектометра, отличная от рабочей длины волны систем передачи, а в схему сети мониторинга вводится ряд пассивных оптических компонентов для мультиплексирования и разделения информационных сигналов и сигналов рефлектометра.

В более широком смысле системы мониторинга должны служить для решения задач проектирования, строительства, инсталляции, эксплуатации и восстановления ВОЛП, обеспечивая:

- при строительстве, инсталляции и восстановлении — установление соответствия параметров системы регламентируемым нормам, а при эксплуатации — повышение достоверности и скорости контроля данных параметров;
- значительное сокращение времени локализации и идентификации отклонений контролируемых параметров по сравнению с традиционными способами контроля, что позволяет своевременно обнаружить факты отказа, вандализма, несанкционированного доступа и т.д.;
- прогнозирование возможных неисправностей сети за счет систематического накопления и анализа результатов контроля во времени;
- возможность проведения испытаний системы одним пользователем, что повышает эффективность обслуживания большой сетевой зоны при меньшем количестве персонала;
- сокращение парка и унификацию КИС, необходимых для обслуживания областей (доменов) сети, что устраняет проблемы, свойственные использованию разнотипного оборудования.

Очевидно, что в полной мере данная совокупность задач может быть эффективно решена только при наличии в системе функций:

- создания физической и топологической схем;
- оптимизации на их базе архитектуры сети мониторинга;
- математического моделирования объектов контроля и использования самых передовых методов измерения, анализа, тестирования;
- алгоритмов обработки и анализа полученных результатов контроля сети телекоммуникаций (СТ) в целом.

Мониторинг трактов систем волнового уплотнения

Мониторинг трактов систем волнового уплотнения — это непрерывный контроль состояния активных каналов при помощи соответствующего набора тестов. Мониторинг ведется как для того, чтобы выявлять любые отклонения в оптических характеристиках сети, которые могут повлиять на ее работоспособность, так и для сбора статистической информации. Мониторинг включает в себя широкий спектр действий, начиная от планирования последовательности тестов и управления их проведением и заканчивая анализом полученных данных.

Мониторинг особенно важен для систем DWDM, которые очень чувствительны к таким оптическим явлениям, как дисперсия, перекрестные помехи, смещение центральной длины волны и т.д. Для оперативного выявления отклонений важнейших характеристик от заданных необходимо непрерывно их контролировать. Хорошая система мониторинга активных волокон постоянно выдает как текущие значения основных характеристик, так и статистическую информацию о состоянии системы.

Мониторинг активных волокон — не единственный способ контроля состояния системы. Для этой цели можно также использовать специально выделенный контрольный оптический канал OSC (Optical Supervisory Channel). С помощью канала OSC ведется постоянное наблюдение за работой системы и эффективностью передачи данных, выявляются различные неполадки, потери мощности и другие нарушения целостности сигнала. Канал OSC позволяет проводить все необходимые тесты непрерывно, а не по расписанию, и без отключения каналов. Чтобы гарантировать целостность канала OSC, по которому могут передаваться сигналы управления, длину волны для него обычно выбирают вне рабочего диапазона усилителей EDFA (Erbium Doped Fibre Amplifier).

При мониторинге с использованием канала OSC нет непрерывного потока сообщений и статистических данных: если система работает нормально, это и не нужно. Канал OSC используется не для того, чтобы выполнять тестирование отдельных компонентов. Это средство постоянного наблюдения за состоянием сети в целом. Использование канала OSC помогает системному контроллеру поддерживать постоянную мощность оптического сигнала и качество передачи, максимально эффективно использовать ресурсы сети. Если тестирование с помощью канала OSC выявляет отклонения в целостности сигнала, администратору сети выдается соответствующее сообщение.

В отношении канала OSC пока не существует каких-либо стандартов; на практике применяются несколько возможных подходов. В настоящее время канал OSC обычно имеет длину волны 1510 нм или 1625 нм, так как эти длины волн лежат вне рабочего диапазона усилителей EDFA и при этом достаточно близко к нему, чтобы их можно было использовать для мониторинга. Поскольку компоненты для использования на длине волны 1510 нм пока не являются широко доступными, рассматривается возможность выделения под канал OSC и других длин волн — 1480 нм или 1310 нм (в зависимости от производителя).

Для тестирования с помощью канала OSC не требуется какого-то специального тестового оборудования — используется только то оборудование, которое необходимо для измерения выбранных характеристик. Для мониторинга потерь в соединителях и местах сварки волокон можно использовать измеритель мощности, а лучше — оптический рефлектометр OTDR (Optical Time Domain Reflectometer). С помощью рефлектометра OTDR можно обнаруживать некоторые проблемы в оптическом волокне до их проявления. Определенные дефекты натяжения волокна легче обнаружить на длине волны канала OSC, а не в рабочем диапазоне усилителя EDFA. Мониторинг энергетического потенциала системы связи ведут с помощью перестраиваемого аттенюатора и тестера оптических потерь [1].

Другой подход заключается в применении для мониторинга состояния системы одного из каналов системы DWDM (Dense Wave Division Multiplexer). В отличие от метода с использованием канала OSC, этот метод чувствителен к неисправностям усилителя EDFA. Однако он соответствует стандартам SONET/SDH (Synchronous Optical Network / Synchronous Digital Hierarchy) и может использоваться для обнаружения ошибок маршрутизации и передачи. Одно из решений проблемы чувствительности к выходу из строя усилителя EDFA заключается в том, чтобы параллельно вести мониторинг спектральных характеристик еще одного или нескольких каналов. Добавление спектрального измерительного оборудования в блок дистанционного тестирования RTU (Remote Test Unit) системы дистанционного тестирования волокон RFTS (Remote Fiber Test System) позволяет в полном объеме вести мониторинг системы передачи.

Мониторинг особенно важен для систем DWDM, которые очень чувствительны к таким оптическим явлениям, как дисперсия, перекрестные помехи, смещение центральной длины волны и т.д. Для оперативного выявления отклонений важнейших характеристик от заданных необходимо непрерывно их контролировать. Хорошая система мониторинга активных волокон постоянно выдает как текущие значения основных характеристик, так и статистическую информацию о состоянии системы.

Использование в современных линиях связи технологии спектрального уплотнения каналов предъявляет новые жесткие требования к контролю оптических параметров таких систем. Отклонения от нормы центральной длины волны канала, его спектральной ширины, уровня оптической мощности или спектрального расстояния между каналами неизбежно приведет к ухудшению связи.

Как правило, ключевыми клиентами операторов связи являются крупные компании, предприятия или банки. Неустойки, выплачиваемые операторами связи своим клиентам в случае сбоев в сети, зачастую составляют сумму, равную стоимости одного рабочего дня за один час простоя сети. В силу столь значительных штрафов возникла задача обеспечить непрерывный процесс мониторинга систем связи для того, чтобы иметь возможность заблаговременно отреагировать на деградацию тех или иных параметров в волоконно-оптической системе передачи (ВОСП) и предотвратить сбой. Такие системы мониторинга уже успешно работают или активно внедряются в России.

Универсальным прибором для контроля параметров DWDM-систем передачи является анализатор оптического спектра (OSA). Как правило, самый простой OSA обладает достаточным разрешением и динамическим диапазоном, чтобы использовать его в качестве тестового прибора для DWDM-сетей. С помощью OSA можно не только зафиксировать отклонение оптических параметров и выявить, какие из спектральных каналов подвержены деградации, но и провести полное исследование возникших проблем. То есть, наряду с измерениями оптических параметров, с помощью OSA можно измерить спектры рамановского и бриллюэновского рассеяний, определить длину волны и остаточную мощность накачки оптических усилителей (EDFA), измерить шум-фактор EDFA, провести исследование четырехволнового смешения и даже определить величину поляризационно-модовой дисперсии.

Большинство крупных операторов связи имеет в своем парке измерительного оборудования OSA, которые используются службой эксплуатации во время регламентных работ для проверки оптических параметров систем или калибровки системы мониторинга. Для работы с прибором необходимо в штате службы эксплуатации иметь квалифицированных инженеров, способных провести полноценный анализ полученных результатов.

Использование DWDM-систем связи ставит новые задачи для служб эксплуатации. Для полноценного контроля работы систем со спектральным уплотнением каналов необходимо осуществлять непрерывный мониторинг оптических параметров сети. При обнаружении с помощью системы мониторинга DWDM-деградации параметров или сбоев в ВОСП служба эксплуатации с помощью анализатора оптического спектра может быстро и эффективно локализовать проблему и решить ее в короткие сроки.

Список литературы

- 1 Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И. Основные задачи мониторинга современных волоконно-оптических линий передачи // Сагиновские чтения № 4: Тр. Междунар. науч. конф. Ч. 2. — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2012. — С. 68–70.

Н.И.Горлов, А.Д.Мехтиев, В.И.Эйрих, В.В.Югай, А.А.Кшалова

Берілістің талшықты-оптикалық желілерінің мониторинг мақсаттары

Берілістің қазіргі заманғы талшықты-оптикалық желілердің мүмкіндіктері қарастырылған. Оптикалық талшықтардың (RFTS — Remote Fiber Test System) тыстағы бақылаудың жүйесінен тұратын талшықты-оптикалық кабельдердің ұйымдастырудың автоматтандырылған жүйесін қолданудың тәжірибелік мысалдары берілген. Талшықты-оптикалық кабельді шаруашылықтың, талшықты-оптикалық кабельдердің зақымдалуын жылдам табатын және оқшаулауының, тестілеу үрдісінде жиналған ақпаратты салыстыру негізінде оптикалық талшықтардың зақымдалуын болжаудың, аймақтың электронды географиялық картасында талшықты-оптикалық желіні бейнелеудің құжаттау мәселелерін бір уақытта шешетін жүйе мәліметтері келтірілген. Толқынды тығыздау жүйелерінің

тракттарының мониторинг мәселелері қарастырылған. Жүйенің жағдайын бақылаудың едәуір таралған тәсілінің мысалы келтірілген.

N.I.Gorlov, A.D.Mekhtiev, V.I.Eirikh, V.V.Yugay, A.A.Kshalova

Monitoring objectives of fiber-optic transfer lines

The features of modern fiber-optic lines are reviewed. Practical examples of implementation of automated fiber-optic cables' management systems are given, including the remote control of optical fibers (RFTS — Remote Fiber Test System). Information about systems, that simultaneously solve the problems of fiber-optic cables' management documentation, fast detection and localization of fiber-optic cables' damage, prediction of optical fibers' damage by comparing the accumulated during the testing processes information, displaying a fiber-optic network on the electronic maps is provided. Problems of monitoring of systems' tracts wave sealing are reviewed. The example of the most common way to monitor the status of the system is given.

References

- 1 Gorlov N.I., Mekhtiyev A.D., Airikh V.I. *Saginovskie chteniya № 4: Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Saginovsky readings No. 4: Works of the International scientific conference], Karaganda: KarGTU Publ., 2012, p. 68–70.

Н.И.Горлов¹, А.Д.Мехтиев², В.И.Эйрих², В.В.Югай², Э.С.Оганезов²

¹Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики, Новосибирск, Россия;

²Карагандинский государственный технический университет
(E-mail: barton.kz@mail.ru)

Сравнительный анализ и принципы построения систем мониторинга

В статье приведены основные требования, предъявляемые к системам RFTS. Выполнен сравнительный анализ и предложены принципы построения систем мониторинга на примере конфигурирования определенных узлов RTU. Рассмотрены способы получения всей или частичной информации от центрального блока управления TSC в зависимости от прав доступа. Сформулированы общие принципы построения систем мониторинга. Установлены критерии дистанционного контроля технического состояния оптических волокон. Показано, как данные системы обеспечивают автоматическое обнаружение, точную локализацию и индикацию возникшей неисправности ВОЛС на географической карте.

Ключевые слова: мониторинг, построение систем, неисправности ВОЛС, системы RFTS.

Специальные требования для систем RFTS корпоративных сетей

Компания или корпорация, устанавливающая систему RFTS, может использовать для своей корпоративной сети различные ГИС. Поэтому необходимо, чтобы система RFTS поддерживала не только свой внутренний формат электронных карт, но и все форматы, поддерживаемые основными ГИС. Следует отметить, что с практической точки зрения очень важными являются возможность автономной работы модулей и узлов системы RFTS и сохранение результатов измерений каждого волокна в собственной памяти с последующей периодической передачей информации на центральный сервер по заданной программе. Например, узел системы может запоминать по одной рефлектограмме в день за последний месяц, за последнюю неделю — по одной в час и за последние сутки — с интервалом в 10 минут. При такой схеме в любой момент можно восстановить всю динамику отказов и аварий ОК, как развивавшихся в течение долгого периода времени, так и произошедших внезапно (например, вследствие обледенения ОК в грозозащитном тросе, подвешенном на опорах воздушных линий электропередачи). Результаты измерений волокон в ОК в течение времени непосредственно перед отказом ОК являются незаменимым материалом для анализа причин возникновения отказов ОК и предотвращения подобных отказов в масштабах всей сети [2].

Существуют как общие требования к системам RFTS, так и специальные требования к системам RFTS крупных корпораций. Данные системы должны обеспечивать возможность наращивания (вместе с развитием сети) и перехода на новые методы измерений при использовании новых сетевых технологий, например, технологии плотного волнового мультиплексирования DWDM (Dense Wave Division Multiplexing), а также иметь полностью модульную архитектуру. В указанной системе должна предусматриваться возможность альтернативной передачи результатов тестирования волокон ОК по резервным каналам, например, уже существующим низкоскоростным каналам связи, а модули RTU системы должны «уметь» работать в автономном режиме, сохраняя локально результаты измерений каждого волокна и передавая информацию на центральный сервер периодически по независимым каналам связи по заранее заданной программе.

Важна возможность гибкой и экономичной организации системы RFTS для больших сетей. Поэтому предпочтительны системы, позволяющие устанавливать в узлах RTU сети как оптические рефлектометры, совмещенные с оптическими коммутаторами, так и только оптические рефлектометры или только оптические коммутаторы.

Для обслуживания большой сети требуется значительное количество персонала. Поэтому важна возможность локального управления модулями системы RFTS, без использования внешнего компьютера (notebook). Это позволяет не только снизить затраты на установку системы RFTS, но и упростить обслуживание такой системы, так как обслуживающему персоналу не потребуется носить с собой дополнительное оборудование, а также иметь возможность распределенного управления со станций ONT, подключенных к сети управления, — конфигурирование всех или определенных узлов RTU и получение всей или частичной информации от центрального блока управления TSC в зависимости от прав доступа.

Независимо от метода контроля оптических волокон система должна обеспечивать:

- дистанционный контроль пассивных и активных волокон оптических кабелей;
- точное и своевременное документирование и составление отчетности;
- автоматическое обнаружение неисправностей с указанием их точного местоположения;
- контроль и управление процессом оповещения о повреждении оптических кабелей;
- проведение измерений параметров оптических волокон в ручном режиме;
- прогнозирование изменений параметров оптических кабелей;
- возможность расширения функциональности системы при внедрении новых технологий передачи на сети связи [1].

Общие принципы построения систем мониторинга

В ходе проектирования и реализации архитектуры системы мониторинга могут быть приняты во внимание следующие общие положения:

Система мониторинга должна иметь иерархический характер, обеспечивая быстрое и надежное взаимодействие разных уровней, обратную связь и достаточно высокий уровень автономности каждого компонента системы.

Реализация программных и аппаратных модулей в системе мониторинга должна учитывать общие рекомендации, международные и отраслевые стандарты на построение систем мониторинга и управления промышленной автоматикой и сетями электросвязи.

Система мониторинга должна обеспечивать открытые интересы для последующей интеграции с программами сторонних производителей, осуществляющих взаимосвязанное выполнение всех функций по оперативному управлению (например, обеспечить в будущем простую интеграцию с системами, выполняющими автоматизацию задач бухгалтерского учета и аудита, складского учета, учета сетевых ресурсов, капитального строительства, управления персоналом, управления производством, взаимодействия с клиентами и т.п.).

Система мониторинга должна предоставлять среднему и высшему звену руководства инструментарий и методологии по глубокому анализу данных с целью поддержки управленческих решений (Data Warehousing, OLAP).

Система мониторинга должна поддерживать эффективную организацию процессно-ориентированного принципа управления и сокращение расходов на местах за счет использования быстро настраиваемых решений по контролю оборудования.

Автоматизированные системы администрирования ВОК, как правило, состоят из:

- системы удаленного контроля оптических волокон (Remote Fiber Test System — RFTS);
- программы привязки топологии сети к географической карте местности;
- базы данных оптических компонентов, критериев и результатов контроля.

Ядром всей системы является RFTS, в ней сосредоточены аппаратные средства. Остальные составные компоненты системы — это программные средства ввода, хранения, обработки и отображения полученных данных.

Дистанционный контроль оптических волокон выполняется оптическим импульсным рефлектометром, диагностирующим состояние волокна по обратному рассеянию световой волны при введении в волокно зондирующих импульсов. При этом система позволяет производить мониторинг как свободных, так и занятых волокон.

Основу архитектуры системы RFTS в общем случае составляют следующие функциональные элементы:

- удаленный модуль тестирования оптических волокон (Remote Test Unit — RTU);
- модуль доступа для тестирования оптических волокон (Optical Test Access Unit — OTAU), или оптический коммутатор,
- устройство управления системой мониторинга ВОК (Test System Control — TSC) на базе персонального компьютера, соответствующего программного обеспечения, а также оборудования, обеспечивающего связь между компонентами системы.

К дополнительным элементам системы можно отнести пассивные оптические компоненты (оптические мультиплексоры WDM, оптические фильтры), вводимые в сеть мониторинга при активном тестировании, а также средства документирования (принтер), отображения и передачи приема аварийных сообщений (колонки для звуковой сигнализации, факс, пейджер).

Удаленный модуль тестирования RTU представляет собой корзину, монтируемую в стойку 19" и/или 23" (в зависимости от производителя), в состав которой входят один или два оптических модуля рефлектометра, набор интерфейсных плат для обеспечения связи между компонентами системы, плата компьютера для хранения и обработки данных в процессе мониторинга и другие функциональные устройства управления системой мониторинга ВОК (Test System Control — TSC) на базе персонального компьютера, соответствующего программного обеспечения, а также оборудования, обеспечивающего связь между компонентами системы.

Все системы RFTS, как правило, строятся по одной и той же схеме. При этом выделяют следующие функциональные элементы и устройства [1]:

- аппаратную часть;
- систему управления.

Интегрированные элементы:

- геоинформационную систему (ГИС) привязки топологии сети к карте местности;
- базы данных ОК, оборудования сети, критериев и результатов тестирования ОК ВОЛС и сети в целом и другие внешние базы данных.

Аппаратная часть включает:

- блоки дистанционного тестирования волокон RTU (Remote Test Unit), в которые могут устанавливаться модули оптических рефлектометров OTDR (Optical Time Domain Reflectometer), модули доступа для тестирования волокон OTAU (Optical Test Access Unit) — оптические коммутаторы и другие модули;
- центральный блок управления TSC (Test System Control) системой RFTS — центральный сервер;
- станции контроля сети ONT (Optical Network Terminal).

Элементами системы управления RFTS являются: станции контроля сети ONT (notebook или стационарные рабочие станции); соответствующее программное обеспечение; блоки управления в RTU; центральный блок управления TSC и сетевое оборудование, обеспечивающее связь между компонентами управления RFTS (рис.).

В стратегически важных точках сети устанавливаются блоки RTU. Конфигурация системы RFTS (выбор блоков RTU, их размещение по узлам сети и комплектация модулями OTDR, OTAU и др.) оптимизируется исходя из топологии сети, стоимости оборудования, требований надежности системы RFTS и других критериев. При этом тестироваться могут как пассивные волокна ВОЛС (метод тестирования пассивных оптических сетей), так и активные волокна (метод тестирования активных оптических сетей). Оптический рефлектометр периодически снимает данные по затуханию с подключаемых к нему оптических волокон сети. Каждая полученная рефлектограмма сравнивается с эталонной, отражающей обычно исходное состояние волокна. Если отклонение от нормы превышает определенные, заранее установленные пороги (предупреждающий или аварийный), то соответствующий блок RTU автоматически посылает на центральный сервер системы предупреждение или сообщение о неисправности. Все рефлектограммы также поступают на центральный сервер, который сохраняет их в базе данных для дальнейшей обработки. Центральный сервер системы обеспечивает доступ ко всем результатам тестирования волокон для любой станции контроля сети и автоматически рассылает сообщения о неисправностях в зависимости от уровня серьезности события на заранее заданные IP- или электронные адреса, пейджеры и телефоны, узлы обслуживания ВОЛС.

