



# НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ

## НАУКОВО - ПРАКТИЧНИЙ ЖУРНАЛ

Виходить 6 разів за рік  
Журнал засновано в 2005 році

Том 1 № 3 2005

### РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

#### ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР

**Б. Патон** Національна академія наук України

#### ЗАСТУПНИКИ ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА

**В. Кір'ян** Київська міська державна адміністрація

**Я. Яцків** Національна академія наук України

#### ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ

**П. Андон** Інститут програмних систем НАНУ

**С. Андронаті** Фізико-хімічний інститут  
ім. О.В.Богатського НАНУ

**В. Бабак** Національний авіаційний університет

**Ю. Глеба** Інститут клітинної біології та генетичної  
інженерії НАНУ

**В. Гончарук** Інститут колоїдної хімії та хімії води

ім. А.В. Думанського НАНУ

**Б. Гриньов** Інститут скінтіляційних матеріалів

**М. Згуровський** Національний технічний університет  
України (КПІ)

**О. Івасишин** Інститут металофізики  
ім. Г. В. Курдюмова НАНУ

**С. Конохов** ДКБ "Південне" ім. М. К. Янгеля

**В. Кухар** Інститут біоорганічної хімії  
та нафтохімії НАНУ

**О. Лапко** НАК "Нафтогаз України"

**Д. Мельничук** Національний аграрний університет

**М. Новіков** Інститут надтвердих матеріалів  
ім. В. М. Бакуля НАНУ

**В. Новицький** Мінпромполітики України

**В. Панасюк** Фізико-механічний інститут  
ім. Г. В. Карпенка НАНУ

**Ю. Пахомов** Інститут світової економіки  
і міжнародних відносин НАНУ

**С. Рябченко** Інститут фізики НАНУ

**Є. Скорик** ЦНДІ навігації і управління  
Мінпромполітики України

**Б. Стогній** Інститут електродинаміки НАНУ

**О. Уруський** Кабінет Міністрів України

**В. Черних** Національний фармацевтичний  
університет України

**В. Яковенко** Інститут радіофізики і електроніки  
ім. О. Я. Усикова НАНУ

### З М І С Т

#### ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ СУЧАСНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ ТА ІННОВАЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ

##### Дискусійна трибуна

**4 Стратегія розвитку України.** До програми діяльності Тимчасової спеціальної комісії Верховної Ради України з питань майбутнього (Проект).

#### НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ ІННОВАЦІЙНІ ПРОЕКТИ НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК УКРАЇНИ

**20 Сизов Ф. Ф., Бехтір О. В., Білевич Є. О., Голенков О. Г., Гордієнко Е. Ю., Грінченко М. Т., Гуметок-Сичевська Ж. В., Духнін С. Є., Забудський В. В., Завадський П. В., Ільницький І. І., Кравченко С. Л., Крайовий В. М., Рева В. П., Корінець С. В., Писаренко Л. О., Фоменко Ю. В., Шевчик А. В., Шустакова Г. В.** Багатоелементний тепловізор з високою температурною чутливістю та телевізійною частотою кадрів.

**34 Сергієнко І. В., Дейнека В. С.** Інформаційна технологія дослідження процесів в багатоконпонентних ґрунтових середовищах та оптимальне керування їх станами.

**51 Вишневецький І. М., Сахно В. І., Томчай С. П., Зелинський А. Г., Сахно О. В.** Впровадження технологій радіаційної пасертизації та консервації продуктів харчування.

## **ЗАСНОВНИК –**

Національна академія наук України

## **ВИДАВЕЦЬ –**

Видавничий дім “Академперіодика”

**Свідоцтво про державну реєстрацію  
друкованого засобу масової інформації –  
серія КВ 9759 від 13.04.05**

## **Передплатний індекс:**

для індивідуальних передплатників – **91942**,

для організацій і підприємств – **91943**

**ISSN 1815-2066**

## **ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР РЕДАКЦІЇ**

Т. Яцків

## **АДРЕСА РЕДАКЦІЇ**

ГАО НАНУ, вул. Академіка Заболотного, 27,  
03680 МСП, Київ, Україна

Е-mail: [tmy@voliacable.com](mailto:tmy@voliacable.com)

Сайт: <http://www.nas.gov.ua/scinn>

Тел.: 8 (044) 239 65 67

Матеріали друкуються мовою оригіналу.  
Редакція може друкувати статті, не поділяючи  
точки зору авторів.

Всі права захищені. Для перевидання матеріалів,  
надрукованих в журналі, необхідно отримати  
дозвіл Редакції.

Посилання на журнал "Наука та інновації"  
обов'язкові.

Оригінал-макет виготовлено в редакції журналу.

Підписано до друку 10.06.05. Формат 84x108/16.  
Папір офсетний № 1. Друк офсетний. Гарнітура  
Петербург, Прагматика. Ум. друк. арк. 13,44.  
Обл.-вид. арк. 12,22. Тираж 500 прим. Зам. 1398.

Друкарня Видавничого дому “Академперіодика”.  
01004 Київ, вул. Терещенківська, 4.

**62 Лівшиць Л.А., Пампуха В.М., Ясінська О. А., Лівшиць Г. Б., Грищенко Н. В., Кравченко С. А., Нечипоренко М. В., Єльська Г. В.** Створення та впровадження в медичну практику тест-систем для генної діагностики тяжких спадкових захворювань.

**70 Малюта С. С., Телегеев Г. Д., Дибков М. В., Мірошниченко Д. О., Єльська Г. В.** Розробка тест-системи для діагностики Рн-лейкемії за допомогою полімеразної ланцюгової реакції.

**76 Константинова Т. Е., Даниленко И. А., Токій В. В., Глазунова В. А.** Получение нанодисперсных порошков диоксида циркония. От новации к инновации.

**88 Вишневский И. Н., Коломиец Н. Ф., Коваленко А. В.** Опыт создания и применения металло-третиевых структур.

**92 Шпак А. П., Маслов В. В., Носенко В. К.** Ресурсозберігаючі технології виробництва нанокристалічних прецизійних магнітних матеріалів як складова інноваційного розвитку енергетичної та електротехнічної галузей промисловості України.

**112 Новіков М. В., Лукаш В. А., Вировець Л. М.** Створення вітчизняного виробництва ріжучого інструменту для дорожньо-фрезерних машин.