Функции систем мониторинга

Очевидно, что применение данных систем позволяет по-новому подойти к вопросу тестирования оптических кабелей и обслуживанию оптических сетей, обеспечивая:

- среднее время локализации и идентификации неисправности ВОЛС не превышает 10 минут, в то время как при традиционном способе оно измеряется часами;
- отображение обнаруженной неисправности на географической карте, что благодаря базе данных топологии оптической сети упрощает обслуживание последней;
- прогноз возможных неисправностей сети, так как осуществляется систематическое накопление результатов измерений оптических элементов, анализ которых способствует предупреждению ошибок;
- возможность сравнения базы данных результатов измерений с результатами текущих измерений, что гарантирует подлинность накопленных данных;
- возможность проведения испытаний сети одним квалифицированным пользователем, что повышает эффективность обслуживания большой сетевой зоны при меньшем количестве персонала;

- значительное сокращение парка оборудования, необходимого для обслуживания участков сети, что устраняет проблемы, свойственные при использовании этого оборудования;
- упрощение проектирования, строительства и сдачи в эксплуатацию новых сетей благодаря стандартизованной документации, используемой совместно с накопленным опытом эксплуатации системы.

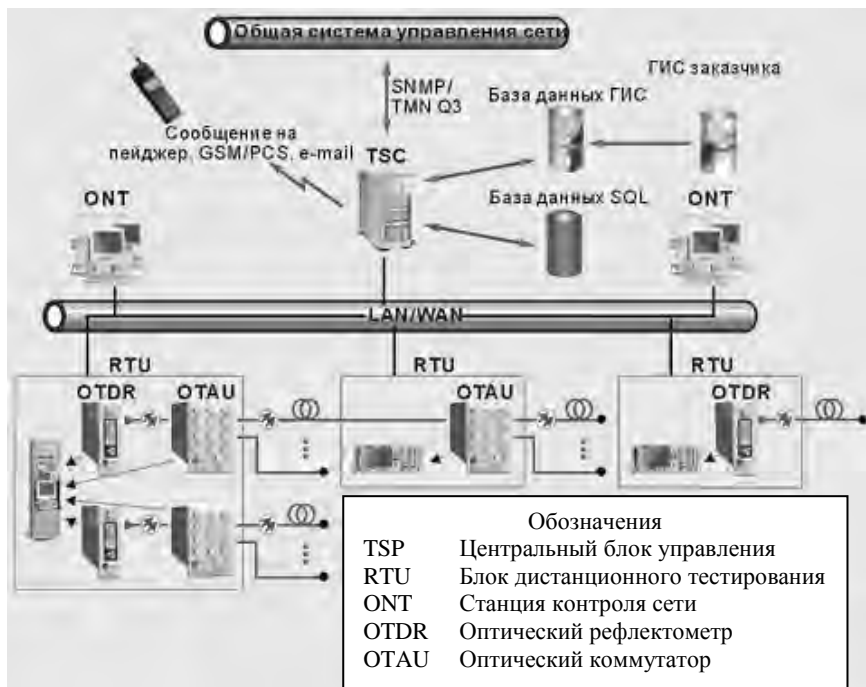


Рисунок. Архитектура системы RFTS

Таким образом, данные системы обеспечивают автоматическое обнаружение, точную локализацию и индикацию на географической карте возникшей неисправности ВОЛС, что позволяет немедленно направить ремонтную бригаду для проведения восстановительных работ и минимизировать проблемы, имеющие место при использовании традиционных методов обслуживания линий связи, к которым можно отнести:

- обрывы кабеля, обусловленные строительными работами, пожаром, автодорожными и железнодорожными авариями, стихийными бедствиями или саботажем;
- неисправности, вызванные выходом из строя компонентов ВОЛС, некачественными соединениями сваркой, увеличением потерь из-за попадания влаги в кабель и нарушением коммутаций в сети.

Важнейшей функцией системы RFTS является то, что она постоянно автоматически ведет сбор и статистический анализ результатов тестирования оптических волокон сети. Статистический анализ с использованием корреляционных, многофакторных методов, а также современных нейросетевых методов дает возможность обнаруживать и прогнозировать неполадки волокна задолго до того, как они приведут к серьезным проблемам в сети. На основе мониторинга сети при помощи RFTS можно проводить плановый и профилактический ремонт ОК в сети, не дожидаясь появления серьезных повреждений и аварий в кабельной системе.

Система RFTS значительно повышает безопасность сети. Любое несанкционированное подключение к волокну неизбежно приводит к дополнительным потерям в оптическом канале, а значит, будет обнаружено и зафиксировано системой в реальном масштабе времени.

Другое не менее важное качество системы RFTS — графическое представление информации о состоянии сети. На центральном сервере системы установлена профессиональная ГИС, которая содержит точную электронную карту цифровой сети на местности. Вся информация о состоянии сети и документация по ОК хранится в базе данных SQL и может быть графически представлена на карте. Также на карту выводится полная информация о неисправностях волокон в ОК, включая их точное физическое местоположение. Таким образом, система RFTS позволяет обслуживающему персоналу

в реальном масштабе времени (практически мгновенно) узнавать, где произошел сбой и каков уровень потерь в волокне ОК ВОЛС. Это намного сокращает время поиска неисправностей и упрощает проведение профилактического обслуживания ВОЛС. Учитывая размеры современных цифровых волоконно-оптических сетей, важность и объемы передаваемой по ним информации, экономическую эффективность применения системы RFTS трудно переоценить.

Ввиду того, что деятельность системы автоматического администрирования основана на рефлектометрических измерениях контролируемых волокон, то работа с ней фактически является взаимодействием с OTDR в режиме дистанционного управления и поэтому не требуется глубоких знаний по работе с компьютером. Прикладное программное обеспечение QUESTFiber позволяет производить измерения, обрабатывать и анализировать их, имея в своем распоряжении широкие возможности выделения и идентификации отклонений текущей рефлектограммы относительно эталонной.

После того, как на этапе монтажных работ и инсталляции оборудования системы произведено подключение оптических волокон, подлежащих мониторингу, к оптическим коммутаторам, установлены рабочие станции управления RFTS с соответствующим программным обеспечением, настроены каналы связи между компонентами системы, оператор приступает к созданию базы данных по тестируемым ВОК и составу оборудования RFTS, а также заданию критериев контроля. Рассмотрим этапы конфигурирования системы администрирования оператором:

- с указанием информации о местоположении каждого элемента, его типа, конфигурации, информации по используемым каналам связи и др.;
- создание базы данных по тестируемым оптическим волокнам и кабелям. При этом указывается оптический коммутатор и номер порта в нем, к которому подключено волокно, индивидуально для каждого волокна задаются параметры тестирования — длина волны (определяется типом оптического модуля RTU), диапазон/разрешение, длительность импульса, коэффициент преломления ОВ (берется из паспортных данных на кабель), степень усреднения рефлектограммы;
- снятие эталонных рефлектограмм. После того как данные об оборудовании RFTS и оптическим волокнам, подлежащим контролю, прописаны в системе управления. Эта информация дистанционно загружается индивидуально в каждый RTU. После этого RTU «знает», какой оптический коммутатор к нему подключен, какие волокна и в каком режиме он должен контролировать, при превышении каких значений порогов ему необходимо посылать сигнал аварии на TSC. Далее оператор в ручном режиме снимает рефлектограммы оптических волокон, сохраняет их в качестве эталонных и также загружает в соответствующее RTU;
- использование несколько типов контроля — постоянный, по запросу оператора и по расписанию. На этом этапе оператор, в соответствии с определенной в проекте идеологией администрирования ВОК, задает индивидуально для каждого волокна периодичность тестирования (для контроля по расписанию) и назначает пороговые значения параметров событий на протяжении контролируемого участка, при превышении которых в процессе мониторинга система инициирует сигнал аварии.

Далее, если в процессе мониторинга какое-либо RTU обнаруживает отклонение снятой первичной рефлектограммы от хранящейся в нем эталонной, то устанавливается связь с управляющим компьютером и посылается сигнал аварии. В компьютере полученная информация обрабатывается и выводится в виде визуальной и звуковой сигнализации. При этом указывается дата и время аварии, условия возникновения и тип повреждения, какие пороги и насколько превышены. На электронной карте визуально показывается место повреждения с указанием его координат. Оповещение об авариях может происходить также путем автоматической отправки сообщения на пейджер, SMS сообщения на мобильный телефон, по электронной почте и на факс.

При прогнозирующем обслуживании выполняется регулярное автоматическое накопление в базе данных характеристик и результатов измерений оптических волокон (ослабления, потерь, рефлектограмм и др.), анализируется динамика изменения параметров оптического тракта во времени, и локализуются места прогрессирующего изменения параметров. При этом в системе QUEST Fiber динамика изменения параметров оптических волокон отслеживается с построением соответствующих графиков для повышения эффективности обнаружения «проблемных» мест в кабелях до того, как они повлияют на параметры передачи трафика ВОСП.

Обычно в RFTS каждая из рассмотренных процедур имеет свой уровень приоритета доступа, который при необходимости может быть изменен. В системе мониторинга QUESTFiber применен кардинально новый подход к организации доступа к базе данных системы, основанный на создании так называемых доменов.

Сравнительный анализ систем мониторинга ВОК

Автоматизированные системы непрерывного мониторинга ОК сетей связи выпускаются рядом зарубежных компаний. В настоящее время на российском рынке представлены четыре системы RFTS, выпускаемые ведущими мировыми производителями подобного оборудования:

- AccessFiber (компания Agilent Technologies, бывшая Hewlett-Packard, HP);
- Atlas (компания Wavetek Wandel&Goltermann);
- FiberVisor (компания EXFO);
- Orion (компания GN Nettest).

Известны также системы RFTS SmartLGX (Lucent Technologies), OCN-MS (Nicotra Sistemi) и некоторые другие, но они слабо представлены на отечественном рынке.

Сравнительный анализ систем автоматизированного мониторинга волокон в ОК ВОЛС основан на результатах, опубликованных в технической периодике [2] и на Web-сайтах основных производителей систем RFTS [2]. В таблицах 1 и 2 представлены функциональные и технические характеристики систем RFTS для мониторинга ОК ВОЛС.

Для удобства сравнения систем RFTS по функциональным, техническим и другим характеристикам результаты сравнительного обобщающего анализа рассматриваемых систем представлены в таблице 1.

Т а б л и ц а 1

Основные функциональные характеристики систем мониторинга ОК

| Функции | Система | | | |
|--|---------------------------|---------------------------------------|---|-------------------------------|
| | AccessFiber | Atlas | FiberVisor | Orion |
| | Agilent Technologies (HP) | Wavetek Wandel & Goltermann | EXFO | GN Nettest |
| Мониторинг активных (занятых) волокон | + | + | + | + |
| Тестирование в ручном режиме по запросу | + | + | + | + |
| Тестирование по заданному расписанию | + | + | + | + |
| Функция документирования сети | + | + | + | + |
| Интеграция с электронной картой ГИС | Mapinfo | Mapinfo | InterGraph (функция импорта других форматов, включая Mapinfo) | Mapinfo |
| Архитектура «клиент-сервер», операционная система | На платформе Windows NT | На платформе Windows NT, UNIX (опция) | На платформе Windows NT | На платформе UNIX |
| Организация многоуровневого доступа к системе | + | + | + | + |
| Поддержка удаленного доступа к серверу TSC со станции ONT | – | – | + | + |
| Поддержка функции статистического анализа характеристик ОВ | + | + (с построением графиков) | + | + |
| Локальное конфигурирование и управление блоком RTU | – | – | + | + (необходим Notebook или ПК) |
| Автономная работа модуля RTU при потере связи с сервером | + | + | + | + |
| Готовые решения для мониторинга DWDM сигналов и PMD* | – | – | + (модули OSA и, PMD) | – |
| Поддержка протокола SNMP** | – | – | + | н/д |

Примечание. *PMD — Polarization Mode Dispersion, поляризационная модовая дисперсия; **SNMP — Simple Network Management Protocol.

Сравнительный анализ различных систем RFTS показывает, что для практического применения лучшими в функциональном и техническом плане являются системы FiberVisor (EXFO), Orion (GN Nettest) и Atlas (Wavetek Wandel&Goltermann). С учетом требований расширяемости, масштабируемости и возможности интеграции с различными ГИС предпочтение следует отдать системе FiberVisor (EXFO).

Окончательный выбор той или иной системы должен производиться с учетом стоимости конкретной системы мониторинга ОК для всей планируемой сети и с учетом ее дальнейшего развития [2].

Т а б л и ц а 2

Основные технические характеристики систем мониторинга ОК

| Параметры | Система | | | |
|--|-------------------------------------|-------------------------------------|--|--|
| | AccessFiber | Atlas | FiberVisor | Orion |
| | Agilent Technologies (HP) | Wavetek Wandel & Goltermann | EXFO | GN Nettest |
| Возможность установки модуля RTU в стойку | Монтаж возможен только в стойку 19" | Монтаж возможен только в стойку 19" | Установка в поставляемую производителем или стандартную стойку 19" | Установка в стандартную стойку 19" и 23" |
| Оптический коммутатор (модуль OTAU) | Встроенный в RTU | Встроенный в RTU | Устанавливаемый в RTU или внешний | Внешний |
| Максимальное число портов для подключения ОВ на один оптический коммутатор | 96 | 48 | 96 (+31) | 96 |
| Протоколы взаимодействия | Q3 TMN | SNMP | Q3 TMN, SNMP | Q3 TMN |
| Диапазон напряжений стационарного питания, В | 36–60 | 28–72 | 48–60 | 38–72 |
| Наличие индикации состояния модуля RTU | – | Светодиодные индикаторы, ЖК-дисплей | Светодиодные индикаторы на модулях, дисплей | Светодиодные индикаторы, дисплей, локальный модуль доступа |

Т а б л и ц а 3

Сравнительный обобщающий анализ систем мониторинга ОК

| Параметры | Система | | | |
|----------------------------------|---------------------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|
| | AccessFiber | Atlas | FiberVisor | Orion |
| | Agilent Technologies (HP) | Wavetek Wandel & Goltermann | EXFO | GN Nettest |
| Функциональность | Близка к полной | Близка к полной | Полная | Близка к полной |
| Расширяемость и масштабируемость | Близка к полной | Не вполне полная | Полная | Близка к полной |
| Технические характеристики | Высокие | Высокие | Наивысшие | Наивысшие |
| Совместимость с различными ГИС | Нет | Нет | Есть | Нет |
| Стоимость | Высокая | Средняя | Средняя | Средняя |
| Наличие сертификатов в России | Нет | Есть | Нет | Есть |
| Общая оценка | Хорошо | Близка к отличной | Близка к отличной | Близка к отличной |

Построение и развитие крупных корпоративных сетей показывает, что систему мониторинга ОК ВОЛС желательно планировать на этапе общего проектирования самой цифровой сети. При развитии большой и протяженной сети до некоторого уровня, когда необходимость установки систем RFTS становится очевидной как по техническим, так и экономическим соображениям, очень важно сделать

правильный выбор системы мониторинга ОК ВОЛС. Результаты сравнительного анализа систем RFTS показывают, что на российском рынке имеется достойный выбор многофункциональных, надежных и гибких систем дистанционного и непрерывного мониторинга ОК ВОЛС для современных сетей связи.

Список литературы

- 1 В Интернет через Ethernet. От соединения двух компьютеров до сети микрорайона // <http://www.nag.ru/goodies/book>.
- 2 Горлов Н.И., Мехтиев А.Д., Эйрих В.И. Основные задачи мониторинга современных волоконно-оптических линий передачи // Сагиновские чтения № 4: Тр. Междунар. науч. конф. Ч. 2. — Караганда: Изд-во КарГТУ, 2012. — С. 68–70.

Н.И.Горлов, А.Д.Мехтиев, В.И.Эйрих, В.В.Югай, Э.С.Оганезов

Мониторинг жүйелерін құру принциптері және салыстырмалы талдауы

RFTS жүйелеріне ұсынылатын негізгі талаптар қарастырылған. RTU анықталған түйіндерін конфигурациялау мысалында мониторинг жүйелерін құру принциптері және салыстырмалы талдауы орындалған. Рұқсат ету құқыққа сәйкес TSC басқарудың орталық блогынан ақпараттың барлығын немесе бөлігін алу әдістері келтірілген. Мониторинг жүйелерін құрудың жалпы принциптері тұжырымдалған. Оптикалық талшықтардың техникалық күйін қашықтықтан бақылау белгілері орнатылған. Жүйенің мәліметтері ВОЛС арқылы пайда болған ақауды географиялық картада автоматты түрде табу, дәл локализациялауды және индикациялауды қалай қамтамасыздандырылатыны көрсетілген.

N.I.Gorlov, A.D.Mekhtiev, V.I.Eirikh, V.V.Yugay, E.S.Oganezov

Comparative analysis and principles of monitoring systems' construction

The basic requirements for RFTS systems are reviewed. A comparative analysis is made and the principles of monitoring systems' construction with the example of certain RTU nodes configuration, ways of getting the whole information or it's part from the central control unit TSC depending on access rights are reviewed. The general principles of monitoring systems' construction are formulated. Features of technical conditions' of the optical fibers remote control are established. It is shown how these systems provide automatic detection, accurate localization and indication of FOTL defects on geographical map.

References

- 1 *In the Internet through Ethernet. From connection of two computers to a residential district network*, <http://www.nag.ru/goodies/book>.
- 2 Gorlov N.I., Mekhtiyev A.D., Airikh V.I. *Saginovskie chteniya № 4: Trudy Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Saginovsky readings No. 4: Works of the International scientific conference], Karaganda: KarGTU Publ., 2012, p. 68–70.

В.А.Колесников, Я.Ж.Байсагов

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

Метод аналогий и проектирование информационно-измерительных систем

В статье метод аналогий использован для анализа проектирования информационно-измерительных систем. Рассмотрены их характерные параметры и экономические показатели. Построена аналогия между информационно-измерительной системой, термодинамикой и микроэкономикой. Получено выражение, которое определяет правило выбора процессора при проектировании информационно-измерительной системы. Из него следует, что объем памяти процессора определен, в основном, произведением количества информации, поступающей от исследуемого объекта, и точности информационно-измерительной системы. Последняя, как правило, обратно пропорциональна отношению сигнал/шум и стремится к оптимальному значению при снижении уровня шума. Получена формула, которая показывает, что уменьшить цену отечественного информационно-измерительной системы и выиграть в конкурентной борьбе можно только за счет увеличения получаемой информации от датчиков (сенсоров).

Ключевые слова: информационно-измерительная система, термодинамика, микроэкономика, аналогия, объем памяти, быстродействие, оптимальное значение, цена, датчик.

Введение

Тенденция возникновения интегрирующих научных направлений на стыке наук возникла достаточно давно. Существует множество примеров взаимопроникновения наук на стыках физика–химия, химия–биология, биология–медицина и т.д. Возникающие при этом новые науки имеют характерные названия: химическая физика, биофизика, молекулярная биология, электрохимия, экологическая биофизическая химия. Междисциплинарный подход в современном естествознании всегда имеет место в явном или неявном виде, потому что практически любая серьезная научная проблема — комплексная и требует привлечения специалистов из множества областей.

Существуют чрезвычайно простые и универсальные законы функционирования и развития физического мира, применимые практически ко всем объектам. Выявление именно таких простейших законов, лежащих в самом основании всего мироустройства, позволит создать метод для действительного осуществления интеграции науки. В настоящее время этим методом является метод аналогий. В физике существует значительное количество примеров успешного использования метода аналогий, и это является предпосылкой того, чтобы придать аналогии статус одного из возможных методов научного познания. Дж. Максвелл сопоставил созданную им классическую теорию электромагнетизма с гидродинамикой несжимаемых жидкостей и подчеркнул значение такого подхода в науке [1]. В 7-м томе знаменитых фейнмановских лекций по физике глава 12 полностью посвящена электростатическим аналогиям.

В настоящее время мы имеем примеры использования физических аналогий и моделей для описания процессов совершенно различной природы. Так, например, энтропийные модели успешно применяются при анализе процессов миграции населения, обмена и распределения экономических ресурсов и др. [2]. Идеи и методы гидродинамики, нелинейных волновых процессов и теории кристаллизации использовались и используются до настоящего времени при построении теории грузовых и транспортных потоков в больших городах [3]. В [4–6] метод аналогий применялся для анализа таких физических процессов в гетерогенных средах, как электропроводность, теплопроводность и др.

Исходя из анализа литературных источников, в настоящее время можно выделить два основных аспекта применения метода аналогий:

1. Метод аналогий используется при обучении в качестве приема визуализации сложных и визуально непредставимых объектов и явлений.

2. Более важный аспект, который применяется реже, — использование метода аналогий как основы для переноса знаний одной науки на предмет другой.

В настоящей работе сделана попытка использования метода аналогий для анализа проектирования информационно-измерительных систем (ИИС), их характерных параметров и экономических показателей.

Метод аналогий, термодинамика, физика, экономика

В настоящем разделе мы рассмотрим метод аналогий с примерами из физики и техники. Затем проанализируем аналогию между термодинамикой и экономикой. В таблице 1 показана аналогия, существующая между величинами в различных скалярных потенциальных полях [7], а в таблице 2 — аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами [8].

Т а б л и ц а 1

Аналогия между величинами в потенциальных полях [7]

| Параметр | Электростатическое поле | Электрического тока поле | Магнитостатическое поле | Тепловое поле |
|--|--|--|-------------------------------------|---------------------------------|
| Потенциал | Потенциал U | Потенциал, U | Потенциал, Ω | Температура, T |
| Градиент | Напряженность электрического поля, E | Напряженность электрического поля, E | Напряженность магнитного поля, H | Градиент температуры, $gradT$ |
| Постоянная, характеризующая свойства среды | Диэлектрическая проницаемость, ε | Электрическая проводимость, σ | Магнитная проницаемость, μ | Температуро-проводность, a |
| Плотность потока | Электрическое смещение, D | Плотность тока, j | Магнитная индукция, B | Плотность теплового потока, q |
| Интенсивность источника | Плотность заряда, ρ_e | Плотность тока, j | Плотность магнитной массы, ρ_m | Плотность источника тепла, Q |
| Проводимость поля | Емкость, C | Электрическая проводимость, G | Магнитная проводимость, Λ | Тепловая проводимость |

Т а б л и ц а 2

Аналогия между электрическими и акустическими переменными и параметрами [8]

| Электрическая система | Акустическая система |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Напряжение, U | Давление, P |
| Ток, I | Скорость частиц, v |
| Заряд, e | Смещение, u |
| Индуктивность, L | Плотность среды, ρ |
| Емкость, C | Акустическая емкость, $C_A = 1/\tau$ |
| Сопротивление, R | Акустическое сопротивление, R_A |

В последние годы число работ по использованию методов термодинамики в экономике начало резко возрастать. Как отмечают швейцарские ученые А.Краузе и Р.Райхлин: «Сходство между макроэкономикой и термодинамикой поражает. Перспектива использования достижений термодинамики в исследованиях по экономике представляется многообещающей. Успех применения термодинамики в других, находящихся за пределами физики областях, таких как теория информации или биология, демонстрирует применимость термодинамики в другой области, при условии, что базовые понятия последней строго определены» [9].

В работах В.И.Меркулова (Новосибирск) делается попытка воспользоваться методами термодинамики применительно к экономическим процессам. При этом он отмечает, что появляется возможность не только описать и глубже понять известные экономические процессы, но и получить для них количественные зависимости, допускающие более широкое применение [10]. Академик РАН В.М.Сергеев публикует монографию «Пределы рациональности. Термодинамический подход к проблеме экономического равновесия» [11].

Вернемся теперь к методу аналогий. В работе А.Краузе и Р.Райхлина предлагается следующая аналогия между термодинамикой и экономикой (табл. 3).

В монографии А.М.Цирлина [11] приводится аналогия между термодинамикой и микроэкономической системой (табл. 4).

Т а б л и ц а 3

Сравнение понятий термодинамики и экономики [9]

| Термодинамика | Экономика |
|---------------|---|
| Энергия | Потенциальные материальные приобретения |
| Энтропия | Вариативность материальных приобретений |
| Температура | Размер потенциальных материальных приобретений |
| Давление | Готовность индивидов к разработке потенциальных материальных приобретений |
| Сила | Индивиды, стремящиеся к материальным приобретениям |
| Работа | Реализованные материальные приобретения |
| Тепло | Потери при распределении |

Т а б л и ц а 4

Аналогии между термодинамическими и микроэкономическими системами и характеризующими их переменными [11]

| Термодинамическая система | | Микроэкономическая система | |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| Название | Обозначение | Название | Обозначение |
| Резервуар (обратимый теплообмен) | T_- | Экономический резервуар | p_- |
| Резервуар (необратимый теплообмен) | $q = \alpha(T - T_-)$ | Монопольный рынок | $n = \alpha(c - p_-)$ |
| Количество вещества | N | Запас ресурса | N |
| Химический потенциал | $H(N)$ | ЭА, оценка ресурса | $p(N)$ |
| Тепловая машина, температура | $T(t)$ | Цена | $c(t)$ |
| Свободная энергия, работа | A | Базисный ресурс | M |
| Работоспособность системы | E | Прибыльность системы | E |
| Энтропия системы | S | Связанный капитал | F |
| Производство энтропии | σ | Диссипация капитала | σ |
| Внутренняя энергия | U | Полный капитал | $U = M + F$ |

Различия между таблицами 3 и 4 связаны: во-первых, с различием между макроэкономической и микроэкономической системами; во-вторых, с различными подходами при выявлении аналогий. А.Краузе и Р.Райхлин исходили в своих рассуждениях из цикла Карно, а А.М.Цирлин — из второго начала термодинамики.

Однако, как и в случае аналогии между потенциальными полями (см. табл. 1), можно провести такую же аналогию и для таблиц 3 и 4 (табл. 5 и 6).

Т а б л и ц а 5

Аналогии между термодинамическими и микроэкономическими системами и характеризующими их переменными

| Термодинамическая система | | Микроэкономическая система | |
|------------------------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------|
| Название | Обозначение | Название | Обозначение |
| Резервуар (обратимый теплообмен) | T_- | Экономический резервуар | p_- |
| Резервуар (необратимый теплообмен) | $q = \alpha(T - T_-)$ | Монопольный рынок | $n = \alpha(c - p_-)$ |
| Количество вещества | N | Запас ресурса | N |
| Химический потенциал | $H(N)$ | ЭА, оценка ресурса | $p(N)$ |
| Тепловая машина, температура | $T(t)$ | Цена | $c(t)$ |
| Свободная энергия, работа | A | Базисный ресурс | M |
| Работоспособность системы | E | Прибыльность системы | E |
| Энтропия системы | S | Связанный капитал | F |
| Производство энтропии | σ | Диссипация капитала | σ |
| Внутренняя энергия | U | Полный капитал | $U = M + F$ |

**Аналогии между термодинамическими, макроэкономическими
и микроэкономическими системами**

| Термодинамика | Макроэкономика | Микроэкономика |
|---------------------------------|---|-------------------------------|
| Энергия, A | Потенциальные материальные приобретения | Базисный ресурс, M |
| Энтропия, S | Вариативность материальных приобретений | Связанный капитал, F |
| Температура, $T(t)$ | Размер потенциальных материальных приобретений | Цена, $c(t)$ |
| Давление | Готовность индивидов к разработке потенциальных материальных приобретений | – |
| Сила | Индивиды, стремящиеся к материальным приобретениям | – |
| Работа, E | Реализованные материальные приобретения | Прибыль, E |
| Производство энтропии, σ | Потери при распределении | Диссипация капитала, σ |

Используя данные таблиц 1–6, мы можем построить следующую аналогию между полем электрического тока, термодинамикой и микроэкономикой (табл. 7).

Аналогии между термодинамическими, электрическими и микроэкономическими системами

| Термодинамика | Электрического тока поле | Микроэкономика |
|---------------------------------|---------------------------------------|--|
| Энергия, A | Энергия поля, $A = CU^2/2$ | Базисный ресурс, $M = \alpha c^2(t)/2$ |
| Энтропия, S | Энтропия поля, $S = NU^2/2kT^2$ | Связанный капитал, $F = \beta M/c(t)$ |
| Температура, $T(t)$ | Потенциал, $U(t) = U_0 \sin \omega t$ | Цена, $c(t) = c_0 \sin \omega t$ |
| Производство энтропии, σ | Производство энтропии, $\sigma = S/t$ | Диссипация капитала, $\sigma = F/t$ |

Метод аналогий и информационно-измерительные системы

Информационно-измерительные системы (ИИС) — это комплекс измерительных устройств, обеспечивающих одновременное получение человеком-оператором или ЭВМ необходимой информации о свойствах и состоянии какого-либо объекта [12–14].

Структурная схема любой ИИС может быть представлена так, как это показано на рисунке 1.

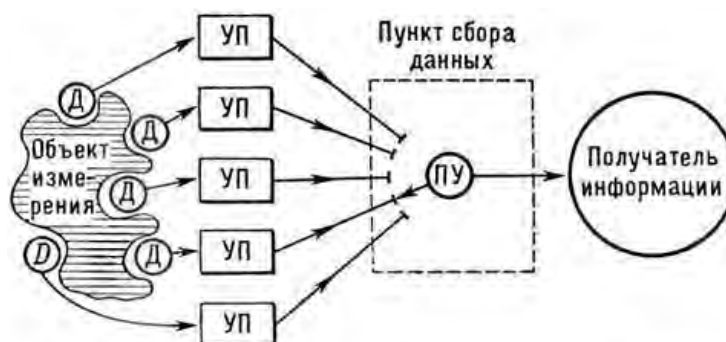


Рисунок 1. Структурная схема информационно-измерительной системы [12]

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 передаёт её получателю информации. По такой структурной схеме строятся практически все ИИС, включая современные системы передачи информации со спутников и автоматических межпланетных станций.

Информационно-измерительная система является сложным объектом техники, имеющая ряд характеристик, основными из которых являются информационные и метрологические. Основные информационные характеристики следующие:

- информационный поток от объекта на систему в целом и на ее отдельные элементы;
- производительность элементов ИИС;

- число датчиков ИИС;
- требуемые объемы запоминающих устройств элементов ИИС.

Основными метрологическими характеристиками ИИС являются точность и достоверность измерений. Информационный поток от объекта зависит от его динамических характеристик и требований к точности измерений. В этом плане он не зависит от ИИС и является заданной величиной. Однако, как правило, этот поток является в значительной степени избыточным. Снижение избыточности может быть достигнуто:

- адаптацией структуры ИИС к решению конкретных задач и, соответственно, изменением перечня подключаемых датчиков и других источников информации, их числа и частот их опроса;
- обоснованием действительно необходимых норм точности;
- обоснованием действительно необходимого числа замеров в единицу времени (частоты опроса).

Что касается обоснования перечня и числа опрашиваемых датчиков, а также требуемых норм точности, то они определяются разработчиками ИИС, исходя из конкретных задач применительно к конкретному объекту, и обсуждение их в рамках настоящей работы не представляется необходимым.

До настоящего времени частота опросов определяется весьма приближенно и, как правило, интуитивно, на основании опыта специалистов и, в лучшем случае, экспериментально. При этом частота опросов становится существенно избыточной и может привести к таким требованиям к аппаратуре, что создание ИИС становится проблематичным или, по крайней мере, она становится существенно более громоздкой и дорогой. Занижение же частот опроса приводит к метрологической недостоверности результатов измерений.

Построим таблицу аналогий между термодинамикой, ИИС и микроэкономикой (табл. 8).

Т а б л и ц а 8

Аналогии между термодинамическими, ИИС и микроэкономическими системами

| Термодинамика | ИИС | Микроэкономика |
|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|
| Свободная энергия, работа, A | Объем памяти, W | Базисный ресурс, M |
| Количество вещества, m | Число датчиков (каналов связи), n | Запас ресурса, N |
| Энтропия, S | Количество информации, I | Связанный капитал, F |
| Температура, $T(t)$ | Точность ИИС, Δ | Цена, $c(t)$ |
| Производство энтропии, σ | Производство информации, σ | Диссипация капитала, σ |
| Коэффициент полезного действия, КПД | Эффективность ИИС, η | Прибыльность системы, P |
| Внутренняя энергия, U | Энергоемкость ИИС, E | Полный капитал, $U = M + F$ |

Рассмотрим некоторые примеры использования таблицы 8. Наиболее важным параметром ИИС (да и для любой системы) является ее эффективность η . В термодинамике она соответствует коэффициенту полезного действия тепловой машины:

$$\text{КПД} = 1 - T_n / T_x, \quad (1)$$

где T_n и T_x — температуры нагревателя и холодильника, соответственно.

Для ИИС уравнение (1) будет выглядеть так:

$$\eta = 1 - \Delta_{\text{ex}} / \Delta_{\text{вых}}, \quad (2)$$

где, согласно таблице 8, Δ_{ex} и $\Delta_{\text{вых}}$ — входная и выходная точность ИИС, соответственно. Первая определяется чувствительностью датчика, а вторая — чувствительностью датчика и параметрами унифицирующего преобразователя (рис. 1). Из формулы (2) следует, что эффективность ИИС в значительной степени определяется структурой и параметрами УП и ПУ (рис. 1).

Если в качестве функции отклика Φ из работы [6] взять эффективность ИИС η , то получим

$$\eta = \frac{kT}{C} \cdot \frac{A}{G^0} \cdot m, \quad (3)$$

где A — работа (энергия); T — температура; G^0 — потенциал Гиббса; m — количество вещества; k — постоянная Больцмана; C — постоянная.

Используя таблицу 8, получаем следующее выражение для эффективности ИИС:

$$\eta = C_1 \frac{nW\Delta}{W - I\Delta}. \quad (4)$$

Здесь $C_1 = \text{const}$. Предельное значение $\eta = 1$ и из формулы (4) следует:

$$W = \frac{I \cdot \Delta}{1 - C_1 n \Delta}. \quad (5)$$

Формула (5) определяет правило выбора процессора при проектировании ИИС. Из нее ясно, что объем памяти процессора определяется, в основном, произведением количества информации, поступающей от исследуемого объекта, и точности ИИС. Последняя, как правило, обратно пропорциональна отношению сигнал/шум и стремится к оптимальному значению при снижении уровня шума. Отметим, что правильный выбор процессора определяет в большей степени стоимость разрабатываемой ИИС. Выбор процессора с большой памятью не всегда оправдан. График функции $W(\Delta)$ схематически показан на рисунке 2.

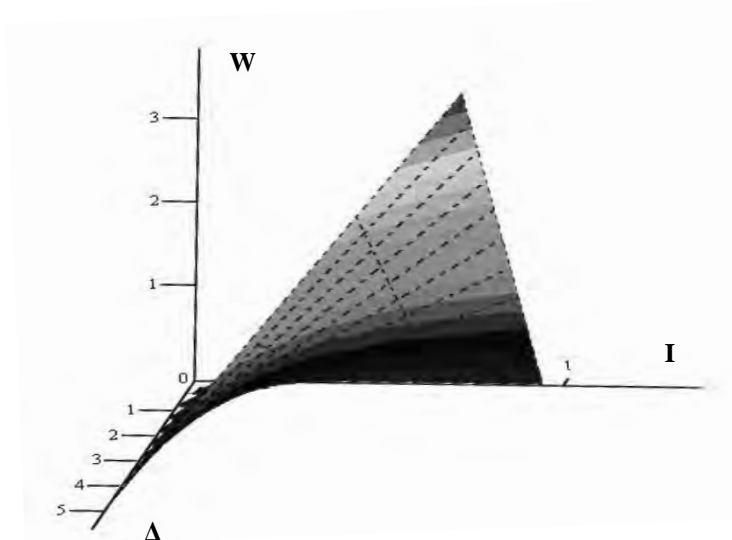


Рисунок 2. Зависимость объема памяти микропроцессора от точности ИИС

Рассмотрим еще один пример. Вероятность диссипативных процессов в термодинамической системе в большинстве случаев определяется законом Аррениуса:

$$p = \nu \exp(-Q/kT), \quad (6)$$

где $\nu = 1/\tau$, τ — время релаксации; Q — энергия активации.

Для ИИС τ — время срабатывания системы (быстродействие ИИС), а $Q = A = W$. С учетом (5) получим:

$$p = \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{\alpha I}{1 - C_1 n \Delta}\right), \quad (7)$$

где α — коэффициент размерности.

Из формулы (7) следует, что потеря информации в ИИС тем меньше, чем больше время измерения τ и больше количества информации I от объекта. Необходимо сделать следующее замечание. Действительно, как это следует из (7), при замедлении переходного процесса (т.е. при увеличении τ) вероятность диссипативных процессов уменьшается. Однако на практике такой путь неприемлем, и наоборот, современные и будущие ИИС должны обладать большим быстродействием для передачи большого массива информации.

При однозначном преобразовании скалярной величины в векторную каждая составляющая последней требует существенно меньшей точности представления — в пределе может оказаться достаточно различать лишь два ее состояния: наличие или отсутствие сигнала. Хотя с увеличением количества составляющих (размерности векторного пространства) повышаются требования к надежности $1/w$ (т.е. вероятности w перехода сигнала в какой-либо из составляющих в другой интервал дискретизации), энергетическая цена точности представления всего числа уменьшается.

За счет отказа от скалярного представления и перехода к векторному можно получить зависимости [15]: $\Delta S \sim [\ln(1/\Delta)]^2$ при разрядном способе кодирования, когда время τ увеличивается в $\ln(1/\Delta)$ раз; $\Delta S \sim \ln(1/\Delta)$ — при однопозиционном кодировании, когда $\tau \sim 1/\Delta$. Асимптотически наилучшим (в смысле произведения $\Delta S \cdot \tau$) является избыточное кодирование по Шеннону, использующее разрядное представление с дополнительными (проверочными) разрядами: здесь увеличение размерности векторного пространства позволяет обнаружить и исправить ошибки некоторой кратности, что понижает требования к вероятности p искажения (и отношению сигнал/шум) в одном разряде. При этом достигается $\Delta S \sim \ln(1/\Delta)$ с одновременным ростом времени лишь в $\ln(1/\Delta)$ раз.

Как указывалось выше, вероятность потери информации в ИИС уменьшается с увеличением количества информации от объекта (формула (7)). Такое увеличение возможно за счет увеличения чувствительности датчика, создания нового типа датчиков, новых способов измерений, совершенствования физического эксперимента, совершенствования систем приема и обработки информации. Ключевое значение при этом имеет создание новых типов датчиков и систем приема и обработки информации на основе нанотехнологий [16–18].

В физических экспериментах стремятся, как правило, добиться повышения чувствительности (см., напр., [19–20]), т.е. снижения абсолютной среднеквадратической погрешности $\sqrt{\Delta l^2}$ и, соответственно, уменьшения разрешаемого интервала Δl_p . Пределы уменьшения $\sqrt{\Delta l^2}$ и Δl_p , конечно, ограничиваются энергией E , но энергетическая цена измерения определяется относительной точностью $1/\sigma$ ($1/\sigma$ равно отношению априорной среднеквадратической погрешности к апостериорной). А относительную точность эксперимента, как правило, искусственно уменьшают, прибегая к использованию эталонов, т.е. различного рода компенсационных схем. Сказанное относится к большинству — даже наиболее тонких и точных — экспериментов, начиная с классических опытов Майкельсона и кончая современными экспериментами по использованию эффекта Мёссбауэра и других.