## **СВІТ ІННОВАЦІЙ**

### **Оперативна інформація науково-інноваційної сфери**

**120 Троян В. М.** Інновації у Європі.

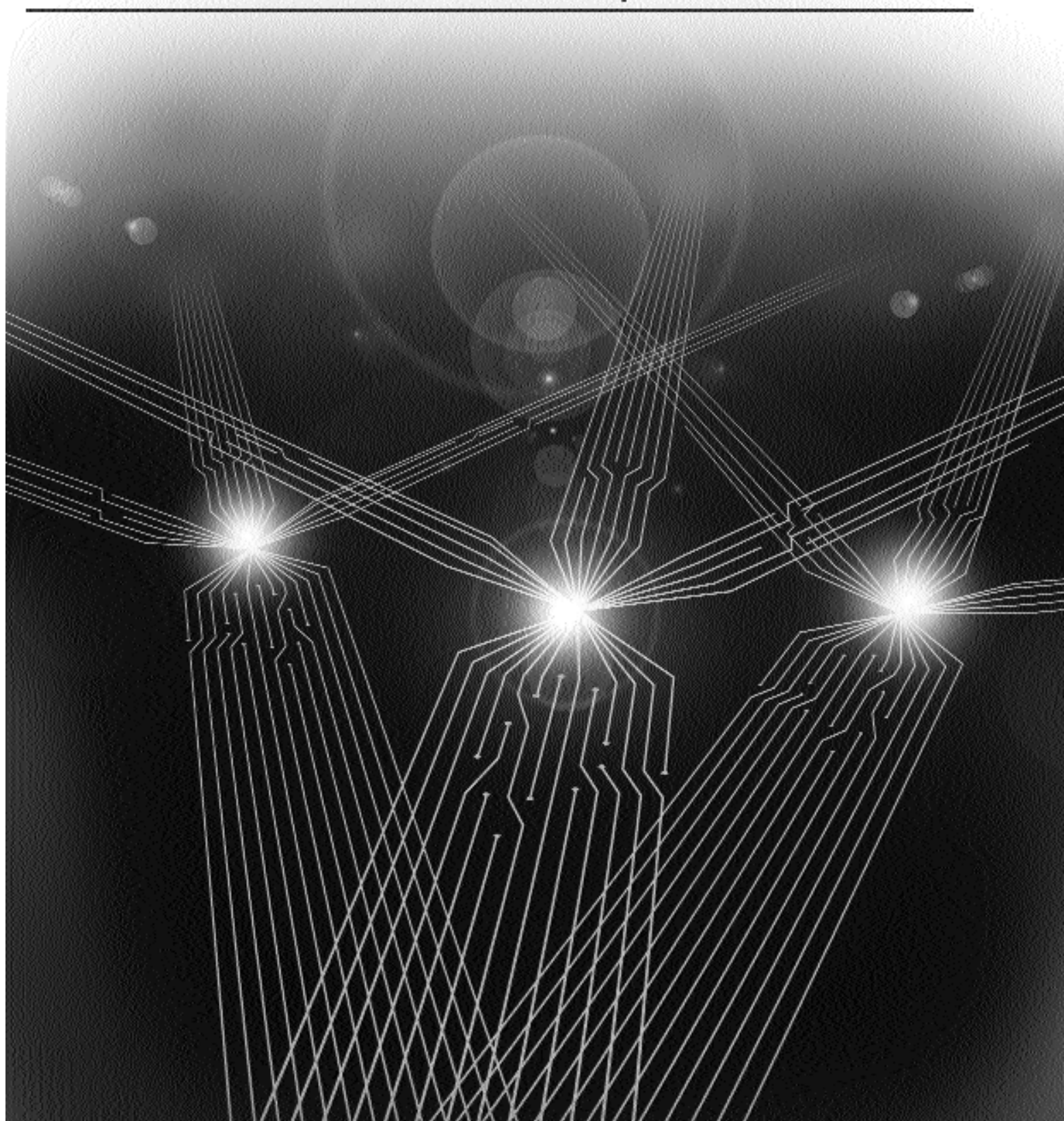
**124 Лало В., Демидова Л.** Гасло "Рекомендовано громадською радою" перетворюється на дії.

## **ІНФОРМАЦІЙНИЙ РОЗДІЛ**

---

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ  
СУЧАСНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ  
ТА ІННОВАЦІЙНОЇ ПОЛІТИКИ

---



## Стратегія розвитку України

*До програми діяльності Тимчасової спеціальної комісії  
Верховної Ради України з питань майбутнього*

*Нація та заселена нею територія становлять екологічно врівноважену систему,  
стійкість якої сформована взаємним співіснуванням на протязі тисячоліть.  
Україна є результатом державного самовизначення української нації.*

*Основним завданням України є досягнення такої політичної організації і  
такого життєвого рівня населення, що відповідають стандартам ЄС.*

*Сталий розвиток є глобальним процесом.*

*Україна у тісній співпраці з Світовою спільнотою прямує до сталого розвитку.*

I. Рушієм суспільного життя в Україні є її населення. Згідно Конституції України людина, її життя і здоров'я визнаються найвищою соціальною цінністю. У зв'язку з цим основним завданням усіх ланок організації суспільства є мета, що формулюється так:

### **Краща якість життя для кожного тепер і для поколінь, що приходять**

II. Основні критерії, за якими досягатиметься мета:

- Розвиток людського капіталу України.
- Ефективна захищеність природного довкілля. Бережливе, раціональне і якісне використання природних ресурсів.
- Високі і стійкі рівні зростання економіки.
- Розбудова суспільства знань.
- Прогнозоване, надійне та достатнє енергозабезпечення країни.
- Вхідження у європейське суспільство та членство України в ЄС.

Провідні принципи, якими слід керуватися при розробці напрямів:

1. Найвищим пріоритетом є покращення якості життя людей.
2. Неухильне дотримання екологічних обмежень та екологічної безпеки людини.
3. Інтегрований підхід до прийняття рішень, прийняття збалансованих рішень з урахуванням наслідків їх дії на розвиток суспільства та довкілля.
4. Забезпечення прозорості, доступності та гласності.
5. Дотримання принципу економічної ефективності.

### **1. РОЗВИТОК ЛЮДСЬКОГО КАПІТАЛУ УКРАЇНИ**

Основним багатством держави, її головним стратегічним ресурсом, здатним забезпечити політичне, економічне і духовне зростання, є людський капітал. Його інтелектуальні, підприємницькі, виробничі здібності, спромож-

<sup>1</sup> Запропонований членами Тимчасової спеціальної комісії ВРУ з питань майбутнього та складений на підставі матеріалів круглих столів з питань інноваційної політики.

ність створювати і накопичувати знання, впроваджувати їх у виробництво товарів та послуг, розробляти унікальні технології, винаходити нові види енергії, матеріалів, інформації тощо, є рушієм науково-технічного прогресу та інноваційної перебудови української економіки.

Інвестиції в людський капітал, в інтелект, в здоров'я нації, в освіту і науку, створення умов нормальної життєдіяльності всіх і кожного є передумовою не тільки покращення якості життя народу, а й досягнення випереджального розвитку країни, її соціальної та політичної стабільності.

### **Основні завдання:**

- підвищення рівня життя населення; більше добрих і добре оплачуваних робочих місць; сприяння малому та середньому бізнесу; подолання як бідності, так і соціальної винятковості, основаної на несправедливому збагаченні; розвиток середнього класу;
- поліпшення стану здоров'я та освітнього рівня нації;
- національне об'єднання українського суспільства.

### **Показники розвитку людського капіталу:**

1. Демографічні процеси.
2. Рівень життя населення.
3. Зайнятість.
4. Система охорони здоров'я.
5. Доступність якісної освіти.
6. Житлова політика.
7. Культура та відпочинок.
8. Розвиток патріотизму нації.

### **1. Демографічні процеси**

- Загальна чисельність населення. Розподіл населення за віком.
- Рівень народжуваності і смертності.
- Міграція населення, в тому числі працездатного віку, динаміка виїзду в інші країни.

- Середня тривалість життя.

### **2. Рівень життя населення**

- Доходи і витрати населення: обсяги і структура.
- Соціальні пільги і їх забезпеченість.
- Заощадження, вклади населення в комерційних банках.
- Шкала середньомісячної заробітної плати за видами економічної діяльності, різниця між найвищою та найменшою заробітною платою.
- Мінімальний і середній розмір трудової пенсії за віком.
- Економічна структура суспільства в Україні (густина населення за накопиченим капіталом).
- Залежність попиту населення від доходів.
- Питома вага населення, яке має ознаки середнього класу.

### **3. Зайнятість**

- Динаміка кількості підприємств і організацій за галузями економіки (за номенклатурою національних рахунків), кількістю робочих місць, середньою зарплатою.
- Розвиток малого бізнесу (кількість малих підприємств за галузями економіки, кількістю робочих місць, середньою зарплатою).
- Чисельність і вікова структура економічно активного населення.
- Рівень зайнятості різних вікових груп за видами економічної діяльності.
- Попит на робочу силу в залежності від кваліфікації.
- Рівень зайнятості молоді.

### **4. Здоров'я нації**

- Кількість лікарняних закладів і медичного персоналу на душу населення.
- Захворюваність за типами хвороб та за регіонами.

## **Загальні питання сучасної науково-технічної та інноваційної політики**

- Поширення ВІЛ/СНІДу та активного туберкульозу.
- Рівень дитячої смертності та смертності жінок дітородного періоду.
- Рівень бюджетного фінансування медичних закладів, середня зарплата лікарів і медперсоналу.
- Забезпеченість медикаментами і їх доступність.
- Кількість населення, що користується послугами медичного страхування
- Стан лабораторного обладнання лікарняних закладів.