Во всех подобных экспериментах, несмотря на высокую чувствительность, относительная точность $1/\sigma$ не превышала 10^3 . При этом, даже согласно худшей оценке, при $E/k = 300$ К в одном акте измерения необходимо рассеивать лишь 10^{-7} эрг. Если, однако, согласно [21], в обычных экспериментах высокая относительная точность и не очень нужна, то фундаментальные физические постоянные необходимо знать с высокой точностью. Тем не менее, все фундаментальные постоянные определены с относительной точностью, не превышающей 10^6 – 10^7 (см., напр., [22–24]). Один акт измерения с такой точностью требует рассеять ~ 1 эрг, что меньше реальных технических ограничений.

Термодинамические ограничения приобретают не только принципиальное, но и практическое значение в современных ИИС. Во-первых, передача информации на большие расстояния и ее получение связаны с большими потерями энергии на затухание сигналов. Во-вторых, эти системы характеризуются передачей и обработкой больших массивов информации с высоким быстродействием. В-третьих, современные ИИС оперируют с многоразрядными числами весьма высокой точности.

Экономические аспекты проектирования ИИС

Экономические показатели проектирования и изготовления ИИС играют не менее важную роль, чем их технические и информационные характеристики, обеспечивая конкурентоспособность ИИС как на внутреннем, так и на внешнем рынке. Здесь мы рассмотрим вопрос об экономической эффективности проектирования ИИС на основе таблицы 8. Отметим, что предлагаемый нами подход отличается от традиционных [25–27] в плане функциональной связи не только с экономическими показателями предприятия или фирмы, но и собственно с основными характеристиками ИИС.

Согласно формуле (3) и таблице 8, для экономической эффективности проектирования и изготовления ИИС будем иметь следующее выражение:

$$\eta = C_1 \frac{N \cdot M \cdot c(t)}{M - Fc(t)}. \quad (8)$$

Формула (8) показывает, что эффективность проектирования и изготовления ИИС определяется, в основном, базовым ресурсом M и его запасом N , а также его ценой $c(t)$. Это практически соответствует стандартному подходу в экономике предприятий электронной промышленности [25, 26].

При максимальной эффективности $\eta = 1$ величина стоимости (цена) проектирования и изготовления ИИС будет определяться соотношением:

$$c(t) = \beta \frac{M}{F + C_1 NM}. \quad (9)$$

Здесь β — коэффициент размерности. Связанный капитал F определяется, как все деньги, инвестированные фирмой или инвестором в производство продукции, которую они собираются продать.

Однако в современном ценообразовании имеет место процесс снижения доли «простых», материальных ресурсов при параллельном возрастании доли различных компенсаций — за программное обеспечение, разработку проектов, действие финансовых рынков, торговые марки и т.д. Происходят изменения в содержании и расстановке акцентов в самих составляющих цены. Так, реклама выступает преимущественно не как информирование о свойствах товара, а как средство обеспечения внимания (распространение имиджевой рекламы, элементов провокации, эпатажа). Все это оказывает существенное влияние и на изменение характера конкурентных отношений [27].

Введем теперь в формулу (9) основной параметр ИИС — объем памяти W , который является аналогом базисного ресурса M :

$$c(t) = \gamma \frac{W}{F + C_1 NM}. \quad (10)$$

Здесь γ — коэффициент размерности.

Формула (10) показывает увеличение стоимости ИИС с увеличением ее объема памяти и уменьшение стоимости ИИС с увеличением объема инвестиций F .

Капитал любой компании складывается из двух составляющих [28]: заемных средств F и собственных ресурсов M . У обоих источников есть свои преимущества и недостатки. Заемный капитал обычно менее дорогостоящий ресурс, чем собственный капитал. Это бывает в тех случаях, когда расходы на выплату процентов по займам ниже прибыли, получаемой от этих заемных средств. Кроме того, в отличие от дивидендов, которые считаются распределением прибыли, проценты рассматриваются как расходы и, следовательно, уменьшают налогооблагаемую базу.

Однако существенным недостатком заемных средств является необходимость погасить задолженность в строго определенный срок независимо от финансового положения предприятия.

Анализ данных показывает [29], что компьютерные фирмы гораздо менее активно используют заемный капитал для финансирования своей деятельности.

Большинство гигантов компьютерного бизнеса создавались как венчурные компании, которые привлекают средства исключительно посредством выпуска акций или продажи уже существующего пакета внешним инвесторам (как правило, венчурным инвестиционным фондам). В такой модели доля заемного капитала является не такой значительной, как, например, у банков или добывающих предприятий [29]. Помимо этого, не стоит забывать и о региональных различиях. Например, американский бизнес предпочитает привлекать необходимый капитал на фондовом рынке, в то время как европейские менеджеры обращаются к банкам за кредитами. А поскольку среди компьютерных фирм большинство является американскими, то они, соответственно, и выбирают первый вариант финансирования, что приводит к невысокому значению коэффициента финансового левериджа. Еще одна причина заключается в том, что доверие банков к традиционным отраслям экономики выше, чем доверие к компьютерному бизнесу. Это позволяет компаниям традиционного сектора с высокой репутацией получать значительные кредиты под относительно невысокие проценты.

В Казахстане пока не налажено производство современной вычислительной техники и элементов микроэлектроники. Венчурные компании и фонды создаются, как правило, в горнодобывающей, нефтегазовой отраслях и строительстве [30].

Перспективы проектирования и создания отечественных ИИС

Из предыдущего рассмотрения о ценообразовании проектирования и создания ИИС складывается впечатление о невозможности разработки современных отечественных ИИС. Однако это не так и ситуация выглядит иначе, чем это кажется на первый взгляд.

Преобразуем формулу (9) к следующему виду, отбрасывая некоторые члены:

$$c(t) = \chi \frac{M}{I + C_1 n W} \approx \chi \frac{M}{I} \sim 1 / I. \quad (11)$$

Формула (11) показывает, что уменьшить цену отечественного ИИС и выиграть в конкурентной борьбе, можно только за счет увеличения получаемой информации I от датчиков (сенсоров).

Это возможно в следующих случаях:

- путем создания новых типов датчиков (сенсоров);
- путем новых схематических решений по получению и обработке информации;
- путем использования отечественных материалов и ресурсов.

Рассмотренные направления реализованы в Научно-исследовательском центре «Ионно-плазменные технологии и современное приборостроение» КарГУ им. Е.А.Букетова (директор — В.М.Юров) при создании ИИС для измерения влажности зерна [31] и анализа вредных газов [32] при участии авторов настоящей статьи.

Остановимся подробнее на ИИС для анализа вредных газов. Структурная схема ИИС представлена на рисунке 3.

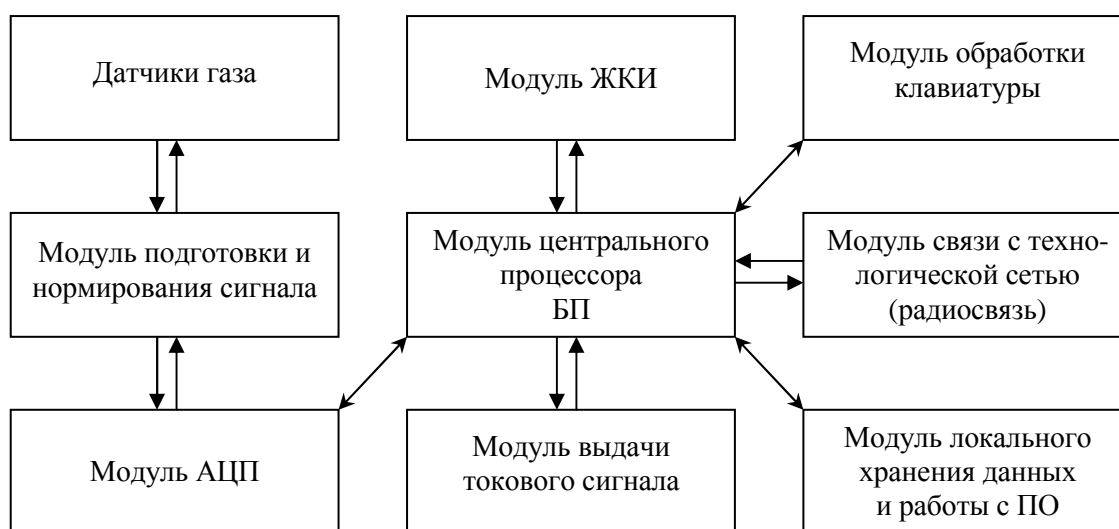


Рисунок 3. Структурная схема информационно-измерительной системы анализа вредных газов

Датчики вредных газов представляет собой специализированную ячейку – таблетку – сенсор на основе нанопористой керамики сульфата калия.

Существенным отличием разработанного нами твердоэлектrolитного газоанализатора вредных газов от существующих зарубежных аналогов является следующее:

– газочувствительные сенсоры зарубежных газоанализаторов представляют собой твердоэлектrolитные ячейки с нанесенными на них платиновыми электродами. Использование платиновых электродов связано с тем, что при нанесении электродов из других, более дешевых, металлов последние подвергаются электрохимической коррозии, что приводит к выходу из строя газоанализатора;

– газочувствительные сенсоры наших газоанализаторов представляют собой нанопористую керамику, впервые синтезированную нами, протекание тока в которой не приводит к электрохимической коррозии нанесенных электродов. Поэтому нами вместо платиновых электродов используются значительно более дешевые алюминиевые электроды. Это значительно снижает стоимость разработанного нами твердоэлектrolитного газоанализатора вредных газов в целом без ухудшения его технических характеристик в сравнении с зарубежными аналогами.

Модуль первичной подготовки, нормирования и усиления сигнала выполнен на основе малошумящего, ультра-прецизионного операционного усилителя со стабильными параметрами. Модуль аналого-цифрового преобразователя выполнен на основе сигма-дельта АЦП (АЦП с уравниванием или балансом зарядов). Модуль центрального процессора выполнен в виде обособленной двухслойной печатной платы на основе маломощного 8-разрядного КМОП микроконтроллера, основанного на расширенной AVR RISC-архитектуре. За счет выполнения большинства инструкций за один машинный цикл контроллер достигает производительности 1 млн операций в секунду, что позволяет оптимизировать соотношение энергопотребления и быстродействия. На плате центрального процессора расположен блок питания системы и газоанализатора. Модуль работы с жидкокристаллическим дисплеем конструктивно выполнен на печатной плате центрального процессора и отвечает за вывод про-

анализированной и подготовленной информации на жидкокристаллическое табло — дисплей. Модуль обработки клавиатуры также выполнен на печатной плате центрального процессора и служит для ввода в систему в «полевых» условиях служебной, настроечной и технологической информации, касающейся работы системы. Модуль связи с технологической сетью предприятия представлен в виде преобразователя интерфейсов, использующегося для интеграции системы в технологическую сеть промышленного предприятия или для связи с рабочим местом инженера, технолога, диспетчера или оператора предприятия. Модуль также предоставляет возможность подключения радиоканала (УКВ или GPRS) для удаленной связи с техническим или оперативным персоналом предприятия либо с контролирующим органом и т.д. Информационно-измерительная система легко адаптируется для интеграции в районную или городскую сеть контроля и оповещения МЧС или спецслужб.

Модуль выдачи токового управляющего сигнала выполнен обособленно с виде отдельной печатной платы и может синтезировать как токовый сигнал (например, пропорциональный количеству вредного газа в контролируемой среде и т.д.), так и сигнал на включение/отключение специализированного промышленного технологического оборудования, сигнализации и т.д. Модуль локального хранения данных конструктивно выполнен на плате центрального процессора и представлен в виде накопительной flash-карты (SD-memory), информацию с которой (при отсутствии связи с верхним информационным уровнем) можно либо считать удаленно, либо извлечь карту физически. Данный модуль также отвечает за согласование аппаратной части системы с программным обеспечением верхнего информационного уровня.

Заключение

В новой экономике знания становятся более важным фактором экономического развития по сравнению с традиционными факторами конкурентоспособности — трудом и капиталом.

В цене товара компенсируются не только непосредственно природные ресурсы, или сырье, используемое в производстве, но и в большей мере — затраты на вывод продуктов на рынок, в том числе в форме выплат владельцам интеллектуальной собственности разного рода лицензионных отчислений.

Сегодня конкурентоспособность не ограничивается текущим трудом или доступом к природным и финансовым ресурсам, но обязательно включает также ранее созданные интеллектуальные продукты — реальные технологии.

В настоящей работе мы стремились показать не только новый подход при анализе проектирования и создания ИИС, но и возможности их разработки, используя интеллектуальный потенциал отечественных исследователей.

Список литературы

- 1 Максвелл Дж.К. Избранные сочинения по теории электромагнитного поля. — М.: Гостехиздат, 1954. — С. 12.
- 2 Вильсон А.Дж. Энтропийные методы моделирования сложных систем. — М.: Наука, 1978. — 246 с.
- 3 Семёнов В.В. Математическое моделирование динамики транспортных потоков мегаполиса // Препринт ИПМ им. М.В.Келдыша РАН. — М., 2004. — 32 с.
- 4 Портнов В.С., Юров В.М. Связь магнитной восприимчивости магнетитовых руд с термодинамическими параметрами и содержанием железа // Известия ВУЗов. Горный журнал. — 2004. — № 6. — С. 122–126.
- 5 Юров В.М., Ещанов А.Н., Портнов В.С. Математические модели электропроводности твердых тел // Математическое моделирование и информационные технологии в образовании и науке: Материалы III Междунар. конф. — Алматы, 2005. — Т. 1. — С. 234–237.
- 6 Яворский В.В., Юров В.М. Прикладные задачи термодинамического анализа неравновесных систем. — М.: Энергоатомиздат, 2008. — 336 с.
- 7 Бинс К., Лауренсон П. Анализ и расчет электрических и магнитных полей. — М.: Энергия, 1970. — 376 с.
- 8 Краузе А., Райхлин Р. Экономика как необратимая (неревверсивная) термодинамическая система // <http://finansbibl.ru/bibl/biblioteka/1.htm>.
- 9 Меркулов В.И. Опыт применения термодинамических методов в экономике // www.cemi.rssi.ru/emm/abst38.htm.
- 10 Сергеев В.М. Пределы рациональности. Термодинамический подход к проблеме экономического равновесия. — М.: Фазис, 1999. — 146 с.
- 11 Цирлин А.М. Математические модели и оптимальные процессы в макросистемах. — М.: Наука, 2006. — 500 с.
- 12 Ранев Г.Г. Измерительные информационные системы. — М.: Изд-во МГОУ, 2003. — 536 с.
- 13 Информационно-измерительная техника и технологии / Под ред. Г.Г. Ранева. — М.: Высш. шк., 2002. — 342 с.
- 14 Информационно-измерительная техника и электроника / Под ред. Г.Г. Ранева. — М.: Academia, 2006. — 452 с.
- 15 Поплавский Р.П. Термодинамика информационных процессов. — М.: Наука, 1981. — 255 с.

- 16 Гусев А.Н., Ремпель А.А. Нанокристаллические материалы. — М.: Физматлит, 2001. — 224 с.
- 17 Шука А.А. Нанозлектроника. — М.: Физматлит, 2007. — 464 с.
- 18 Москалюк В.А., Тимофеев В.И. Перспективные наноструктуры и наноконпоненты электроники // Электроника и связь. — 2010. — № 2. — С. 14–27.
- 19 Блохинцев Д.И. О взаимодействии микросистем с измерительным прибором // УФН. — 1968. — Т. 95, № 1. — С. 75–89.
- 20 Возенкрафт Дж., Джекобс И. Теоретические основы техники связи. — М.: Мир, 1968. — 356 с.
- 21 Уленбек Г. Фундаментальные проблемы статистической механики // УФН. — 1971. — Т. 103, № 2. — С. 275–318.
- 22 Брагинский В.Б. Физические эксперименты с пробными телами. — М.: Наука, 1970. — 178 с.
- 23 Вик Д. Проблема измерений // УФН. — 1970. — Т. 101, № 2. — С. 303–329.
- 24 Тейлор Б., Ландерберг Д., Паркер У. Фундаментальные физические постоянные // УФН. — 1971. — Т. 105, № 3. — С. 575–595.
- 25 Грицай А.В. Экономика предприятий радиоэлектронной промышленности. — Минск: БГУИР, 2006. — 135 с.
- 26 Садовская Т.В. Экономика предприятий радиоэлектронной промышленности. — Минск: БГУИР, 2007. — 152 с.
- 27 Балдин К.В., Уткин В.Б. Информационные системы в экономике. — М.: Дашков и К, 2008. — 236 с.
- 28 Бернштейн Л.А. Анализ финансовой отчетности: теория, практика и интерпретация. — М.: Финансы и статистика, 1996. — 624 с.
- 29 Гейтс Б. Бизнес со скоростью мысли. — М.: Эксмо-Пресс, 2001. — 241 с.
- 30 URL: www.mininginfo.kz.
- 31 Халенов О.С., Колесников В.А., Юров В.М. Датчики влажности на основе нанопористой керамики // Перспективные технологии, оборудование и аналитические системы для материаловедения и наноматериалов: Тр. VIII Междунар. науч. конф. — Ч. 1. — Алматы, 2011. — С. 487–494.
- 32 Колесников В.А., Халенов О.С., Касымов С.С., Байсагов Я.Ж. Информационно-измерительная система для анализа вредных газов // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Материалы 8-й Междунар. науч. конф. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. — С. 468–472.

В.А.Колесников, Я.Ж.Байсагов

Жүйелердің ақпараттық-өлшегіштік ұқсастықтар әдісі және жобалау

Мақалада жүйелердің ақпараттық-өлшегіштік ұқсастықтар әдісін жобалауды талдау үшін қолданылды. Оларға тән параметрлер және экономикалық көрсеткіштер қарастырылған. Жүйе, жылу динамика және микроэкономикамен ақпараттық-өлшегіштік аралығында ұқсастық байқалған. Жүйенің ақпараттық-өлшегіштік жобалаудады, яғни процессордың таңдауы ережесін анықтайтын өрнек алынды. Процессор жадтың көлемімен анықталады, яғни зерттелетін объектен түсетін ақпарат саны және жүйенің ақпараттық-өлшегіштік дәлдіктің қосындысынан шығады. Әдетте соңғы дабыл/шу кері пропорционал қатынасқа және ұтымды мәнге шудың деңгейінің төмендеуінде ұмтылады. Жүйенің отандық ақпараттық-өлшегіштігіне бағаны азайту және (сенсорлар) датчиктерден тек қана ұлғаю есебінен алынатын мәлімет бәсеке күресте ұтысқа қол жеткізетін формула алынды.

V.A.Kolesnikov, Ya.Zh.Baysagov

Analogy method and design information-measuring systems

In this work analogy method is used to analyze the design of information-measuring systems. Considered their characteristic parameters and economic indicators. Constructed an analogy between the information-measuring systems, thermodynamics and microeconomics. We have a formula that determines the rule processor selection in the design of information-measuring system. It follows that the memory of the processor is determined primarily by the product of information from the object under study, and the accuracy of information-measuring system. The latter is usually inversely proportional to the signal / noise ratio and tends to the optimal value when the level of noise. A formula that shows that to reduce the price of the domestic information-measuring system and win the competition, only by increasing the information obtained from the sensors (sensors).

References

- 1 Maxwell J.K. *Izbrannye sochineniya po teorii elektromagnitnogo polya* [Selected writings on the theory of the electromagnetic field], Moscow: Gostehizdat, 1954, p. 12.