### **5. Освіта**

- Рівень охоплення дошкільною, середньою і вищою освітою.
- Наповненість закладів освіти.
- Створення сільських шкільних округів і базових шкіл як центрів навчання, інформаційного обслуговування і маркетингу.
- Забезпеченість учбовими засобами закладів освіти.
- Забезпеченість учбових закладів підручниками, сучасним обладнанням, комп'ютерами в розрахунку на одного учня (студента).
- Кількість працездатного населення, що проходить перекваліфікацію, післядипломне стажування, підвищення кваліфікації, володіння англійською мовою та комп'ютером.
- Фінансування учбових закладів, середня зарплата вчителів і викладачів вищої школи.
- Наукова спроможність вищої освіти України (відношення числа цитувань у всіх статтях до ВВП галузі; число цитувань на одного жителя).

### **6. Житлові умови**

- Забезпеченість населення житлом.
- Квартирні черги.
- Інвестиції в житлове будівництво.

- Житлове кредитування, зокрема молодих сімей.
- Введення в експлуатацію житлових будинків.
- Благоустрій житла і населених пунктів.

### **7. Культура та відпочинок**

- Забезпеченість населення закладами культури та відпочинку.
- Обсяги телерадіомовлення.
- Випуск книжок, журналів і газет, зокрема українською мовою.
- Спорт в Україні (розвиток спортивних товариств, підтримка розвитку спорту у закладах освіти, підготовка олімпійського резерву України.)
- Кількість населення, що подорожує всередині держави.

### **8. Розвиток українського державного патріотизму**

- Розвиток організацій патріотичного виховання різних вікових груп населення.
- Поширення української мови у всіх сферах суспільства.
- Формування української політичної нації.
- Наявність освітніх програм з розвитку патріотизму, в т. ч. на радіо, телебаченні.
- Відвідання населенням, в т. ч. молоддю, місць, що мають історичне та культурне значення, музеїв.

## **2. БЕРЕЖЛИВЕ, РАЦІОНАЛЬНЕ І ЯКІСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ПРИРОДНИХ РЕСУРСІВ. ЕФЕКТИВНА ЗАХИЩЕНІСТЬ ПРИРОДНОГО ДОВКІЛЛЯ**

### **2а. Бережливе, раціональне і якісне використання природних ресурсів**

**Україні необхідна перманентна і раціональна самозабезпеченість життєвих процесів**

за умови відкритості держави до зовнішнього світу. Україна володіє у великій кількості певними природними ресурсами. **Постійне інноваційне** виробництво продуктів повної переробки наявної природної сировини має сприяти забезпеченню як внутрішніх потреб, так і довготривалого конкурентоспроможного утримання товарних позицій на внутрішньому та зовнішньому ринках.

Україні притаманний розвиток таких напрямів, що впливають з наявних природних ресурсів:

1. Індустрія металів.
2. Індустрія кольорового каміння.
3. Сільськогосподарська індустрія.
4. Транспортна система.

### **Наповненість напрямів**

#### **1. Індустрія металів включає:**

- добування і збагачення руд металів;
- металургію;
- машинобудування;
- приладобудування.

#### **2. Індустрія кольорового каміння включає:**

- розробку необмежених запасів покладів гранітів, інших видів кольорового каміння;
- виробництво лицювальних і оздоблювальних матеріалів;
- добування блоків, виробництво щебеню;
- будівництво доріг, будинків;
- будівельні послуги;
- виробництво машин і механізмів для добування і обробки.

#### **3. Сільськогосподарська індустрія**

Дві третини сільськогосподарських угідь України становлять високоврожайні землі. Середній природний врожай (урожай, що одержується без внесення добрив з використанням мінімальної кількості пестицидів) в Україні становить 25 ц/га при собівартості 38 \$ за тонну.

При раціональному веденні сільського господарювання урожайність земель може постійно відновлюватися.

Україна розвиває:

- рентабельне сільське господарство, продукцію зерна, овочів, фруктів, технічної сировини;
- рентабельний лісопромисловий комплекс;
- харчову і легку промисловість;
- відновлювальну енергетику шляхом переробки сільськогосподарської сировини та відходів с/г;
- хімічний синтез і виробництво хімічних добрив;
- сільськогосподарське машинобудування. Забезпечується сталий розвиток АПК та вдосконалення земельних відносин.

#### **4. Транспортна система України**

- Якісний і надійний транспорт російських, середньоазіатських і, в майбутньому, іракських енергоносіїв в Європу – одне з основних завдань українських служб на найближчі п'ятдесят років.
- Виготовлення труб, компресорних станцій, іншого обладнання для трубопроводного транспорту.
- Будівництво трубопроводних систем. Експорт послуг. Розвиток нафтохімії.
- Модернізація залізничних перевезень. Приватизація місцевих перевезень.
- Дороги України. Транспортні коридори. Розвиток інфраструктури доріг. Розвиток доріг місцевого значення.
- Модернізація і розвиток транспортного машинобудування. Будівництво локомотивів, вагонів, авіа- і ракетобудування, суднобудування, автомобілебудування, тракторобудування.
- Машини і матеріали для будівництва доріг.
- Енергоощадність. Зниження використання автомобільного транспорту за рахунок електронних засобів комунікацій,

## **Загальні питання сучасної науково-технічної та інноваційної політики**

- Інтернету. Розвиток велосипедних та інших паливоощадних засобів пасажирського транспорту.
- Розвиток електронних систем зв'язку.

### **Основні завдання**

- Забезпечення інформаційно-комунікаційними системами, кожної з приведених галузей.
- Моніторинг виконання пріоритетних програм розвитку кожної із галузей.
- Сприяння випуску продукції за діючими на даний час стандартами ЄС.
- Сприяння формуванню конкурентного середовища.
- Розвиток реклами українських товарів.
- Законодавче сприяння стабільному ринку.
- Модернізація на найсучаснішому світовому рівні наукових лабораторій і освітніх центрів галузевих технологій машинобудування та приладобудування.
- Кожна галузь створює відповідні венчурні фонди для фінансування інновацій, трансферу технологій. Сумарні витрати на наукові розробки сягають до 3 % ВВП галузі. Створюється система інноваційних центрів.

### **Показники виконання основних завдань**

- Відповідність усієї номенклатури продукції галузей стандартам ЄС.
- Об'єми продукції.
- Номенклатура і об'єми продукції, що відповідає стандартам ЄС.
- Внутрішній ринок продукції.
- Зовнішній ринок.
- Внутрішній ринок продукції, що відповідає стандартам ЄС.
- Зовнішній ринок продукції, що відповідає стандартам ЄС.
- ВВП галузей та його складові.
- Фінансовий стан кожної з галузей.
- Паритети цін.

- Інноваційні нововведення.
- Модернізація основного капіталу галузей.
- Розвиток інноваційної діяльності, технопарки.
- Вичерпування сировини.
- Енергомісткість продукції галузей.
- Матеріаломісткість продукції.
- Інформаційне забезпечення.

### **2б. Ефективна захищеність природного довкілля**

**Охорона довкілля та раціональне використання природних ресурсів є невід'ємною частиною процесу суспільного розвитку держави, здоров'я та добробуту українського народу.**

В питаннях захисту природи в Україні існують **дві глобальні довготривалі проблеми**, пов'язані з катастрофою на **Чорнобильській АЕС** і з існуванням **дамб водосховищ, споруджених вздовж течії Дніпра**. Обидва небезпечні об'єкти дістались Україні у "спадок" після розпаду СРСР. Існування обох об'єктів є смертельно небезпечне як для населення України, так і для світової спільноти:

**Чорнобиль:** перетворення, під впливом тривалого інтенсивного радіоактивного випромінювання, твердих паливовмісних мас всередині Укриття у зібрані форми, що складаються з пилу мікрочастинок, їх можливий розпад, розпилення при найменшому дотику назовні та довготривале зависання в атмосфері; руйнування паливовмісних мас внаслідок взаємодії з водою; вкрай небезпечна дія високочарядних іонів на воду і на живі організми.

**Водосховища:** довготривале просочування води крізь тіла водозапірних дамб призводить до підйому рівня ґрунтових вод на великих територіях та може призвести до одномоментного сходження величезних мас вод і знищення великих територій басейну Чорного моря.