- 2 Wilson A.J. *Entropiynye metody modelirovaniya slozhnykh sistem* [Entropy methods of modeling complex systems], Moscow: Nauka, 1978, 246 p.
- 3 Semenov V.V. *Matematicheskoe modelirovanie dinamiki transportnykh potokov megapolisa* [Mathematical modeling of the dynamics of traffic metropolis], Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics of Russian Academy of Sciences, 2004, 32 p.
- 4 Portnov V.S., Jurov V.M. *Izvestiya VUZov. Gornyy zhurnal* [Proceedings of the universities, the Mining Journal], 2004, 6, p. 122–126.
- 5 Jurov V.M., Eshanov A.N., Portnov V.S. *Matematicheskoe modelirovanie i informatsionnye tekhnologii v obrazovanii i nauke: Materialy III mezhdunar. konf.* [Mathematical Modeling and Information Technologies in Education and Science: Proceedings of the III Int. Conf.], Almaty, 2005, 1, p. 234–237.
- 6 Yavorskiy V.V., Jurov V.M. *Prikladnye zadachi termodinamicheskogo analiza neravnovesnykh sistem* [Applied problems in the thermodynamic analysis of nonequilibrium systems], Moscow: Energoatomizdat, 2008, p. 336.
- 7 Bins K., Laurenson P. *Analiz i raschet elektricheskikh i magnitnykh poley* [Analysis and calculation of electric and magnetic fields], Moscow: Energiya, 1970, 376 p.
- 8 Krauze A., Raylin R. *Economics as irreversible (non-reversible) thermodynamic system*, <http://finansbibl.ru/bibl/biblioteka/1.htm>.
- 9 Merkulov V.I. *Experience of application of thermodynamic methods in economics*, www.cemi.rssi.ru/emm/abst38.htm
- 10 Sergeev V.M. *Predely ratsional'nosti. Termodinamicheskii podkhod k probleme ekonomicheskogo ravnovesiya* [Limits of a rationality. A thermodynamic approach to the problem of economic equilibrium], Moscow: Phasis, 1999, 146 p.
- 11 Zirlin A.M. *Matematicheskie modeli i optimal'nye protsessy v makrosistemakh* [Mathematical models and optimal processes in macrosystems], Moscow: Nauka, 2006, 500 p.
- 12 Raneev G.G. *Izmeritel'nye informatsionnye sistemy* [Measuring information systems], Moscow: MGOU Publ., 2003, 536 p.
- 13 *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i tekhnologii* [Information and measuring equipment and technology], Moscow: Vysshaya shkola, 2002, 342 p.
- 14 *Informatsionno-izmeritel'naya tekhnika i elektronika* [Information and measuring equipment and electronics], Moscow: Academia, 2006, 452 p.
- 15 Poplavskiy R.P. *Termodinamika informatsionnykh protsessov* [Thermodynamics of information processes], Moscow: Nauka, 1981, 255 p.
- 16 Gusev A.A., Rempel A.A. *Nanokristallicheskie materialy* [Nanocrystalline materials], Moscow: Fizmatlit, 2001, 224 p.
- 17 Shchuka A.A. *Nanoelektronika* [Nanoelectronics], Moscow: Fizmatlit, 2007, 464 p.
- 18 Moskalyuk V.A., Timofeev V.I. *Elektronika i svyaz'* [Electronics and Communications], 2010, 2, p. 14–27.
- 19 Blokhintsev D.I. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences], 1968, 95, 1, p. 75–89.
- 20 Vozenkraft J., Jacobs I. *Teoreticheskie osnovy tekhniki svyazi* [Theoretical basis of communications technology], Moscow: Mir, 1968, 356 p.
- 21 Ulenbeck G. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences], 1971, 103, 2, p. 275–318.
- 22 Braginskiy V.B. *Fizicheskie eksperimenty s probnymi telami* [Physical experiments with test bodies], Moscow: Nauka, 1970, 178 p.
- 23 Vic D. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences], 1970, 101, 2, p. 303–329.
- 24 Taylor B., Landerberg D., Parker U. *Uspekhi fizicheskikh nauk* [Successes of physical sciences], 1971, 105, 3, p. 575–595.
- 25 Gritsay A.V. *Ekonomika predpriyatiy radioelektronnoy promyshlennosti* [Economy enterprises of electronic industry], Minsk: BSUIR Publ., 2006, 135 p.
- 26 Sadovskaya T.V. *Ekonomika predpriyatiy radioelektronnoy promyshlennosti* [Economy enterprises of electronic industry], Minsk: BSUIR Publ., 2007, 152 p.
- 27 Baldin K.V., Utkin V.B. *Informatsionnye sistemy v ekonomike* [Information systems in the economy], Moscow: Dashkov&K, 2008, 236 p.
- 28 Bernstein L.A. *Analiz finansovoy otchetnosti: teoriya, praktika i interpretatsiya* [Financial Statement Analysis: Theory, Practice and Interpretation], Moscow: Finansy i statistika, 1996, 624 p.
- 29 Gates B. *Biznes so skorost'yu mysli* [Business of the speed of thought], Moscow: Eksmo-Press, 2001, 241 p.
- 30 URL: www.mininginfo.kz.
- 31 Khalenov O.S., Kolesnikov V.A., Yurov V.M. *Perspektivnye tekhnologii, oborudovanie i analiticheskie sistemy dlya materialovedeniya i nanomaterialov: Trudy VIII mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Advanced technology, equipment, and analytical systems for materials and nanomaterials: Proceedings of the VIII International Scientific Conference], Almaty, 2011, 1, p. 487–494.
- 32 Kolesnikov V.A., Khalenov O.S., Kasymov S.S., Baysagov J.Zh. *Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment: Materialy 8-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Chaos and structures in nonlinear systems. Theory and experiment: Proceedings of the 8th International Conference], Karaganda, KSU Publ., 2012, p. 468–472.

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

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

Автоволновые процессы при формировании ионно-плазменных покрытий

В статье обсуждены результаты исследования микротвердости ионно-плазменных покрытий. Для получения покрытий использовались одно- и многокомпонентные плазменные потоки. Осаждение покрытий производилось в атмосфере аргона и азота. Экспериментальные данные показали, что микротвердость покрытий квазипериодически изменяется по поверхности образца. Предложена модель формирования периодической структуры покрытия, основанная на возникновении автоколебательных движений при формировании покрытия за счет концентрационных градиентов компонент осаждаемых потоков.

Ключевые слова: плазма, покрытие, микротвердость, микроструктура, автоволны, давление, неравновесная конденсированная система, адекватные модели.

Введение

Первые режущие пластины с покрытием появились на зарубежном рынке в 1968 г., когда шведской фирмой «Сандвик Коромант» был разработан и внедрен в производство метод осаждения карбида титана на твердосплавный инструмент. В 1971 г. фирмой Teledyne Firth Sterlig (США) были получены покрытия из нитрида титана. В Московском институте стали и сплавов в 1971 г. был разработан метод осаждения покрытия из карбида ниобия. В последующие годы исследователями многих стран (США, Франции, Японии, Великобритании, ФРГ и др.) разрабатывались технологии нанесения различных покрытий различного назначения. Появилось большое число работ, посвященных различным аспектам технологии нанесения покрытий [1–11].

Оказалось, что на свойства покрытий влияет большое количество факторов: состав распыляемых катодов и их физико-химические свойства; свойства подложки, на которую происходит осаждение материала; технологические факторы — ток дуги, давление реакционного газа, температура подложки, величина опорного напряжения и т.д. [1, 12–15].

Разнообразие влияющих факторов породило большое количество технологических приемов формирования покрытий [16–19]. В последние годы наибольшую популярность получили методы осаждения многофазных высокоэнтропийных материалов [20]. Однако использование многоэлементных или многофазных материалов для получения функциональных покрытий порождает многопараметрическую задачу — изменение их состава путем перебора требует больших материальных и временных затрат. В этом случае многие исследователи связывают большие надежды с компьютерным моделированием свойств композиционных материалов и покрытий [21, 22].

Следует отметить, что существует и другой круг исследователей, которые считают, что необходимо возврат к феноменологическому подходу на более высоком уровне обеспечения методами исследования конденсированных систем [23]. При этом идет ссылка на высказывание Нобелевского лауреата И.Пригожина: «...формульно-расчетный подход не может привести к познанию Природы. В настоящее время мы видим, что основную роль стали играть описательные науки» [24].

Автором [23] предлагается релаксационный принцип управления свойствами сложных физико-химических систем, который можно сформулировать таким образом: если времена релаксации системы много больше длительности воздействия ($t_{\text{релаксации}} \gg t_{\text{воздействия}}$), то можно управлять свойствами системы (выход химических форм и фаз, устойчивость), используя сведения о механизмах релаксации в неравновесных системах (для конденсированного вещества на физико-химической стадии релаксационных процессов, в том числе и в процессе эксплуатации).

Релаксационные эффекты в самоорганизующейся неравновесной конденсированной системе можно использовать для управления выходом химических форм и фаз, а следовательно, и свойствами получающихся материалов. Но для этого необходимы точные сведения (или адекватные модели) о механизмах релаксационных процессов в конденсированных системах на физико-химической стадии получения материалов. Их можно получить только при использовании неразрушающих методов фазово-элементного исследования (лучше в режиме *in situ* — реального времени) [25].

Частично соглашаясь с авторами [25], необходимо отметить, что любая сложная конденсированная система имеет множество времен релаксации: ядерная, электронная, фононная подсистемы и т.д., каждая из которых имеет свой набор времен релаксации от пико- до микросекунд и более. Проследить за эволюцией системы от момента ее перехода в неравновесное состояние (возбуждение) до ее возврата в равновесное состояние в режиме реального времени — задача технически очень трудная и во многих случаях нерешенная.

Для ионно-плазменных покрытий процесс их формирования в режиме реального времени пока не наблюдается в силу специфики технологического процесса. Поэтому основная информация получается при варьировании как состава осаждаемого материала, так и технологических параметров осаждения. В связи с этим в данном случае совершенствуются методики исследования уже синтезированных покрытий и модели их формирования (оптическая, электронная, атомно-силовая микроскопия и многие другие экспериментальные методы).

В настоящей работе мы обсуждаем эффект самоорганизации ионно-плазменных покрытий при их формировании на основе модели автоволновых процессов (АВП). Основой для привлечения этой модели послужили полученные нами экспериментальные результаты по исследованию микротвердости ионно-плазменных покрытий.

Объекты и методика эксперимента

Для нанесения покрытий использовались титановые катоды марки ВТ-1-00 по ГОСТу 1908 и катоды из стали марки 12Х18Н10Т. С помощью этих катодов наносились покрытия на установке ННВ-6.БИ1 на стальную подложку в газовой среде аргона и азота в течение 40 мин при токе дуги $I_u = 80$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-3}$ мм рт. ст.

Микроструктура покрытий исследовалась на металлографическом микроскопе EPIQUANT. Микротвердость покрытия измерялась на микротвердомере HVS-1000 А по методу Виккерса вдоль, поперек и по диагонали образцов. Необходимо отметить, что метод измерения микротвердости применяется до настоящего времени для оценки физико-механических свойств металлов, сплавов, металлических покрытий и других материалов. Однако для решения задач физико-химического анализа он перестал использоваться (уступив современным методам: рентгеновская, оже-спектроскопия и т.д), хотя методология и инструментальное исполнение этого метода осуществлены еще в 40-х годах прошлого века и обобщены в монографии [26].

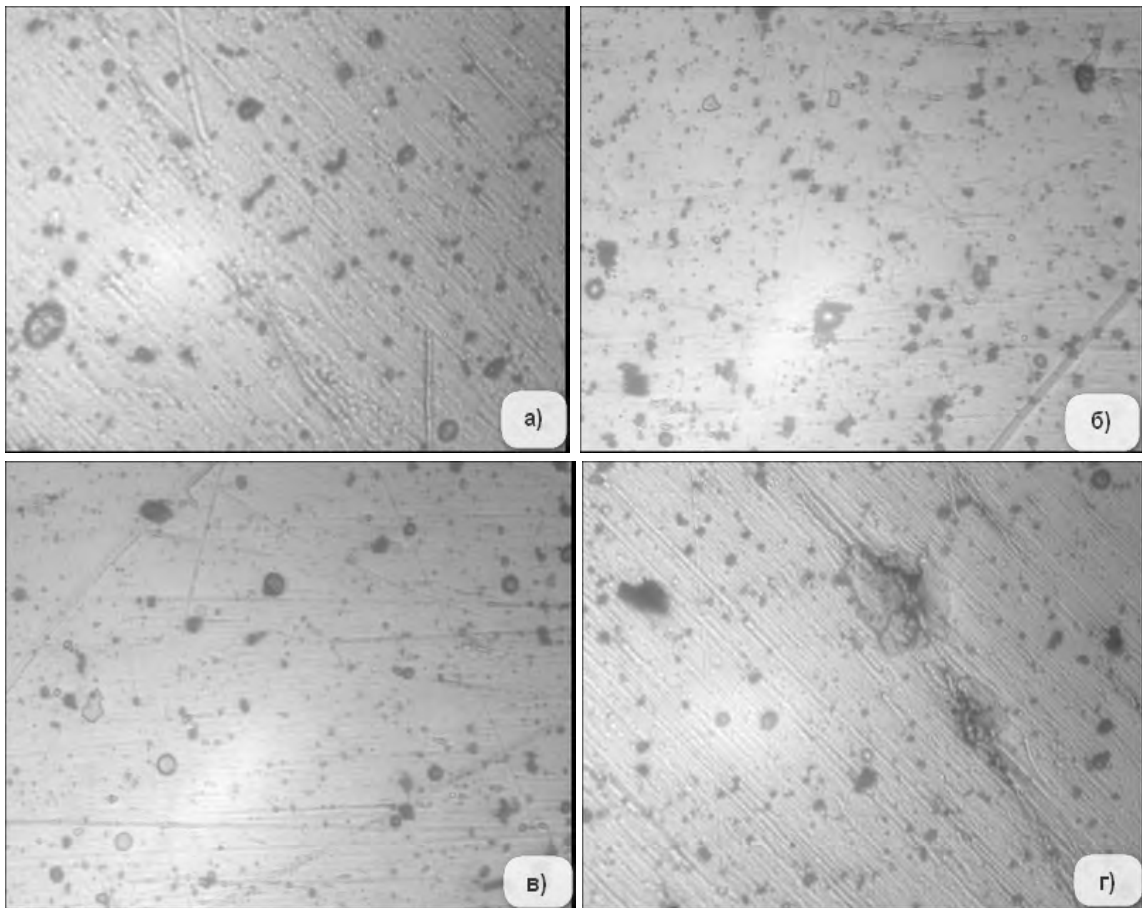
Ниже мы покажем, что использование метода измерения микротвердости может привести к неожиданным результатам.

Результаты эксперимента

На пять модельных образцов из нержавеющей стали было нанесено ионно-плазменное покрытие нитрида титана в течение 40 мин. Микроструктура покрытий показана на рисунке 1. Измерения проводились при нагрузке 0,1 кг, что соответствует 0,989 Н, и времени выдержки нагрузки 15 сек. Следует заметить, что среднее арифметическое значение микротвердости покрытия образцов составляет 483,2 НВ, однако в середине образца № 3 обнаружено крупное пятно, вокруг которого микротвердость резко увеличилась до 1388,4 НВ, внутри самого же пятна она была чуть меньше — 922,2 НВ (рис. 2). Появление такого пятна не соответствует образованию капельной фазы, микротвердость которой должна быть значительно меньше. Мы связываем наблюдаемый эффект с образованием сверхтвердой нанокристаллической фазы.

На рисунке 3 показано изменение микротвердости нитрид титанового покрытия поперек и по диагонали образца. Как видно из рисунка 3, изменение микротвердости носит «квазипериодический» характер. В литературе мы не нашли подобного рода исследований.

Следующим этапом наших исследований было нанесение многослойных покрытий. На четыре образца из нержавеющей стали послойно через каждые 10 мин в течение 40 мин было нанесено ионно-плазменное покрытие, состоящее из стали марки 12Х18Н10Т и титана в газовой среде аргона при токе испарения $I_u = 80$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 5 \times 10^{-5}$ мм рт. ст. Микроструктура полученных покрытий показана на рисунке 4.



а, в — в середине образца; *б, г* — по краям образца

Рисунок 1. Микроструктура нитрид титанового покрытия образца

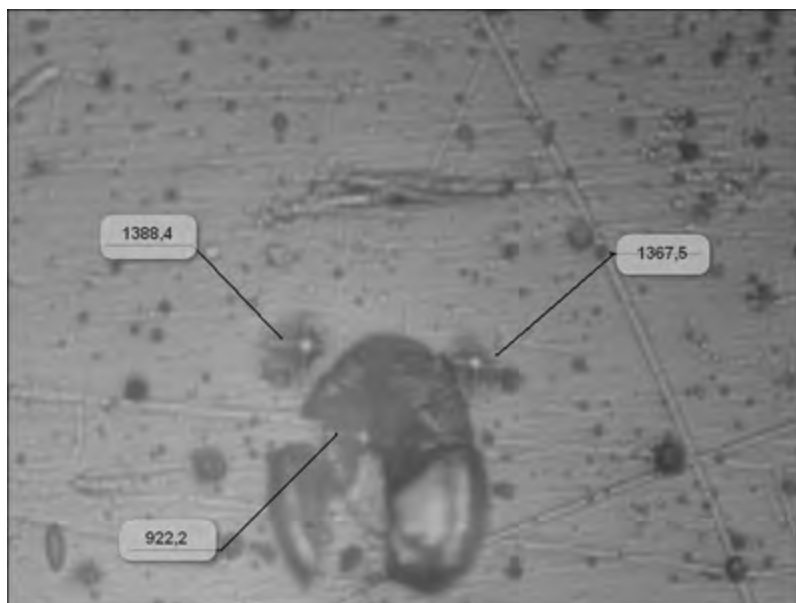


Рисунок 2. Микротвердость вокруг пятна и самого пятна

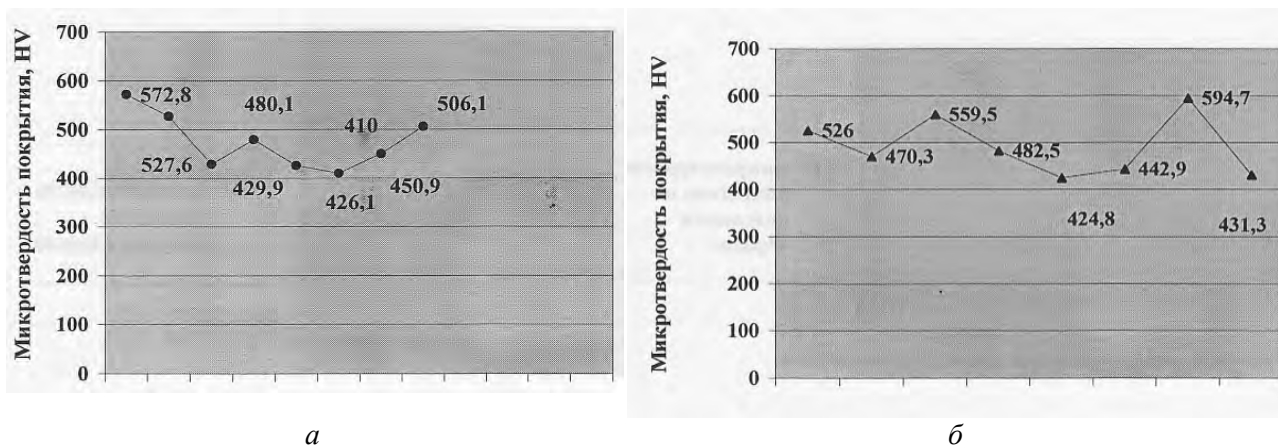


Рисунок 3. Микротвердость нитрид титанового покрытия поперек (а) и по диагонали образца (б)

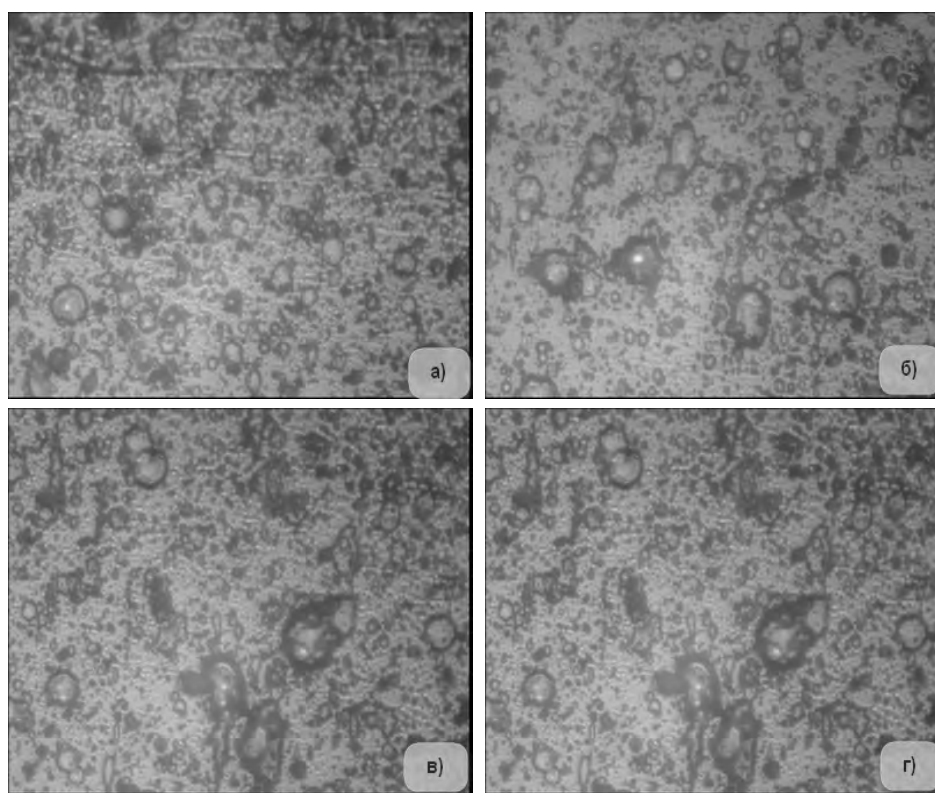


Рисунок 4. Микроструктура многослойного покрытия 12X18N10T + Ti (10/10 мин) в газовой среде аргона на четырех образцах

В отличие от предыдущего случая, здесь наблюдается более крупнозернистая структура покрытия. Среднее значение микротвердости покрытия образцов составляет 526,6 HV, что на 43 HV превышает предыдущий случай. В практическом плане это означает, что для повышения износостойкости деталей лучше использовать многослойные покрытия.