**Ставити до відома світову спільноту, що обидві проблеми не є лише внутрішніми про-**

блемами України, а є проблемами усієї світової спільноти. У їх вирішенні Україна потребуватиме постійної зовнішньої допомоги.

### **Основні завдання:**

- загальне покращення стану навколишнього природного середовища; безпека життєдіяльності;
- гармонізація екологічних стандартів зі стандартами ЄС;
- розвиток системи екологічного контролю та моніторингу; формування національної екологічної мережі; обов'язкове врахування вимог екологічної безпеки при розробці соціально-економічних планів розвитку;
- перегляд системи зборів за використання природних ресурсів та штрафів за забруднення навколишнього природного середовища, удосконалення їх системи за принципом "забруднювач платить";
- виконання Загальнодержавної програми поводження з токсичними відходами, здійснення заходів із підвищення рівня знешкодження та утилізації токсичних відходів, в тому числі заборонених до використання пестицидів.
- Економічне стимулювання зниження кількості відходів:
  - ТЕС, ТЕЦ і АЕС;
  - підприємств добувної промисловості;
  - підприємств металургійної промисловості;
  - підприємств хімічної промисловості;
  - підприємств сільського господарства;
  - підприємств комунального господарства.
- виконання заходів Національної програми мінімізації наслідків Чорнобильської катастрофи;
- ведення постійного моніторингу стану дамб водосховищ, споруджених вздовж течії Дніпра;
- створення та впровадження програм для роздільного сортування побутового сміт-

тя, впровадження тендерних відносин при збиранні, переробці та за захороненні побутових відходів, сприяння впровадженню сміттєспалюваних заводів;

- визначення та впровадження систем "життєвого циклу продукції" з метою відновлення природного середовища, зведення до мінімуму об'ємів і динаміки накопичення безнадійних до використання відходів, впровадження нових "зелених" технологій.

### **Показники природокористування та техногенного навантаження на довкілля:**

1. Стан земельних ресурсів та їх охорона.
2. Охорона та використання водних ресурсів.
3. Охорона та використання біоресурсів.
4. Якість повітря та переробка шкідливих відходів.
5. Використання мінерально-сировинної бази та вторинної сировини.

### **Індикатори природокористування та стану довкілля:**

#### **1. Земельні ресурси**

- розораність земель;
- забрудненість земель радіонуклідами;
- природна урожайність сільськогосподарських угідь;
- рекультивація земель;
- рівень еродованих, солонцюватих, заболочених, засолених та забруднених шкідливими речовинами ґрунтів.

#### **2. Водні ресурси**

- якість та забезпеченість населення питною водою;
- частка річок та водойм, що мають воду задовільної якості;
- рівень очищення забруднених зворотних вод;
- споживання води у виробничих цілях;

- рівень використання підземних вод.

### **3. Біоресурси, в т. ч. лісові ресурси**

- частка природно-заповідних територій та об'єктів;
- лісистість території;
- розвиток популяцій диких тварин;
- співвідношення між запасом фактичних та нормальних лісостанів;
- продуктивність лісонасаджень (вихід лісоматеріалів круглих в обсягах заготівлі);
- розвиток популяції водоплавних птахів;
- динаміка лісовідновлення.

### **4. Якість повітря та переробка шкідливих відходів**

- викиди шкідливих речовин в атмосферне повітря у розрахунку на одиницю площі;
- кількість днів, коли забруднення повітря в містах перевищує безпечні рівні;
- частка уловлених та знешкоджених шкідливих речовин у загальному обсязі утвореного забруднення;
- частка утилізованих шкідливих речовин у загальному обсязі уловлених та знешкоджених;
- темпи утворення та накопичення промислових токсичних відходів;
- інтенсивність руху, викиди шкідливих речовин від автотранспорту на одиницю площі;
- частка використаних та знешкоджених речовин у загальному обсязі утворених токсичних відходів.

### **5. Використання мінерально-сировинної бази, використання вторинної сировини**

- матеріаломісткість виробництва;
- енергомісткість виробництва;
- частка збагаченої сировини в загальних об'ємах видобутку;
- втрати сировини при видобутку;
- використання новітніх технологій в видобувних галузях;

- частка мінерально-сировинної продукції, що перероблюється в країні, в загальних обсягах видобутку (зокрема каменесамоцвітної сировини та декоративно-облицювального каменю);
- рівень використання вторинної сировини в обсягах знов утвореної.

## **3. ВИСОКІ І СТІЙКІ РІВНІ ЗРОСТАННЯ ЕКОНОМІКИ**

Виробнича стратегія, заснована лише на переробці національної сировини, може під впливом кон'юнктури світового ринку зробити Україну сировинним додатком технологічно випереджуючих держав. Запаси сировини вичерпуються. Україна ставатиме економічно і політично залежною від розвинутих держав. На даний час Україна перебуває у 3-му технологічному укладі, ЄС і США – у 5-му, і ніхто і ніщо не стоїть на місці.

Інтеграція України у високотехнологічне європейське та світове конкурентне середовище не на правах сировинного додатку, а як рівноправного партнера, можлива лише за умови інноваційної моделі розвитку економіки. **Нехтування інноваційною складовою виробництва веде до екстенсивного шляху розвитку і має наслідком вичерпання природних ресурсів.**

В умовах зростання ВВП **інноваційна модель економічного розвитку** відрізняється від споживчої моделі постійним **збільшенням інвестицій у основний капітал** і зростаючою **конкурентоспроможністю**. Інвестиції і трудові ресурси є основними факторами забезпечення економічного зростання в Україні.

Важливим чинником інноваційного розвитку країни є як **формування внутрішнього ринку високих технологій**, так і **трансфер технологій**, створення **ринку інтелектуальної власності**.

Усі наведені фактори означають **розбу-**

дову суспільства знань, невід'ємними складовими якого являються **науково-технічний потенціал** і сучасна динамічна **інформаційна інфраструктура**.

Інноваційний характер розвитку економіки вимагає значного стартового капіталу. На сьогодні **фінансування інвестицій** здійснюється переважно **за рахунок власних коштів підприємств**. Існуюча податкова і фінансово-бюджетна системи не сприяють інвестиційним та інноваційним процесам в країні.

### **Основні завдання:**

- Розбудова економіки за інноваційною моделлю.
- Розвиток Стратегії технологічних проривів.

### **Індикатори зростання економіки:**

- Розбудова економіки за інноваційною моделлю.
- ВВП України і галузей виробництва. Темпи зростання валового внутрішнього продукту. ВВП і валова додана вартість на душу населення. Порівняльний аналіз з країнами ЄС.
- Проміжне споживання галузей і його частка у випуску продукції, само витрати галузей.
- Аналіз матриць "витрати-випуск" в цінах споживачів.
- Рівень інфляції.
- Рентабельність підприємств.
- Структура оборотних коштів.
- Кількість підприємств, що впроваджували інновації; доля інноваційної продукції в обсягах випуску.
- Кількість освоєних нових видів техніки, нових технологічних процесів.
- Комплексна законодавча підтримка інноваційної діяльності.
- Кількість виданих патентів та ліцензій.
- Кількість застрахованих інноваційних ризиків.

- Інноваційна інфраструктура, яка включає: інформаційні центри, мережу інноваційних центрів розвитку трансферу технологій, технопарки, інноваційні бізнес-інкубатори, інжинірингові та консалтингові підприємства, підрозділи маркетингу і технологічного аудиту, освітні установи.
- Кількість регіональних інноваційних компаній із залученням місцевих та центральних наукових і проектних установ, навчальних закладів, окремих учених і потенційних місцевих інвесторів.
- Спеціалізовані інноваційні компанії міністерств та відомств.
- Кількість транснаціональних вертикально-інтегрованих (промислово-фінансові групи) та горизонтально-інтегрованих структур (промислові кластери).
- Кількість нових робочих місць створених технопарками і виконанням інноваційних проектів.