На рисунке 5 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Нами проведен также эксперимент при одновременном распылении катодов титана и 12X18N10T. На пять образцов из нержавеющей стали было нанесено ионно-плазменное покрытие, состоящее из стали марки 12X18N10T и титана в газовой среде аргона, в течение 40 мин при токе испарения титана $I_u = 80$ А и токе испарения стального катода $I_u = 60$ А, опорном напряжении $U_{on} = 200$ В и давлении газа в камере $P = 1 \times 10^{-3}$ мм рт. ст. Полученная при этом микроструктура покрытий показана на рисунке 6.

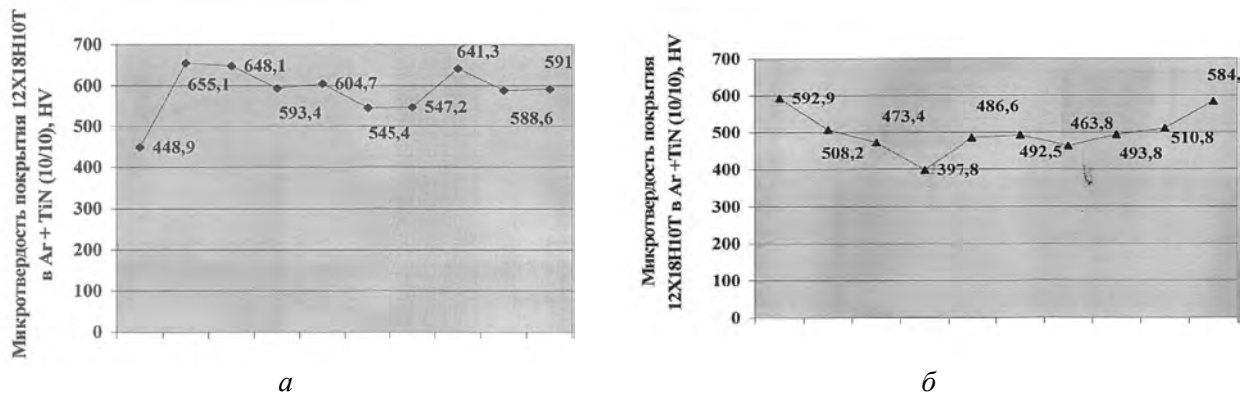


Рисунок 5. Микротвердость многослойного покрытия 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона поперек (а) и по диагонали (б) образца

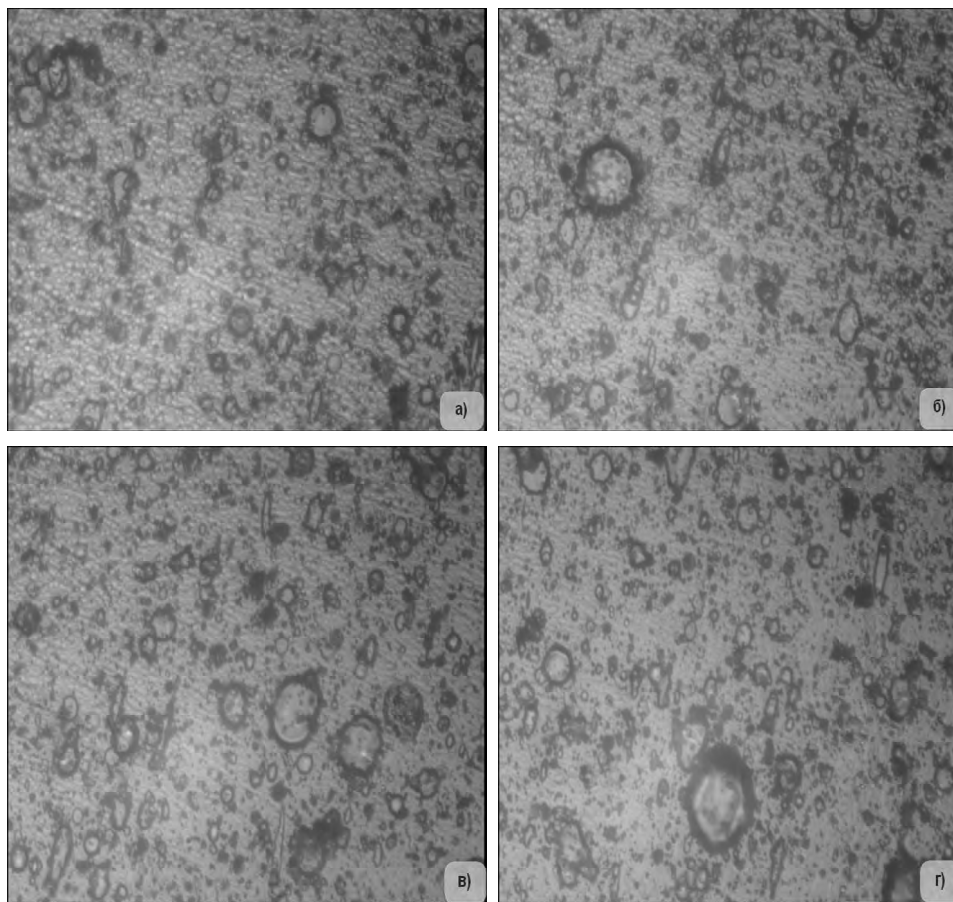
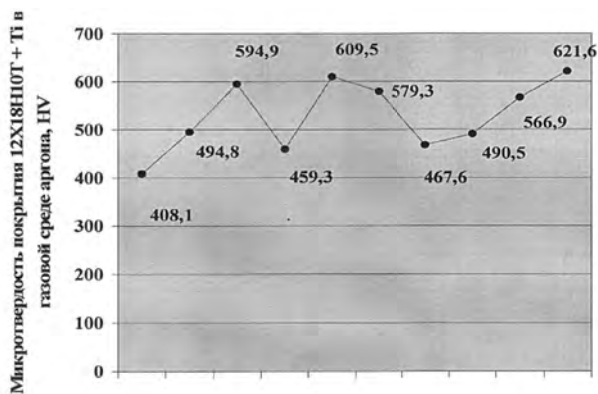


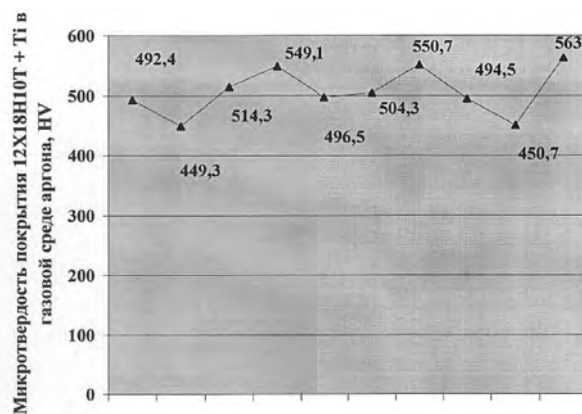
Рисунок 6. Микроструктура покрытия 12X18H10T + Ti в газовой среде аргона на четырех образцах

В этом случае микроструктура покрытия имеет большое сходство с многослойным покрытием, но среднее значение микротвердости составляет 473,3 HV, что меньше, чем в предыдущем случае, и практически совпадает с первым случаем. На рисунке 7 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Нами проведен также эксперимент при одновременном распылении катодов титана и 12X18H10T в среде азота. Микроструктура покрытий показана на рисунке 8.

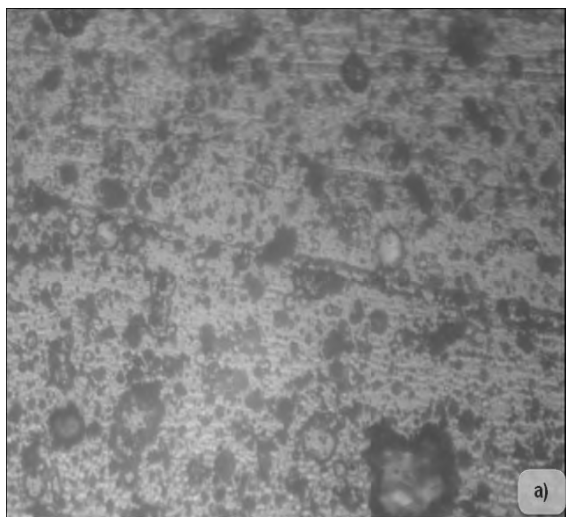


a

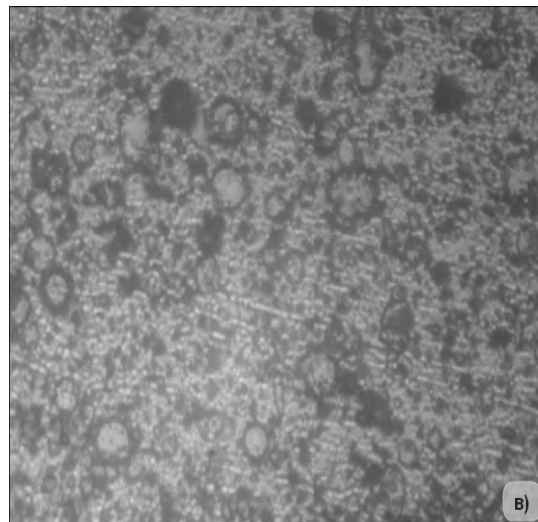


б

Рисунок 7. Микротвердость покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде аргона поперек (*a*) и по диагонали (*б*) образца

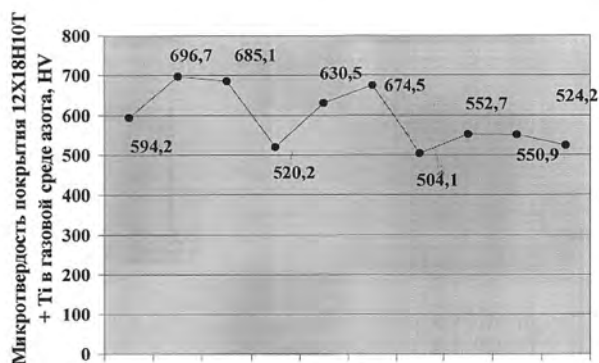


a)

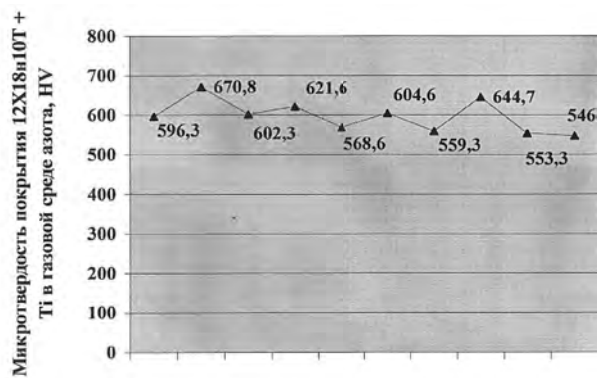


б)

Рисунок 8. Микроструктура покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде азота на двух образцах



a



б

Рисунок 9. Микротвердость покрытия 12X18N10T + Ti в газовой среде азота поперек (*a*) и по диагонали (*б*) образца

В этом случае микроструктура покрытия также имеет сходство с предыдущими структурами. Среднее значение микротвердости покрытия образцов составляет 522,7 НВ, что практически совпадает со значением микротвердости многослойного покрытия. Таким образом, износостойкость детали

можно повысить как при использовании многослойных покрытий, так и при одновременном распылении различных катодов. В технологическом плане одновременное распыление различных катодов осуществлять легче, чем нанесение многослойных покрытий.

На рисунке 9 показано изменение микротвердости покрытия поперек и по диагонали образца. В этом случае также наблюдается «квазипериодическое» изменение микротвердости.

Обсуждение результатов эксперимента

Из приведенных выше экспериментальных исследований видно, что формирование ионно-плазменного покрытия в пространственных координатах следует «квазипериодическому» закону, т.е. отвечает некоторому автоволновому процессу (АВП). Под АВП принято понимать самоподдерживающийся в активной нелинейной среде волновой процесс (включая стационарные структуры), сохраняющий свои характеристики постоянными за счет распределенного в среде источника энергии [27]. Эти характеристики — период, длина волны (или импульса), скорость распространения, амплитуда и форма — в установившемся режиме зависят только от локальных свойств среды, не зависят от начальных и достаточно далеки от границ среды и от краевых условий. При этом в пространстве предполагается связь посредством переноса диффузионного типа.

Сами термины «автоволновой процесс», «автоволна» (АВ) были предложены Р.В.Хохловым, хотя теория автоволн была развита математиками — работы Р.Фишера (1937), А.Н.Колмогорова, Г.И.Петровского и И.С.Пискунова (1937), Н.Винера и А.Розенблюта (1946), А.Тьюринга (1952) — задолго до их экспериментального открытия [27]. В последующем теория АВП стала неотъемлемой частью теории самоорганизации, или синергетики [28–30].

Большой класс АВ-сред условно можно описать с помощью следующей схемы. В открытую распределенную систему извне поступает энергия или вещество, богатое энергией. Эти потоки управляются локальными свойствами регулирующей поверхности или, точнее, пограничного слоя малой толщины. В свою очередь локальные свойства поверхности зависят как от волн температуры, потенциала концентрации, распространяющихся вдоль тонкого пограничного слоя, так и от процессов, происходящих в подложке. К таким системам относятся волны окисления аммиака и углерода на платине и ряд других [27].

Во втором классе АВ-сред поверхностные эффекты не столь выражены. Локальная положительная обратная связь обеспечивает наличие N-образной характеристики среды с падающим участком «отрицательного» сопротивления в любом элементарном объеме. К таким средам и пространственно-временным структурам в них относятся автоколебательные реакции Белоусова-Жаботинского, домены в электронно-дырочной плазме полупроводников и ряд других [28].

К третьему классу можно отнести сложные многофазные среды, в которых неравновесность и АВП поддерживаются за счет энергии лазерного излучения, энергии ионной плазмы, как в наших экспериментах, термохимических реакций и других источников. Подобные явления определяются не только диффузией и теплопередачей, но и гидродинамическими потоками, в частности конвекцией, испарением, кипением, поверхностным натяжением. Образование структур с участием поверхностных явлений рассматривалось в монографии [31] и нами в работе [32].

Из приведенных выше рассуждений следует, что рассматриваемые явления, наблюдаемые в наших экспериментах, относятся к третьему классу, хотя при определенных упрощениях их можно отнести и к первому.

Основой моделей, описывающих процессы в активной распределенной кинетической системе, служат уравнения материального баланса:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) - \text{div } I_i. \quad (1)$$

Здесь x_i — взаимодействующие между собой компоненты; I_i — поток i -го компонента:

$$I_i = Vx_i - \sum_{k=1}^n D_{ik} \text{grad } x_k, \quad (2)$$

где V — направленная скорость движения компонента, а D_{ik} — матрица коэффициентов диффузии.

В простейшем случае одномерного пространства уравнения (1)–(2) запишутся следующим образом:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n) + \frac{\partial}{\partial r} \left(\sum_{k=1}^n D_{ik}(x_1, x_2, \dots, x_n) \frac{\partial x_k}{\partial r} \right). \quad (3)$$

Краевые условия систем (1)–(3) определяются конкретными задачами, но наиболее часто используются условия «непроницаемости» границ конечного отрезка $[0, L]$:

$$\left. \frac{\partial x_i}{\partial t} \right|_{r=0} = \left. \frac{\partial x_i}{\partial t} \right|_{r=L} = 0. \quad (4)$$

При этих условиях система максимально автономна и характер АВП менее всего подвержен влиянию границ.

Если перемешивание внутри «объема» $[0, L]$ происходит достаточно быстро, то в любой его части процессы синхронны и система описывается так называемыми «точечными» уравнениями [27]:

$$\frac{\partial x_i}{\partial t} = F_i(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (5)$$

Формально от системы (3) к (5) можно перейти при $D_{ik} \rightarrow \infty$. Физически это означает, что переход к (5) отвечает нулевому приближению по отношению характерных времен диффузии к химическим процессам.

В наших экспериментах приближение (5) не может быть применено. Это отчетливо видно из рисунков 3, 5, 7, 9, где длина волны составляет порядка 10^{-4} м, т.е. скорость массопереноса равна $\sim 10^{-4}$ м/с. Поскольку скорость массопереноса $V \approx \sqrt{D/t}$, то для коэффициента диффузии получаем оценку $D \sim 10^{-8}$ м²/с. Это отвечает режиму малой диффузии.

В монографии [33] предпринимается попытка создания единой теории диссипативных структур Тьюринга-Пригожина для систем параболических и гиперболических уравнений с малой диффузией. Для этого развиваются специальные асимптотические методы исследования проблем существования и устойчивости высококомодовых стационарных режимов в сингулярно возмущенных системах, позволяющие получить весьма тонкие утверждения о неограниченном росте количества устойчивых диссипативных структур (как стационарных, так и периодических по времени) при уменьшении коэффициентов диффузии и при фиксированных прочих параметрах.

В качестве модельной системы в [33] берется уравнение типа (3)

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \nu D \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + F(u). \quad (6)$$

Здесь параметр $\nu > 0$ отвечает за пропорциональное изменение коэффициентов диффузии. Основное предположение о краевой задаче (6) заключается в том, что $u = 0$ — единственное ее пространственно однородное состояние равновесия, глобально экспоненциально устойчивое в рамках точечной модели (5). Однако такая модель содержит внутреннее противоречие, поскольку точечная модель (5) применима при $D_{ik} \rightarrow \infty$. Поэтому мы не будем останавливаться на модели (6). Отметим лишь, что теория диссипативных структур еще далека от своего завершения.

Нелинейные свойства среды, когда возникают условия для возникновения диссипативных структур, можно получить не только при предположении о нелинейности функции F в задачах (1)–(3) и (6), но и при наложении других условий на отрезке $[0, L]$, например, задавая произвольный закон движения границы L . В этом случае мы приходим к нелинейным задачам Стефана, которые также допускают решения в виде АВП.