### **Індикатори активізації фінансування і кредитування інноваційних проектів**

- Фінансове становище України і галузей виробництва та сфери послуг.
- Банківські кредити та активність.
- Рівень зростання інвестицій; обсяги і структура інвестицій.
- Показники механізму часткової бюджетної компенсації відсотків, які сплачуються підприємствами банкам за кредити під інноваційні проекти.
- Показники концентрації ресурсів у провідних банках для кредитування вагомих інвестиційних проектів.
- Показники пільгового рефінансування НБУ кредитів комерційних банків, наданих під інноваційні проекти, під закупівлю нових технологій.
- Об'єми коштів технопарків, спрямованих на капіталовкладення з метою випуску інноваційної конкурентоспроможної продукції.
- Показники оптимізації потоку амортиза-

ційних відрахувань, що реінвестуються у власну виробничу базу, надання дозволу прискореної амортизації основних фондів підприємств.

- Показники створення фондів розвитку.
- Створення венчурних фондів, лізингових, страхових компаній, діяльність яких спрямовуватиметься на ефективне впровадження досягнень прикладних наук в українське виробництво.
- Показники розвитку ринку цінних паперів як джерела залучення і перерозподілу інвестиційних ресурсів.
- Удосконалення механізмів банківського кредитування під заставу.
- Використання профіциту бюджету на модернізацію виробництва, (а не на споживання).
- Об'єми коштів від приватизації, що спрямовуються на інноваційну діяльність та модернізацію виробництва на конкурентній основі і з врахуванням терміну самоопукності проектів.
- Аналіз даних, що стосуються легалізації тіньових доходів і повернення капіталів українських громадян з офшорних зон на Україну.
- Розвиток стратегії технологічних проривів.

#### **4. РОЗБУДОВА СУСПІЛЬСТВА ЗНАНЬ**

Україна володіє високим науково-технічним потенціалом. Його можливості використовуються недостатньо та неоднаково за різними видами наук і технічних напрямків.

Велика кількість наукових розробок передано за кордон. Це відбувалося різними шляхами: шляхом одержання українськими авторами грантів від іноземних наукових фондів, продажем патентів, шляхом особистих контактів українських науковців з іноземними колегами.

Всередині держави впроваджується незначне число наукових розробок. Є декілька причин цього: недостатня лабораторна і виробнича база наукових інститутів і підприємств, дуже низька заробітна плата науковців, низький рівень технологій на підприємствах, низька технологічна культура інженерів тощо.

#### **Основні завдання:**

1. Розвиток інформаційного простору України.
2. Підтримування високого рівня фундаментальної науки України.
3. Визначення науково-технологічних пріоритетів. Модернізація бази наукових досліджень. Можливість технологічних проривів. (За. Визначення та постійне оновлення критичних технологій для підтримки функціонування та забезпечення розвитку виробничих галузей, поданих в розділі 2).
4. Активізація інвестиційних процесів, розвиток різних форм фінансування і кредитування інноваційних проектів.

#### **Індикатори розбудови економіки знань:**

##### **1. Розвиток інформаційного простору України:**

- розвиток безкоштовної початкової освіти в галузі інформаційного суспільства;
- показники формування єдиного інформаційного простору України (номенклатура доступних інформаційних ресурсів, інформаційних послуг);
- розвиток пунктів загального інформаційного доступу з метою забезпечення прозорості відносин громадськості і держави;
- розвиток загальнодержавних інформаційних мереж;
- показники розвитку електронної торгівлі;
- дані про розвиток електронного урядування;

- складові індексу конкурентоспроможності України;
- показники ефективності механізмів бюджетного та децентралізованого фінансування інноваційної діяльності;
- гармонізація інформаційного законодавства України з законодавством ЄС;
- еміграція інформаційного капіталу з України.

### **2. Підтримування високого рівня фундаментальної науки України:**

- кількість наукових установ НАНУ, галузевих академій, вищих навчальних закладів за галузями знань і технологій. Кількість зайнятих в них працівників (в т. ч. докторів наук, кандидатів наук);
- кількість наукових праць по галузях наук. Кількість наукових праць на одного працюючого, на одного мешканця;
- питома вага індексів цитування наукових робіт, надрукованих в Україні;
- питома вага (на одного мешканця) індексів цитування наукових робіт, надрукованих в закордонних наукових журналах;
- виділення найбільш перспективних наукових напрямків;
- розвиток діяльності та фінансування Фонду фундаментальних досліджень.

### **3. Визначення науково-технологічних пріоритетів. Модернізація бази наукових досліджень. Можливість технологічних проривів. (За. Визначення та постійне оновлення критичних технологій для підтримки функціонування та забезпечення розвитку виробничих галузей, поданих в розділі 2):**

- кількість модернізованих лабораторій, сума інвестицій (з державного бюджету, за кошти організацій, іноземні інвестиції) (зокрема для За);
- кошти, виділені на модернізацію лабора-

торної бази найбільш перспективних наукових досліджень (зокрема для За);

- наслідки модернізації лабораторних баз наукових досліджень (зокрема для За);
- кількість запатентованих винаходів. Питома вага кількості запатентованих винаходів на одного працюючого мешканця (зокрема для За);
- кількість наукових робіт, проданих за кордон за галузями наук (зокрема для За);
- кількість наукових розробок, впроваджених у виробництво (зокрема для За).

### **4. Активізація інвестиційних процесів, розвиток різних форм фінансування і кредитування інноваційних проектів:**

- винагорода наукових співробітників;
- інвестиції в науку (бюджетні, з виробництва, закордонні);
- кількість довгострокових кредитів, спрямованих на впровадження наукових розробок;
- кількість фондів розвитку, створених міністерствами та приватними установами;
- кількість венчурних фондів, лізингових і страхових компаній та об'єм здійсненого ними фінансування інноваційних впроваджень;
- об'єм податкових пільг, використаних на інвестування інноваційної діяльності.

## **5. ПРОГНОЗОВАНЕ, НАДІЙНЕ ТА ДОСТАТНЄ ЕНЕРГОЗАБЕЗПЕЧЕННЯ УКРАЇНИ**

На найближчі 30 років енергозабезпечення України буде пов'язане з використанням вуглеводів як головного джерела енергії. Важливого значення набуває відповідальність України за стан системи газо- і нафтопроводів, що транспортують російські і близькосхідні енергоносії до Європи.

Енергозабезпечення власними джерела-

ми енергії покриватиме третину енергопотреб держави.

Проблемою для довготривалого вирішення є стан вугільної галузі в цілому і способи добування вугілля з малопотужних крутосхильних вугільних пластів Донецького басейну.

Перспективним стає:

- використання нетрадиційних, особливо відновлювальних, джерел енергії, як то розвиток технологій вирощування ріпаку та переробки на пальне ріпакової олії;
- розвиток сучасної енергетики з використанням торфу;
- використання шахтного метану в енергетиці;
- розвиток атомної енергетики на основі низько збагаченого природного урану;
- розвиток енергетики, пов'язаної з використанням цирконію та інших твердих електролітів і створенням батарей паливних комірок;
- розвиток енергетики, заснованої на дії вітру та сонячного проміння;
- визначальними стають заходи, спрямовані на енергоощадність.

### **Основні завдання:**

1. Вирішення організаційних, економічних і соціальних проблем, пов'язаних з постачанням енергоносіїв.
2. Оптимізація структури енергетичної системи України.

### **Індикатори енергозабезпечення:**

#### **1. Вирішення організаційних, економічних і соціальних проблем, пов'язаних з постачанням енергоносіїв**

#### **Вугілля**

- Запаси вугілля.
- Кількість зайнятих у вугільній галузі.

- Об'єми добування (тонн/день, кілокалорій/день).
- Питомі об'єми добування на одного працюючого.
- Якість вугілля. Енергетичні характеристики (кВтгод/тонна, кВтгод/кілокалорія).
- Середня собівартість і ціна.
- Відходи виробництва (кількість породи на 1 тонну вугілля, об'єми шахтних вод на 1 тонну вугілля).
- Заробітна плата за видами зайнятості.
- Точки беззбитковості шахт.
- Інвестиції в галузь.
- Бюджетні асигнування у вугільну галузь, їх розподіл і ефективність.
- Платіжний баланс галузі.
- Оснащення шахт вітчизняним та імпортованим обладнанням.
- Соціально-економічні та екологічні проблеми, пов'язані із закриттям шахт.

#### **Газ і нафта**

Нафтова і газова промисловість є основою паливно-енергетичного комплексу України і залишиться такою впродовж не менше двадцяти п'яти, тридцяти років. Така ситуація матиме місце і в більшості країн Європи та світу.

Пріоритетним ресурсом в Україні є газ, його частка в енергобалансі складає 41 %, нафти 19 %.

#### **Газ**

- Транспорт газу до Європи. Кількість і точність контрольних вимірювальних пунктів на кордонах України.
- Втрати газу при транспортуванні.
- Витрати енергії на транспортування газу.
- Внутрішнє споживання газу.
- Собівартість і ціна.
- Вплив ціни газу на рентабельність головних галузей виробництва України.
- Рівень забезпечення газового господарства технікою і обладнанням власного виробництва.

## **Дискусійна трибуна**

---

- Рентабельність.
- Внутрішні запаси газу і рівень їх добування.
- Інвестиції у газову промисловість.
- Фінансовий стан галузі.

### **Нафта**

- Собівартість і ціна транспорту нафти.
- Використання вітчизняного обладнання.
- Технологічний стан нафтопроводів.
- Реалізація нафтопродуктів в державі.
- Собівартість, ціна і рентабельність нафти.
- Інвестиції в основний капітал.

### **Уран**

- Об'єми добування і переробки уранової руди.
- Експорт урану та економічна вигода від цього.
- Імпорт ядерних касет.
- Вартість вивезення відпрацьованого ядерного палива.
- Сумарна собівартість 1 кВтгод енергії на ядерному паливі.
- Шляхи вирішення проблеми ядерних відходів.

### **Торф**

- Величина розвіданих запасів торфу та об'єми добування.
- Енергетичні характеристики торфів в Україні (теплотворна здатність).
- Використання торфу. ККД агрегатів на торфі (порівняльний аналіз).
- Перспективи використання торфу.
- Розвиток будівництва сучасних котлів для спалювання торфу.

### **Гідроенергоресурси**

- Потенційні можливості станцій Дніпровського каскаду.
- Використання енергії станцій Дніпровського каскаду.
- Собівартість енергії Дніпровського каскаду.

- Розвиток гідроелектростанцій на інших ріках України.

### **Двооксид цирконію**

- Запаси.
- Об'єми концентрату руди, собівартість і ціна.
- Об'єми переробки. Собівартість і ціна кінцевого продукту, що випускається в Україні.
- Виробництво цирконієвого концентрату.
- Перспективи цирконієвої металургії.

## **2. Оптимізація структури енергетичної системи України**

Динаміка перебудови генеруючих потужностей в напрямку забезпечення маневреності та підвищення економічності електроенергетичної системи (орієнтир – 50–55 % базисного електронавантаження, 30–35 % маневрового, 10–15 % пікового).

Ознакою забезпечення електричною енергією є баланс потреби та пропозиції. Що стосується пропозиції електроенергії, то вона визначається за допомогою:

- кількості енергії, що виробляється;
- якості енергії та її відповідності міжнародним стандартам (зокрема сталістю частоти і напруги);
- оптимізації і дотримання графіків електронавантаження;
- приведенні до мінімуму витрат енергії при її транспортуванні (не більше 3 %);
- запровадженням надійних і точних приладів вимірювання споживання енергії;
- досягненням 100 % сплати за спожиту електроенергію;
- дотриманням нормативів електроспоживання у виробництві, сфері послуг і домашніх господарствах;
- опрацюванням питання щодо можливості розвитку в Україні атомної енергетики на природному урані;

- переглядом питання щодо доцільності створення українського "ядерного паливного циклу" (українська частина у даному проекті торкається лише цирконієвої частини у виробництві твелів і власного концентрату фториду урану, а збагачення урану відбуватиметься в Росії, США, Франції чи Англії. Своїми силами Україна вирішуватиме лише 45 % вартості твелів. Також потребують розгляду проблеми: актуальності терміну готовності підприємства – 2012 рік (початок закінчення терміну роботи усіх ядерних реакторів України); маркетингу майбутньої продукції на ринку атомних касет поряд із продукцією США, Росії, Франції, Англії і Китаю, і, у зв'язку з цим, рентабельності виробництва);
- модернізацією систем, пов'язаних з виробництвом, передачею і споживанням електричної енергії;
- створенням єдиного енергетичного "мосту" електроенергії ЄС–Україна–Росія.
- розвитку малої гідроенергетики на притоках Дніпра, Дністра, Дону і Південного Бугу;
- розвитку систем колекторів сонячного променювання і сонячних батарей;
- розвитку енергетичних систем, основаних на твердих електролітах, водневої енергетики, інших найновіших джерел енергії;
- розвитку цирконієвої енергетики (створення систем енергетичних комірок на основі двооксиду цирконію);
- розвитку енергетичних систем, що використовують надпровідність.

### **Споживання електроенергії:**

- Графік енергетичних навантажень. Оптимізація типів генеруючих систем у графіку енергетичних навантажень.
- Нормативи енергозатрат в народному господарстві. Графіки відхилень. Порівняння з ЄС.
- Ціна та собівартість електроенергії.
- Системи обліку енергії. Облік спожитої енергії. Облік втрат.

### **Показники динаміки використання нетрадиційних джерел електроенергії:**

- використання шахтного метану;
- виробництва електроенергії в системі газопроводів і газопостачання;
- перебудови функціонуючих газотурбінних агрегатів на парогазотурбінні агрегати;
- використання енергії перепаду тиску природного газу на газорозподільних станціях, розташованих поблизу великих споживачів газу; будівництво енергетичних модулів для виробництва електроенергії з використанням "детандер – генератор" агрегатів;
- поширення використання вітроенергетичних установок;
- розробки та удосконалення технологій використання рослинних джерел пального (використання ріпакової олії, спирту тощо);

**Прийняття за основу базової програми розвитку енергетики України, опрацьовану Інститутом загальної енергетики НАНУ та моніторинг впровадження цієї програми.**

## **6. ВХОДЖЕННЯ У ЄВРОПЕЙСЬКЕ СУСПІЛЬСТВО ТА ЧЛЕНСТВО УКРАЇНИ В ЄС**

В умовах світової глобалізації досягнути високого рівня життя населення неможливо без забезпечення інтеграційних процесів із світовою спільнотою. При тому інтеграційні зусилля слід спрямовувати до більш досконалих соціальних і технологічних систем. Членство України в ЄС стає необхідною умовою для подальшого високого рівня розвитку держави та громадянського суспільства.

Визначальним критерієм інтеграції Ук-

раїни в ЄС повинен стати принцип повної відповідності внутрішніх перетворень фундаментальним основам розвитку ЄС, особливо тим, що визначатимуть політико-правові основи української держави.

Україна має максимально використовувати можливості, закладені в "Європейській політиці сусідства" (ЄПС), а ЄПС розглядати як перехідний етап від партнерства до асоційованих відносин з перспективою членства. Протягом цього етапу має бути виконаний комплекс заходів (План дій), спрямованих на інтеграцію України в єдиний ринок ЄС.

Досвід інтеграції в ЄС країн вказує, що менш розвинуті країни, ставши членами ЄС, розвиваються і модернізуються більш швидким темпом. Всередині ЄС відбувається процес вирівнювання. Характерним є приклад Ірландії, яка на момент приєднання до Євро-союзу належала до недорозвиненої периферії Європи і потребувала допомоги. На даний час вона перетворилася на країну, що має найвищу серед усіх держав – членів ЄС частку високотехнологічного виробництва. Отже, інтегрування економіки до структури ЄС здатне стимулювати прискорений темп розвитку та економічної модернізації.

З урахуванням того, що в 2004 році до ЄС приєдналася велика група країн, з якими Україна має добрі торговельні стосунки, можна очікувати, що ЄС перетвориться для України на головне місце для збуту експортних товарів, потіснивши з цієї чільної позиції країни – члени СНД.