Подобный подход осуществлен нами в работе [34]. Для плотности потока атомов или ионов, формирующих покрытие, мы получили следующее уравнение:

$$\rho(r, t) = \text{const} \cdot J_0 \left(\frac{2r}{R} \right) \cdot \frac{1}{\beta(t)}, \quad (7)$$

где J_0 — функция Бесселя нулевого порядка; r — текущая координата; R — геометрический размер подложки; $\beta(t)$ — скорость движения раздела фаз.

Уравнение (7) неплохо описывает полученные нами экспериментальные данные при автоматическом законе движения границы L .

Заключение

Таким образом, в настоящей работе экспериментально обнаружено существование автоволновых процессов при формировании ионно-плазменных покрытий, приводящих к образованию диссипативных структур. Детальный теоретический анализ АВП в нашей системе вызывает пока определенные трудности, хотя общая картина процесса вытекает из всех описанных в работе моделей. Бу-

дущая модель должна не только предсказывать существование диссипативных структур, но и содержать параметры процесса с тем, чтобы управлять свойствами получаемых покрытий.

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

Список литературы

- 1 Барвинок В.А. Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий. — М.: Машиностроение, 1990. — 384 с.
- 2 Михайлов А.Н., Михайлов В.А., Михайлова Е.А. Ионно-плазменные вакуумные покрытия — основа широкого повышения качества изделий машиностроения // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. науч. тр. — Донецк: ДонНТУ, 2004. — Вып. 28. — С. 108–115.
- 3 Берлин Е., Двинин С., Сейдман Л. Вакуумная технология и оборудование для нанесения и травления тонких пленок. — М.: Техносфера, 2007. — 472 с.
- 4 Решетняк Е.Н., Стрельницкий В.Е. Синтез упрочняющих наноструктурных покрытий // Вопросы атомной науки и техники. — 2008. — № 2. — С. 119–130.
- 5 Palumbo G., Erb U., Aust K. Triple line delamination effect on the mechanical behavior of materials // Scripta Metallurgica et Materialia. — 1990. — Vol. 24. — P. 1347–1350.
- 6 Veprek S., Veprek-Heijman M., Karvankova P. et al. Different approaches to superhard coatings and nanocomposites // Thin Solid Films. — 2005. — Vol. 476. — P. 1–29.
- 7 Zwan R.F., Veprek S. Crystalline-to-amorphous transition in $Ti_{1-x}Si_xN$ solid solution and the stability of free SiN studied by combined ab initio density functional theory and thermodynamic calculation // Physical review. — 2007. — Vol. 76. — P. 174–185.
- 8 Watanabe H., Sato Y., Nie C. et al. The mechanical properties and microstructure of Ti-Si-N nanocomposite films by ion plating // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 169–170. — P. 452–455.
- 9 Carvalho S., Ribeiro E., Rebouta L. et al. Effect of morphology and structure on the elastic behavior of (Ti, Si, Al)N nanocomposites // Surf. and Coat. Technol. — 2003. — Vol. 174–175. — P. 984–991.
- 10 Flink A., Larson T., Sjolen J. et al. Influence of Si on the microstructure of arc evaporated (Ti, Si)N thin films; evidence for cubic solid solutions and their thermal stability // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 200. — P. 1535–1542.
- 11 Li Z.G., Mori M., Miyake S. et al. Structure and properties of Ti-Si-N films prepared by ISP assisted magnetron sputtering // Surf. and Coat. Technol. — 2005. — Vol. 193. — P. 345–349.
- 12 Юров В.М., Гученко С.А., Ибраев Н.Х. Влияние технологических параметров на свойства ионно-плазменных композиционных покрытий // Вестник КарГУ. Сер. Физика. — 2010. — № 4(60). — С. 28–38.
- 13 Кривообоков В.П., Сочугов Н.С., Соловьев А.А. Плазменные покрытия (свойства и применение). — Томск: Изд-во Томского политехн. ун-та, 2011. — 137 с.
- 14 Соколов И.В. Закономерности формирования структуры в поверхностном слое деталей из конструкционных металлических материалов в процессе вакуумной ионно-плазменной обработки: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. — М., 2009. — 23 с.
- 15 Гасанов И.С. Плазменная и пучковая технология. — Баку: Элм, 2007. — 175 с.
- 16 Thornton J.A. Structure and topography of sputtering coatings // Ann. Rev. Material Sci. — 1977. — Vol. 7. — P. 239–260.
- 17 Barna P.B., Adamik M. Formation and Characterization of the structure of surface coating // Protective Coatings and Thin Films / Ed. Y.Pfleau, P.B.Barna. — Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, 1977. — P. 279–297.
- 18 Vlasek J. Magnetron sputtering of hard nanocomposite coatings and their properties // J. Surf. Coat. Technol. — 2001. — Vol. 142–144. — P. 557–566.
- 19 Псахье С.Г., Зольников К.П., Коноваленко И.С. Синтез и свойства нанокристаллических и субструктурных материалов. — Томск: Изд-во Томск. ун-та, 2007. — 264 с.
- 20 Соболев О.В., Андреев А.А., Горбань В.Ф. и др. О воспроизводимости однофазного структурного состояния многоэлементной высокоэнтропийной системы Ti-V-Zr-Nb-Ni и высокопрочных нитридов на ее основе при их формировании вакуумно-дуговым методом // Письма в ЖТФ. — 2012. — Т. 38, Вып. 13. — С. 40–47.
- 21 Панин В.Е., Макаров П.В., Псахье С.Г. и др. Физическая мезомеханика и компьютерное конструирование материалов: В 2 т. — Новосибирск: Наука, 1995. — Т. 2. — 320 с.
- 22 Усанов Д.А., Скрипаль Ал.В., Скрипаль Ан.В., Абрамов А.В. Компьютерное моделирование микро- и наноструктур. — Саратов, 2008. — 100 с.
- 23 Аблесимов Н.Е. Релаксационные эффекты и фазообразование в неравновесных конденсированных системах: Автореф. дис. ... д-ра хим. наук. — Новосибирск, 2000. — 38 с.
- 24 Пригожин И., Кондепуди Д. Современная термодинамика. От тепловых двигателей до диссипативных структур. (Послесловие). — М.: Мир, 2002. — С. 441.
- 25 Бондаревский С.И., Аблесимов Н.Е. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Самооблучение в результате радиоактивного распада. — Владивосток: Дальнаука, 2002. — 232 с.
- 26 Глазов В.М., Вигдорович В.Н. Микротвердость металлов. — М.: Гостехиздат, 1962. — 224 с.
- 27 Васильев В.А., Романовский Ю.М., Яхно В.Г. Автоволновые процессы. — М.: Наука, 1987. — 240 с.
- 28 Хакен Г. Информация и самоорганизация: Макроскопический подход к сложным системам. — М.: Мир, 1991. — 240 с.

29 Заславский Г.М. Физика хаоса в гамильтоновых системах. — Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2004. — 288 с.

30 Анищенко В.С., Вадивасова Т.Е., Шиманский-Гайер Л. Динамическое и статистическое описание колебательных систем. — Москва-Ижевск: Ин-т компьютерных исследований, 2005. — 156 с.

31 Khrig E., Beberdich H. Dissipative Structures. — Leipzig: VEB Georg Thieme, 1977. — 342 p.

32 Юров В.М., Лауринас В.Ч., Гученко С.А., Завацкая О.Н. Образование ячеистой наноструктуры при формировании ионно-плазменных покрытий // Хаос и структуры в нелинейных системах. Теория и эксперимент: Тр. 8-й Междунар. науч. конф. — Караганда: Изд-во КарГУ, 2012. — С. 288–294.

33 Мищенко Е.Ф., Садовничий В.А., Колесов А.Ю., Розов Н.Х. Автоволновые процессы в нелинейных средах с диффузией. — М.: Физматлит, 2010. — 395 с.

34 Юров В.М. Некоторые вопросы физики поверхности твердых тел // Вестн. КарГУ. Сер. Физика. — 2009. — № 1 (53). — С. 45–54.

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

Ионды-плазмалық жабуларды қалыптастырған кездегі автотолқынды процестер

Мақалада ионды-плазмалық жабулардың микрокатандығын зерттеу нәтижелері талданды. Жабуларды жасау үшін бір және көп камералы плазмалық ағындар пайдаланылды. Жабуларды жасағанда аргон және азот атмосферасы қолданылды. Эксперименттік мәліметтер бойынша, жабулардың микрокатандығы үлгі бетінде квазипериодты өзгеретіні байқалды. Жабулардың периодтық құрылымын қалыптастыруға арналған модель ұсынылды. Модель теориясының негізі жабуларды қалыптастырған кезде буландырылатын ағындар компоненттерінің концентрациялық градиенті есебінен пайда болатын автотербелістік қозғалыстардың тууына негізделген.

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

Autowave processes at formation Ionic-plasma coverings

In work results of research of microhardness of ionic-plasma coverings are discussed. For reception of coverings unicomponent and multicomponent plasma streams were used. Sedimentation of coverings was made in argon and nitrogen atmosphere. Experimental data show, that microhardness of coverings quasiperiodical changes on a surface of the sample. The model of formation of periodic structure of a covering is offered. The model is based on occurrence of self-oscillatory movements at formation of a covering at the expense of concentration gradients a component of besieged streams.

References

1 Barvinok V.A. *Upravlenie napryazhennym sostoyaniem i svoystva plazmennyykh pokrytiy* [Management of an intense condition and properties of plasma coverings], Moscow: Mashinostroenie, 1990, 384 p.

2 Mikhaylov A.N., Mikhaylov V.A., Mikhaylova E.A. *Progressivnye tekhnologii i sistemy mashinostroeniya: Mezhdunarodnyy sbornik nauchnykh trudov* [Progressive technologies and mechanical engineering systems: International Collection of Scientific Works], Donetsk: DNTU Publ., 2004, 28, p. 108–115.

3 Berlin E., Dvinin S., Seydman L. *Vakuumnaya tekhnologiya i oborudovanie dlya naneseniya i travleniya tonkikh plenok* [Vacuum technology and the equipment for drawing and etching of thin films], Moscow: Tekhnosfera, 2007, 472 p.

4 Reshetnyak E.N., Strel'nitskiy V.E. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki* [Questions of a nuclear science and technics], 2008, 2, p. 119–130.

5 Palumbo G., Erb U., Aust K. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 1990, 24, p. 1347–1350.

6 Veprek S., Veprek-Heijman M., Karvankova P. et al. *Thin Solid Films*, 2005, 476, p. 1–29.

7 Zwang R.F., Veprek S. *Physical review*, 2007, 76, p. 174–185.

8 Watanabe H., Sato Y., Nie C. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2003, 169–170, p. 452–455.

9 Carvalho S., Ribeiro E., Rebouta L. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2003, 174–175, p. 984–991.

10 Flink A., Larson T., Sjolen J. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2005, 200, p. 1535–1542.

11 Li Z.G., Mori M., Miyake S. et al. *Surf. and Coat. Technol.*, 2005, 193, p. 345–349.

12 Yurov V.M., Guchenko S.A., Ibraev N.Kh. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika* [Messenger of the Karaganda university, Ser. Physics], 2010, 4(60), p. 28–38.

- 13 Krivobokov V.P., Sochugov N.S., Solov'ev A.A. *Plazmennye pokrytiya (svoystva i primenenie)* [Plasma coverings (properties and application)], Tomsk: Tomsk polytechnical university Publ., 2011, 137 p.
- 14 Sokolov I.V. *Zakonomernosti formirovaniya struktury v poverkhnostnom sloe detaley iz konstruksionnykh metallicheskih materialov v protsesse vakuumnoy ionno-plazmennoy obrabotki: Avtoreferat dis.* [Laws of formation of structure in a blanket of details from constructional metal materials in the course of vacuum ionic-plasma processing: Dis. abstract], Moscow, 2009, 23 p.
- 15 Gasanov I.S. *Plazmennaya i puchkovaya tekhnologiya* [Plasma and beam technology], Baku: Elm, 2007, 175 p.
- 16 Thornton J.A. *Ann. Rev. Material Sci.*, 1977, 7, p. 239–260.
- 17 Barna P. B., Adamik M. *Protective Coatings and Thin Films*, 1977, Kluwer Academic, Dortrecht, The Netherlands, p. 279–297.
- 18 Vlasek J. J. *Surf. Coat. Technol.*, 2001, 142–144, P. 557–566.
- 19 Psakh'e S.G., Zol'nikov K.P., Konovalenko I.S. *Sintez i svoystva nanokristallicheskih i substrukturnykh materialov* [Synthesis and properties of nanocrystals and substructural materials], Tomsk: Tomsk State Univ. Publ., 2007, 264 p.
- 20 Sobol' O.V., Andreev A.A., Gorban' V.F. et al. *Pis'ma v ZhTF* [Letters in JTF], 2012, 38, 13, p. 40–47.
- 21 Panin V.E., Makarov P.V., Psakh'e S.G. et al. *Fizicheskaya mezomekhanika i komp'yuternoe konstruirovaniye materialov* [The physical mesomechanics and computer designing of materials], Novosibirsk: Nauka, 1995, 2, 320 p.
- 22 Usanov D.A., Skripal' A.I.V., Skripal' An.V., Abramov A.V. *Komp'yuternoe modelirovaniye mikro- i nanostruktur* [Computer modelling micro and nanostructures], Saratov, 2008, 100 p.
- 23 Ablesimov N.E. *Relaksatsionnye efekty i fazoobrazovanie v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemakh: Avtoref. dis.* [Relaxation effects and formation of phases in the nonequilibrium condensed systems: Dis. abstract], Novosibirsk, 2000, 38 p.
- 24 Prigozhin I., Kondepudi D. *Sovremennaya termodinamika. Ot teplovykh dvigateley do dissipativnykh struktur (Posleslovie)* [The modern thermodynamics. From thermal engines to dissipative structures (Epilogue)], Moscow: Mir, 2002, p. 441.
- 25 Bondarevskiy S.I., Ablesimov N.E. *Relaksatsionnye efekty v neravnovesnykh kondensirovannykh sistemakh. Samooblucheniye v rezul'tate radioaktivnogo raspada* [Relaxation effects in the nonequilibrium condensed systems. A self-irradiation as a result of radioactive disintegration], Vladivostok: Dal'nauka, 2002, 232 p.
- 26 Glazov V.M., Vigdorovich V.N. *Mikrotverdost' metallov* [Microhardness of metals], Moscow: Gostechizdat, 1962, 224 p.
- 27 Vasil'ev V.A., Romanovskiy Yu.M., Yakhno V.G. *Avtovolnovyye protsessy* [Autowave processes], Moscow: Nauka, 1987, 240 p.
- 28 Khaken G. *Informatsiya i samoorganizatsiya: Makroskopicheskiy podkhod k slozhnym sistemam* [The information and self-organising: the Macroscopical approach to difficult systems], Moscow: Mir, 1991, 240 p.
- 29 Zaslavskiy G.M. *Fizika khaosa v gamil'tonovykh sistemakh* [Physics of chaos in hamilton systems], Moscow-Izhevsk: Institute of computer researches, 2004, 288 p.
- 30 Anishchenko V.S., Vadivasova T.E., Shimanskiy-Gayer L. *Dinamicheskoe i statisticheskoe opisaniye kolebatel'nykh sistem* [The dynamic and statistical description of oscillatory systems], Moscow-Izhevsk: Institute of computer researches, 2005, 156 p.
- 31 Kahrig E., Beberdich H. *Dissipative Strukturen*, Leipzig: VEB Georg Thieme, 1977, 342 p.
- 32 Yurov V.M., Laurinas V.Ch., Guchenko S.A., Zavatskaya O.N. *Khaos i struktury v nelineynykh sistemakh. Teoriya i eksperiment: Trudy 8-y Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Chaos and structures in nonlinear systems. The theory and experiment: Works of the VIII International scientific conference], Karaganda: KarSU Publ., 2012, p. 288–294.
- 33 Mishchenko E.F., Sadovnichiy V.A., Kolesov A.Yu., Rozov N.Kh. *Avtovolnovyye protsessy v nelineynykh sredakh s diffuziey* [Autowave processes in nonlinear environments with diffusion], Moscow: Fizmatlit, 2010, 395 p.
- 34 Yurov V.M. *Vestnik Karagandinskogo universiteta. Ser. Fizika* [Messenger of the Karaganda university, Ser. Physics], 2009, 1(53), p. 45–54.

А.Д.Мехтиев, М.Ш.Алимов, И.В.Боборыкин, С.В.Дворкин, В.С.Муравлев

*Карагандинский государственный технический университет
(E-mail: barton.kz@mail.ru)*

Применение сенсорных сетей для мониторинга и локального определения местоположения в промышленности

В статье предложено применение сенсорных сетей в горной промышленности. Описаны характеристики и принцип построения сенсорных сетей. Выполнено сравнение с наиболее близкими беспроводными технологиями. Высокая экономичность установки, использования и обслуживания сетей позволит сократить экономические затраты предприятия. Внедрение сенсорных сетей в промышленность создаст надежные и экономичные системы мониторинга, определения местоположения и связи.

Ключевые слова: сенсоры, сенсорные сети, диспетчерские системы, интеллектуальные сети, беспроводные устройства, обмен информацией.

Начиная с 70-х годов прошлого столетия в развитых угледобывающих странах началось создание и внедрение автоматизированных систем контроля и управления горным производством. На предприятиях угледобывающей отрасли остро стоит задача мониторинга технологических процессов. Использование кабельных коммуникаций для сбора данных с различных датчиков затруднительно, а иногда и невозможно (например, если речь идет о мониторинге персонала шахты). Постоянное снижение стоимости беспроводных решений и повышение их эксплуатационных характеристик позволяют постепенно отказываться от проводов и проводных сетей в системах сбора телеметрических данных, диагностики оборудования и обмена информацией. Использование сетей беспроводных устройств позволяет создать диспетчерскую систему, обеспечивающую оператору непрерывный доступ к информации о состоянии обслуживаемых объектов [1].

Современные технические возможности позволяют создавать системы различной архитектуры и сложности: от управления отдельными механизмами до систем, охватывающих контроль процессов и параметров всего предприятия.

U-сети принципиально изменяют как возможности общества, так и возможности его членов. В настоящее время известны проекты по созданию u-Korea, u-Japan, u-Russia.

Новейшие технологии беспроводной связи и прогресс в области производства микросхем позволили в течение последних нескольких лет перейти к практической разработке и внедрению нового класса распределенных коммуникационных систем — сенсорных сетей.

Сенсорные сети представляют собой распределенное в пространстве множество датчиков и исполнительных устройств, объединенных между собой посредством радиоканала.

Применение беспроводной связи для сбора данных актуально во многих прикладных задачах, например:

- автоматический съем показаний квартирных счетчиков;
- системы мониторинга в промышленной и домашней автоматизации;
- мониторинг состояния несущих конструкций зданий и сооружений и т.д.

Сенсорная сеть способна выполнять сбор, обработку и передачу информации с высокими требованиями по автономности, надежности, масштабируемости и распределенности сети.

Основные преимущества сенсорных сетей:

- оперативность и экономичность развертывания;
- простота установки и обслуживания;
- длительная автономная работа;
- отказоустойчивость и надежность в жестких условиях эксплуатации;
- ремонтпригодность в местных условиях;
- широкая область применения.

Сенсорные сети уже используются во многих странах для определения местоположения подвижных узлов, в том числе и в нашей стране.

Целью является внедрение сенсорной сети в горнодобывающую промышленность, где нужен постоянный мониторинг персонала и оборудования из-за присутствия повышенной опасности обвалов и взрывов.