### **Основні завдання:**

#### **1. Забезпечення поетапної реалізації стратегічної цілі вступу до ЄС**

- набуття Україною членства в СОТ;
- підписання Угоди про асоціацію України до ЄС;
- створення зони вільної торгівлі між Україною та ЄС;

- створення Митного союзу між Україною та ЄС;
- вступ до Економічного та монетарного союзу ЄС.

#### **2. Інституційне забезпечення інтеграції до ЄС**

- створення Міністерства європейської інтеграції;
- активізація роботи Центру європейського та порівняльного права;
- створення Національного Конвенту з європейської інтеграції, до участі в якому запросити неурядові організації, що працюють за відповідними напрямками.

#### **3. Входження до спільного освітнього та наукового технологічного простору**

- підготовка окремого Плану дій Україна–ЄС у галузі науки і технологій;
- підписання Болонської декларації з вищої освіти.

### **Критерії вступу до ЄС:**

#### **Перша група критеріїв (політичні):**

- забезпечення свободи парламентських, президентських виборів і виборів до місцевих органів лади;
- створення та розширення діяльності демократичних інституцій, неурядових організацій;
- прийняття законодавства, що надійно захищає права меншин і створення відповідних установ;
- посилення боротьби з організованою злочинністю та корупцією;
- вирішення питань правового забезпечення та посилення спроможності боротьби з відмиванням коштів;
- створення надійно діючих інститутів у сфері юстиції і внутрішніх справ;
- здійснення заходів з протидії дискримінації у всіх сферах суспільного життя;

## **Загальні питання сучасної науково-технічної та інноваційної політики**

- гарантії незалежності судової влади, покращення функціонування судів;
- захист особистих свобод.

### **Друга група критеріїв (економічні):**

- макроекономічна стабільність;
- здійснення адміністративної реформи та структурних реформ;
- наявність ринкових інститутів;
- лібералізація торговельного режиму;
- відповідне правове забезпечення ринкових перетворень;
- поліпшення умов конкуренції;
- створення середовища, сприятливого для підприємницької діяльності;
- створення сприятливого інвестиційного клімату;
- підвищення кваліфікації робочої сили;
- поліпшення структури та диверсифікація експорту;
- здійснення промислової політики, спрямованої на зниження матеріало та енергомісткості продукції.

### **Третя група індикаторів ("членські"):**

- визнання та включення до національного законодавства "спільного доробку" ЄС (acquis communautaire), тобто сукупності правових документів, напрацьованих Співтовариством (договори, постанови, директиви та інші акти);
- забезпечення дійового застосування acquis через відповідним чином пристосовані адміністративні та судові структури.

**Критерії конвергенції** – це умови, виконання яких дає державам-членам право всту-

пу до Економічного та монетарного союзу та які стосуються цінової стабільності, дефіциту бюджету, державного боргу, стабільності національної валюти та відсоткових ставок.

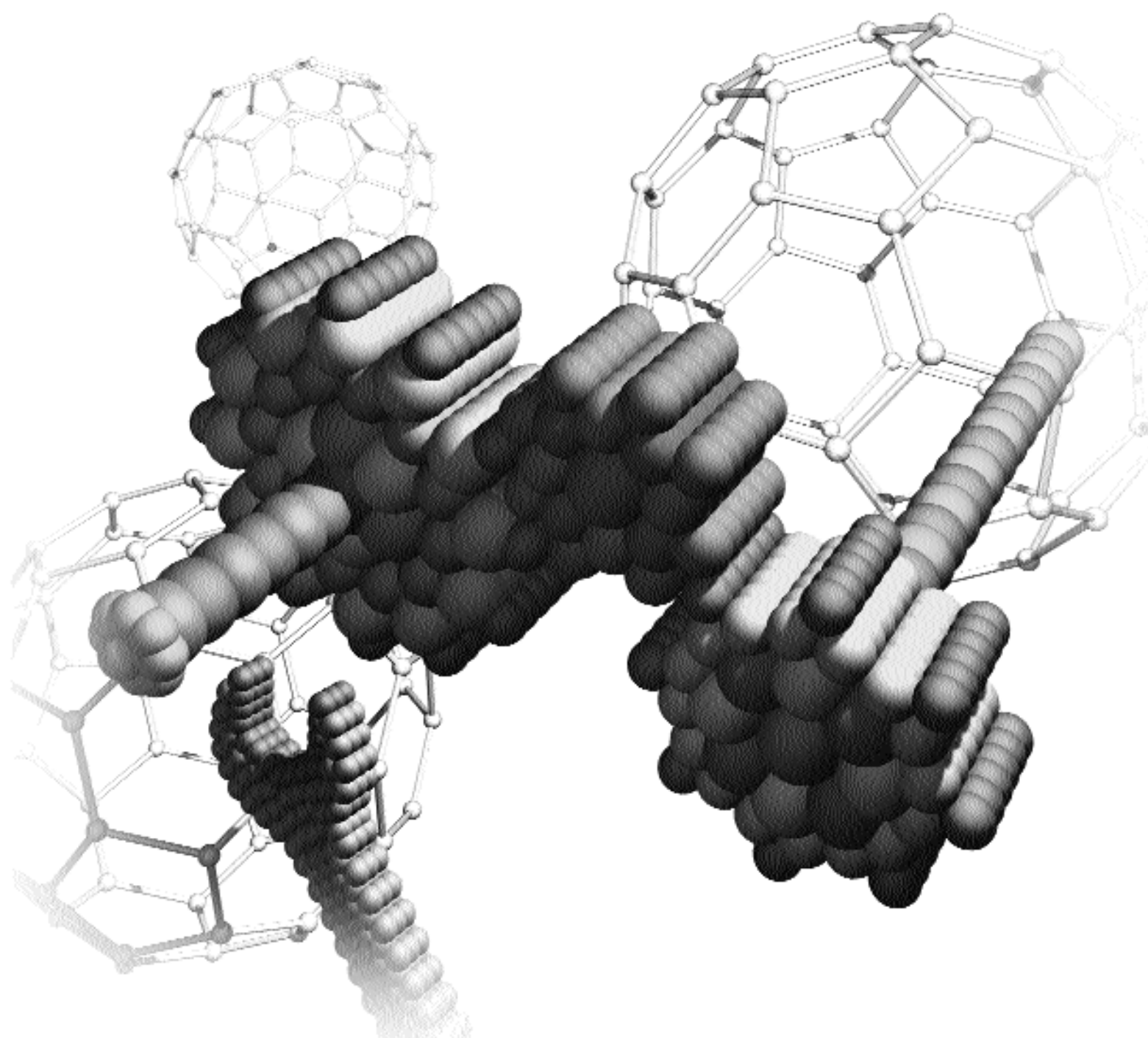
- відношення державного дефіциту до валового внутрішнього продукту не повинно перевищувати 3 %;
- відношення державного боргу до валового внутрішнього продукту не повинно перевищувати 60 %;
- достатній рівень стабільності цін та сталість середніх темпів інфляції протягом одного року до проведення такого дослідження. Причому, цей рівень не повинен перевищувати більш ніж на півтора відсоткових пункти три кращих показники рівня стабільності цін країн-членів;
- довгострокова номінальна відсоткова ставка не повинна перевищувати більш ніж на два відсоткових пункти три кращих показники стабільності цін країн-членів;
- протягом щонайменше двох років і без значного напруження з боку відповідної країни нормальне відхилення величини обмінного курсу не повинно виходити за граничні значення, передбачені механізмом обмінного курсу країн-членів.

Крім того, критерії конвергенції повинні забезпечити збалансованість економічного розвитку в економічному та монетарному союзі та не допускати виникнення ані найменшого напруження між державами-членами.

**Тимчасова спеціальна комісія  
ВР України з питань майбутнього**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ  
ІННОВАЦІЙНІ ПРОЕКТИ  
НАЦІОНАЛЬНОЇ АКАДЕМІЇ НАУК  
УКРАЇНИ

---



## БАГАТОЕЛЕМЕНТНИЙ ТЕПЛОВІЗОР З ВИСОКОЮ ТЕМПЕРАТУРНОЮ ЧУТЛИВІСТЮ ТА ТЕЛЕВІЗІЙНОЮ ЧАСТОТОЮ КАДРІВ

Ф. Ф. Сизов<sup>1</sup>, О. В. Бехтір<sup>1</sup>, Є. О. Білевич<sup>1</sup>, О. Г. Голенков<sup>1</sup>,  
Е. Ю. Гордієнко<sup>3</sup>, М. Т. Грінченко<sup>2</sup>, Ж. В. Гуменюк-Сичевська<sup>1</sup>,  
С. Є. Духнін<sup>2</sup>, В. В. Забудський<sup>1</sup>, П. В. Завадський<sup>1</sup>, І. І. Ільницький<sup>1</sup>,  
С. Л. Кравченко<sup>1</sup>, В. М. Крайовий<sup>1</sup>, В. П. Рева<sup>2</sup>, С. В. Корінець<sup>2</sup>,  
Л. О. Писаренко<sup>2</sup>, Ю. В. Фоменко<sup>3</sup>, А. В. Шевчик<sup>1</sup>, Г. В. Шустакова<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Інститут фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України, Київ

<sup>2</sup>Інститут мікроприладів НАН України, Київ

<sup>3</sup>Фізико-технічний інститут низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України, Харків

Надійшла до редакції 08.04.05

**Резюме:** Розглянуто основні характеристики та принципи побудови і функціонування малогабаритного тепловізора на основі багатоелементного фотоприймального пристрою формату 2×64 з телевізійною частотою кадрів та високою температурною роздільною здатністю, який було створено за науково-технічним інноваційним проектом НАН України "Організація серійного виробництва портативного інфрачервоного тепловізора для медичної діагностики та контролю тепловтрат в промисловості та комунальній сфері".

**Ключові слова:** фотодіод, багатоелементний фотоприймальний пристрій, схеми зчитування, тепловізор.

Ф. Ф. Сизов, Е. В. Бехтир, Е. О. Билевич, А. Г. Голенков, Э. Ю. Гордиенко, М. Т. Гринченко, Ж. В. Гуменюк-Сычевская, С. Е. Духнин, В. В. Забудский, П. В. Завадский, И. И. Ильницкий, С. Л. Кравченко, В. М. Краевой, В. П. Рева, С. В. Коринец, Л. А. Писаренко, Ю. В. Фоменко, А. В. Шевчик, Г. В. Шустакова. МНОГОЭЛЕМЕНТНЫЙ ТЕПЛОВИЗОР С ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬЮ И ТЕЛЕВИЗИОННОЙ ЧАСТОТОЙ КАДРОВ.

**Резюме:** Рассмотрены основные характеристики и принципы построения и функционирования малогабаритного тепловизора на основе многоэлементного фотоприемного устройства формата 2×64 с телевизионной частотой кадров и высокой разрешающей способностью по температуре, созданного в рамках инновационного проекта НАН Украины "Организация серийного производства инфракрасного тепловизора для медицинской диагностики и контроля теплотерь в промышленности и коммунальной сфере".

**Ключевые слова:** фотодиод, многоэлементное фотоприемное устройство, схемы считывания, тепловизор.

F. F. Sizov, O. V. Bekhtir, E. O. Bilevych, A. G. Golenkov, E. Yu. Gordienko, M. T. Grinchenko, J. V. Gumenjuk-Sichevska, S. E. Dukhnin, V. V. Zabudsky, P. V. Zavadsky, I. I. Il'nitsky, S. L. Kravchenko, V. M. Krajovyi, V. P. Reva, S. V. Korinets, L. O. Pisarenko, Yu. V. Fomenko, A. V. Shevchyk, G. V. Shustakova. **MULTIELEMENT THERMAL IMAGER WITH HIGH TEMPERATURE SENSITIVITY AND TV FRAME FREQUENCY.**

**Abstract:** Basic characteristics, design principles and functioning of compact thermal imager on the base of  $2 \times 64$  focal plane array with television frame frequency and high thermal resolution, which was designed and manufactured according to innovation project of NASU "Infrared imager serial production organization for medical diagnostics and control of the heat loss in industry and municipal economy", are considered.

**Keywords:** photodiode, focal plane array, readout circuit, thermal imager.

## **ВСТУП**

Пристрої технічного зору в областях електромагнітного спектру, де людське око нечутливе до випромінювання, сьогодні є одними із найважливіших у сенсі отримання додаткових джерел інформації про оточуюче середовище. Одним із напрямів, який найбільш стрімко розвивається у цій області є розробка принципів та побудова приладів технічного зору інфрачервоного діапазону спектра (див., напр., [1, 2, 3]).

Мета виконання інноваційного проекту полягала в тому, щоб використовуючи набутий досвід в Інституті фізики напівпровідників НАН України у вивченні властивостей вузькощілинних напівпровідників та розробці технологій створення фотодіодних приймачів ІЧ-випромінювання на їх основі, досвід у розробці великих інтегральних схем зчитування інформації з багатоелементних фотоприймачів ІЧ діапазону спектра (Інститут мікроприладів НАН України) та набутки у розробці конструкцій тепловізійних приладів попереднього покоління (Фізико-технічний інститут низьких температур НАН України) створити конструкторсько-технологічну документацію та тепловізійний прилад для візуалізації власного інфрачервоного (ІЧ) випромінювання об'єктів без зовнішньої підсвітки у реальному масштабі часу, на основі яких у найближчий термін можна забезпечити в Україні розробку та виготовлення сучасної конкурентноспроможної в світі продук-

ції, необхідної для розв'язання проблем екології, військової техніки, пожежної безпеки, медицини, астрономії і навіть керування автомобільним транспортом [4, 5] тощо, і експорт якої, у відповідності з рішеннями міжнародних комісій, заборонений (або обмежений низькоефективними приладами) для передачі з високорозвинутих у технологічному та технічному плані країн-виробників цієї продукції. У медицині, наприклад, ІЧ-термографія зараз стрімко розвивається у зв'язку з демонстрацією в останній час, саме завдяки удосконаленню ІЧ-систем, великих можливостей цих технологій у ранній діагностиці раку молочної залози, ідентифікації атеросклеротичних бляшок, хвороби коронарних судин, безконтактного виявлення глибини опікових ран, післяопераційної діагностики швів тощо (див., напр., [6, 7, 8]).

Маючи великий науково-технічний потенціал, Україна на даний момент не має власного виробництва лінійчатих та матричних ІЧ фотоприймачів діапазону 3–5 та 8–12 мкм (найбільш ефективних для засобів технічного зору) з великими інтегральними схемами зчитування інформації, що мають граничні характеристики, і тепловізійних приладів на їх основі, що дозволило б створювати тепловізійні системи з високою роздільною просторовою та температурною здатністю для візуалізації власного випромінювання об'єктів без зовнішньої підсвітки в реальному масштабі часу (телевізійний стандарт).

1. СКЛАД ТЕПЛОВІЗОРА

Тепловізор – пристрій, призначений для реєстрації теплового випромінювання у вигляді термозображень (термограм), які можуть відтворюватися на стандартному моніторі або накопичуватися у цифровій формі. На рис. 1 представлено принципову схему поділу на функціональні модулі тепловізора, що розроблений Інститутом фізики напівпровідників ім. В. Є. Лашкарьова НАН України у співробітництві з Інститутом мікроприладів НАН України та Фізико-технічним інститу-

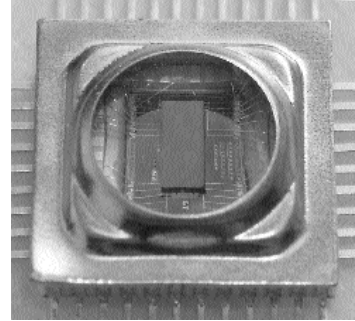


Рис. 2. Фотоприймальний модуль (лінійка фоточутливих елементів, яка згібридизована зі схемою зчитування та розміщена у контактному пристрої)