Актуальностью внедрения сенсорных сетей в различные сферы промышленности и человеческой деятельности является создание надежной и дешевой системы сбора данных и определения локального местоположения, что позволит своевременно получать информацию, избегать и предупреждать аварийные ситуации и проводить быстрый поиск людей в аварийных ситуациях. Подобные сети не нуждаются в дорогостоящем обслуживании, а при нынешних темпах развития технологий производства, оборудование для них с каждым годом дешевеет. Сеть является интеллектуальной, что дает ей возможность проводить обработку поступившей информации на ранних этапах сбора данных, экономя при этом и время, и деньги. Сенсорные сети имеют широкий спектр применения и могут быть внедрены в любую сферу человеческой жизни.

В сравнении с другими беспроводными технологиями, сенсорные сети имеют ряд преимуществ. Если такие технологии, как Wi-Fi и Wimax, не уступают в скорости передачи данных, а в некоторых случаях даже превосходят сенсорные сети, то затраты на обслуживание этих технологий в несколько раз больше. Сетям Wi-Fi и Wimax требуются дополнительные источники питания, дорогое техническое обслуживание, а также плата за предоставление услуг. Сенсорные сети имеют автономные источники питания, которых хватает в среднем на 5 лет, и просты в обслуживании, что значительно снижает эксплуатационные затраты. На рисунке 1 представлен график, где указаны сравнительные затраты на покупку оборудования, установку и обслуживание для большого предприятия для технологий Wi-Fi, Wimax и сенсорных сетей.

На рисунке 2 представлен сравнительный график итоговых эксплуатационных затрат за 10 лет для технологий Wi-Fi, Wimax и сенсорных сетей.

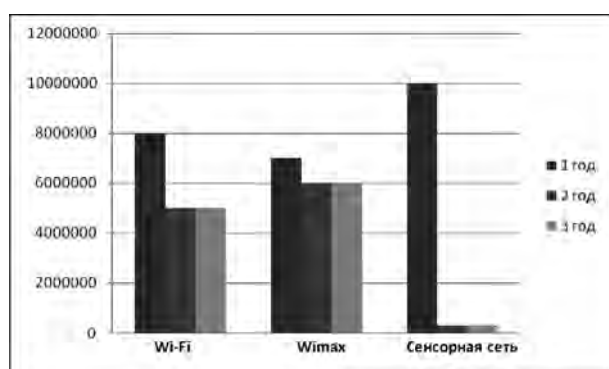


Рисунок 1. Сравнение годовых эксплуатационных затрат

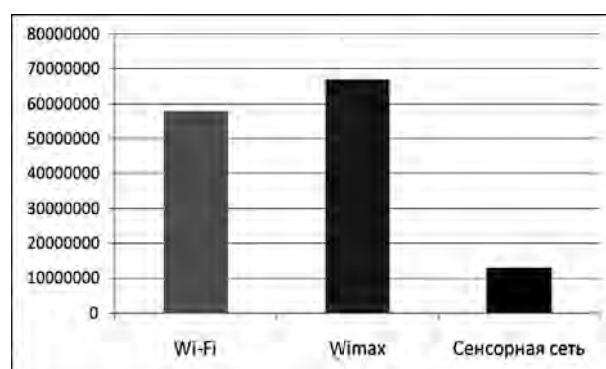


Рисунок 2. Итоговые эксплуатационные затраты за 10 лет

Установка Wi-Fi и Wimax оборудования неудобна в таких местах, как шахты, так как антенны и другое оборудование имеют большие размеры и требуют прокладки дополнительных кабелей для питания и передачи данных на сервер.

Планируется развернуть одну большую сеть в рамках предприятия, которая будет включать в себя несколько подсетей. Каждая такая подсеть будет выполнять определенную задачу:

- мониторинг шахтного оборудования;
- своевременное оперативное оповещение всех работающих об аварийных ситуациях, определение локального местоположения персонала и поиск застигнутых аварией людей;
- обеспечение персонала горных предприятий надежной и качественной оперативной связью на всем протяжении выработок в подземных условиях.

Сенсорная сеть состоит из мобильных и стационарных приемопередатчиков, маршрутизаторов и сервера, которые будут охватывать всю территорию предприятия. Каждый мобильный передатчик, осуществляющий мониторинг оборудования или определяющий местоположение персонала, будет пересылать информацию по радиочастоте на стационарный приемопередатчик. Со стационарных приемопередатчиков информация по проводной системе будет поступать на маршрутизаторы, которые в свою очередь будут пересылать данные по оптоволокну на центральный сервер, расположен-

ный в диспетчерской, где и будут производиться сбор, обработка и хранение информации. Принцип работы сети изображен на рисунке 3.

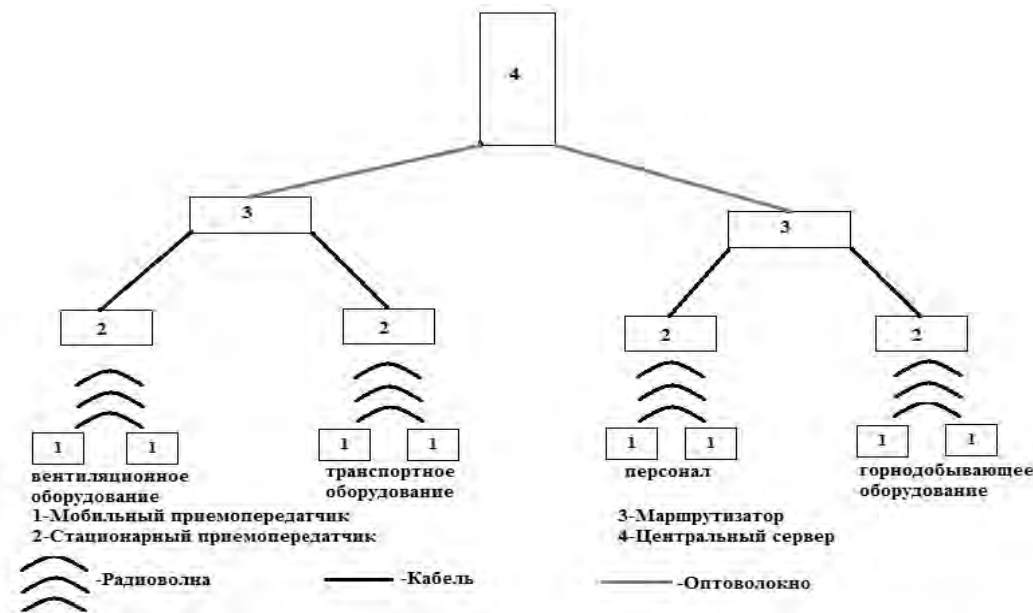


Рисунок 3. Принцип работы сенсорной сети

Для обеспечения непрерывной передачи данных и более точной информации в «жизненно важных» узлах будет установлено по 2 приемопередатчика.

Основу работы нашей сенсорной сети будут составлять приемопередатчики NanoLOC (рис. 4), разработанные берлинской компанией «Nanotron».

Сеть, построенная на приемопередатчиках NanoLOC, имеет лучшие параметры в сравнении с аналогами. На рисунке 5 показано сравнение скорости передачи данных трех сетей — ZigBee, Bluetooth и сети на основе приемопередатчиков NanoLOC.

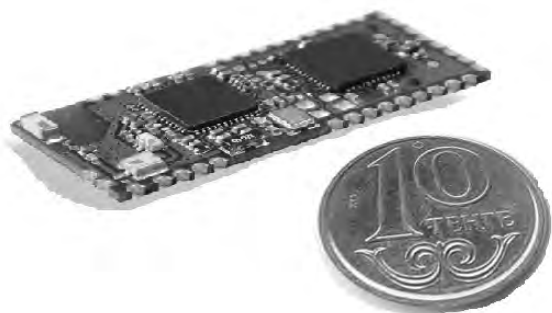


Рисунок 4. Радиомодуль

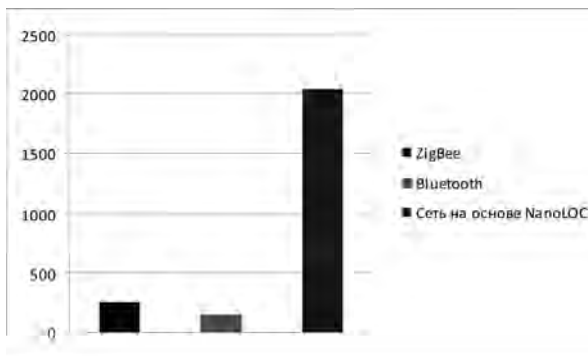


Рисунок 5. Сравнение скорости передачи данных

Основными достоинствами сети являются:

- работа в диапазоне 2,4 ГГц, который был выделен для свободного использования;
- высокая помехоустойчивость беспроводной передачи данных;
- высокая скорость передачи данных (до 2 Мбит/с);
- хорошее соотношение скорости передаваемых данных и энергопотребления;
- возможность локализации беспроводных узлов;
- низкая стоимость радиомодулей (около 10–15 долл.);
- автономное электропитание, обеспечивающее до 5 лет работы [2].

В сравнении с другими подобными системами, например, российской СНиОП [3], наша сеть имеет ряд преимуществ, таких как:

- другой диапазон работы, для которого не нужно получение разрешения на использование, что позволяет сэкономить время и средства;
- меньшую стоимость;
- более обширный спектр применения (в отличие от СНиОП, сеть позволяет производить мониторинг не только персонала, но и всего имеющегося на предприятии оборудования);
- более высокую надежность и скорость передачи данных;
- меньшие затраты по энергопотреблению (сенсорная сеть не нуждается в дополнительных источниках питания, что существенно влияет на размер эксплуатационных затрат).

В дальнейшем применение подобных сетей возможно для решения следующих задач:

- определение местоположения движущихся объектов внутри помещений с возможностью одновременной передачи звука, изображения и другой информации по радиоканалу;
- автоматизация, оптимизация грузопотоков и онлайн-контроль в железнодорожных терминалах, грузовых портах и пр.

Также применение подобных сенсорных сетей представляется возможным и в следующих сферах:

- медицинские учреждения — высокоэффективные системы контроля и диагностики с использованием радиосети, комплексный мониторинг состояния датчиков и специальных устройств;
- технология «умный дом» (обеспечивает существенную выгоду для гостиниц, выставок, ресторанов, строящихся зданий — это контроль за перемещением персонала и использование системы бесконтактного считывания информации с датчиков потребления воды, газа, тепла, электричества и пр., а также при реновации инфраструктуры существующих комплексов зданий);
- крупное машиностроение (возможность осуществлять контроль за состоянием мостов, высотных зданий, например, на основе анализа вибраций, автоматизации крупных терминалов и др.);
- сети для сбора данных — например, онлайн-система сбора информации для маршрутных такси.

На рисунке 6 показан один из способов применения сенсорной сети в промышленности.

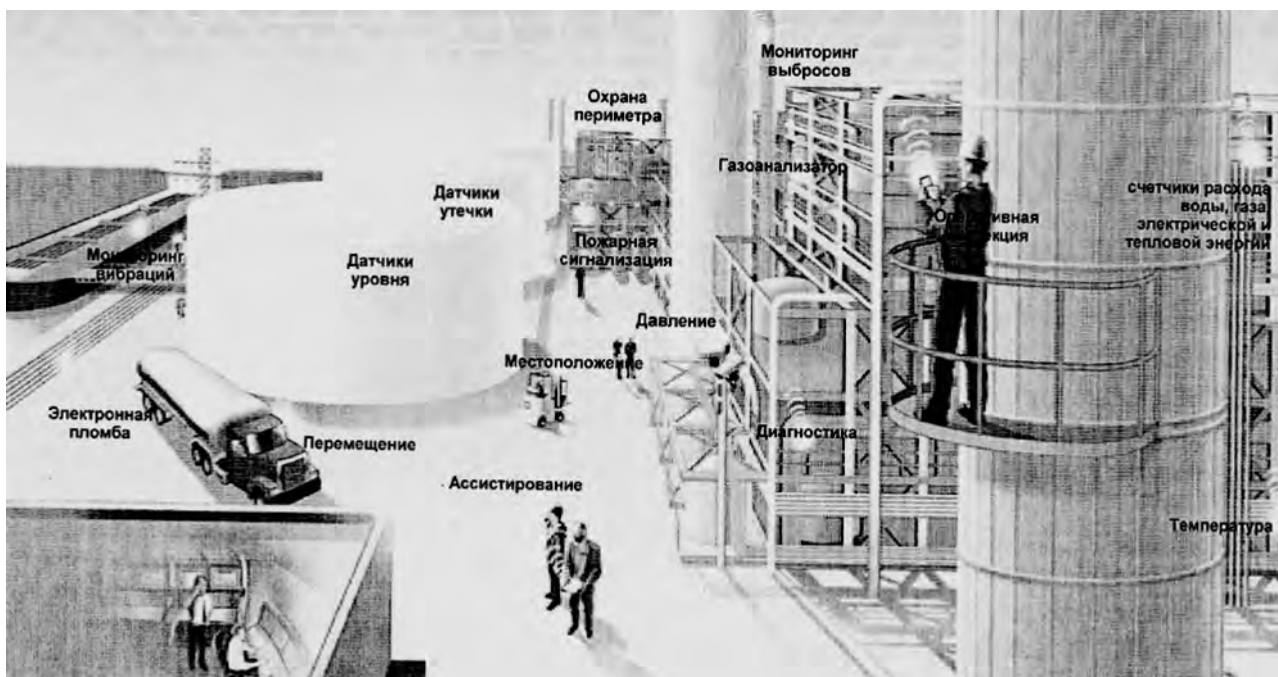


Рисунок 6. Применение сенсорной сети в промышленности

В заключение хочется отметить то, что сенсорные сети имеют очень высокий потенциал благодаря высокому уровню надежности, простоте установки и обслуживания, низкому энергопотреблению и невысокой стоимости. Стремительное внедрение технологии практически во все сферы жизни и деятельности человека однозначно выделяет сенсорные сети в самостоятельный бизнес-сегмент телекоммуникационной сети.

Сенсоры могут использоваться в любых приложениях жизнедеятельности человека, что дало основание назвать сети построенные, на их основе ubiquitous (u-сети), что означает — всепроникающие. Появление сенсоров и построенных на их основе u-сетей приносит и принципиальные изменения в состояние общества.

С учетом эффективного развития телекоммуникаций в Казахстане предлагается рассматривать задачу создания u-Казахстана как прагматическую и в недалеком будущем. Можно утверждать, что первые проекты по реализации концепции u-Казахстана появятся уже в ближайшие несколько лет.

Список литературы

- 1 *Лунев М.И.* Мониторинг пестицидов в окружающей среде и продукции: эколого-токсикологические и аналитические аспекты // Российский химический журнал. — 2005. — Т. XLIX, № 3. — С. 64.
- 2 *Сергиевский М.* Беспроводные сенсорные сети // Компьютер-Пресс. — 2009. — № 8. — С. 12–17.
- 3 *Комаров М.М.* Система мониторинга окружающей обстановки на основе беспроводной сенсорной сети // Науч.-техн. конф. молодых специалистов МИЭИ: Тезисы докл. — М.: МИЭМ, 2009. — С. 145–146.

А.Д.Мехтиев, М.Ш.Алимов, И.В.Боборыкин, С.В.Дворкин, В.С.Муравлев

Мониторингқа және жергілікті орналастаруына арналған сенсорлық торлардың өндірісте қолданысы

Мақалада тау өндірісінде қолданылатын сенсорлық торлар туралы жазылған. Сенсорлық торлардың сипаттамасы мен құрылу ұстанымы жайлы айтылған. Ең жақын сымсыз технологиялармен салыстыру өткізілген. Қондырғының үнемділігі, торлардың қолданылуы және оның күтімі экономикалық кәсіпорынның шығындарын қысқартуға мүмкіндік туғызады. Сенсорлық торларды енгізу өнеркәсіпке сенімді және мониторингтің үнемді жүйелерін, тұрған жерін белгілеу және байланысын жасауға негіз болады.

A.D.Mekhtiev, M.Sh.Alimov, I.V.Boborykin, S.V.Dvorkin, V.S.Muravlev

Applying of sensor networks for monitoring and local positioning in industry

In this article we offer to use sensor networks in the mining industry. The characteristics and principles of sensor networks building are described here. The comparison with the closest wireless technologies is also made. Economy high level of installation's, using and maintenance of networks would reduce the economic costs of the enterprise. The introduction of sensor networks in the industry will create a reliable and cost-effective system of monitoring, positioning and communication.

References

- 1 *Lunev M.I.* *Rossiyskiy khimicheskiy zhurnal* [Russian chemical Journal], Moscow, 2005, XLIX, 3, p. 64.
- 2 *Sergievskiy M.* *Computer Press*, Moscow, 2009, 8, p. 12–17.
- 3 *Komarov M.M.* *Nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya molodykh spetsialistov MIEI* [Scientific and technical conference of young specialists of MIEI], Moscow: MIEM, 2009, p. 145–146.

АВТОРЛАР ТУРАЛЫ МӘЛІМЕТТЕР СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

- Abuova, A.U.** — PhD student, L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana.
- Abuova, F.U.** — Senior lecturer, PhD student, L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana.
- Aimukhanov, A.K.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Senior lecturer of chair of spectroscopy of the condensed condition, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University; Senior research associate of Institute of molecular nanophotonics, Karaganda.
- Akhmetova, G.K.** — 2nd year undergraduate, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Akylbekov, A.T.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor, L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana.
- Alimov, M.Sh.** — Senior lecturer, Karaganda State Technical University.
- Alpysova, G.K.** — Lecturer of chair of radio physics and electronics, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Baysagov, Ya.Zh.** — Engineer, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Beysenbek, A.Zh.** — 3rd year student, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Boborykin, I.V.** — Student, Karaganda State Technical University.
- Duysenbaeva, M.S.** — 2nd year undergraduate, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Dvorkin, S.V.** — Student, Karaganda State Technical University.
- Dyusembekova, A.S.** — 1st year undergraduate, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Eirikh, V.I.** — Senior lecturer, Karaganda State Technical University.
- Gorlov, N.I.** — Doctor of technical sciences, Professor, Siberian State University of Telecommunications and Information, Novosibirsk, Russia.
- Guchenko, S.A.** — Engineer, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Ibraev, N.Kh.** — Doctor of physical and mathematical sciences, Professor of chair of spectroscopy of the condensed condition, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University; Head of Institute of molecular nanophotonics, Karaganda.
- Kaptagay, G.** — PhD student, L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana.
- Khasenov, A.K.** — 1st year doctoral candidate, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Kolesnikov, V.A.** — Senior research associate, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Kshalova, A.A.** — Senior lecturer, Karaganda State Technical University.
- Kusaiynov, K.** — Head of the Engineering thermophysics chair named after Zh.S.Akylbaev, Doctor of technical sciences, Professor, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Laurinas, V.Ch.** — Head of the chair, Candidate of physical and mathematical sciences, Docent, Y.A.Buketov Karaganda State University.

- Mekhtiev, A.D.** — Head of the chair, Candidate of technical sciences, Docent, Karaganda State Technical University.
- Muravlev, V.S.** — Student, Karaganda State Technical University.
- Nusupbekov, B.R.** — Dean of the Physical-Technical Faculty, Candidate of technical sciences, Docent, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Oganezov, E.S.** — Candidate of technical sciences, Docent, Karaganda State Technical University.
- Serikov, T.M.** — Master of natural sciences, lecturer of chair of radio physics and electronics, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University; engineer of Institute of molecular nanophotonics, Karaganda.
- Tanashev, E.** — Engineer of the Engineering thermophysics chair named after Zh.S.Akylbaev, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Tolynbekov, A.** — 3rd year student, Physical-Technical faculty, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Useinov, A.B.** — Senior lecturer, L.N.Gumilev Eurasian National University, Astana.
- Yugay, V.V.** — Doctoral candidate, Karaganda State Technical University.
- Yurov, V.M.** — Candidate of physical and mathematical sciences, Docent, Y.A.Buketov Karaganda State University; Director of Research Centre for ion-plasma technologies and modern instrumentation, Karaganda.
- Zavatskaya, O.N.** — Engineer, Y.A.Buketov Karaganda State University.
- Zharekeshev, I.Kh.** — Doctor of physical and mathematical sciences, associate Professor, Leading researcher, Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty.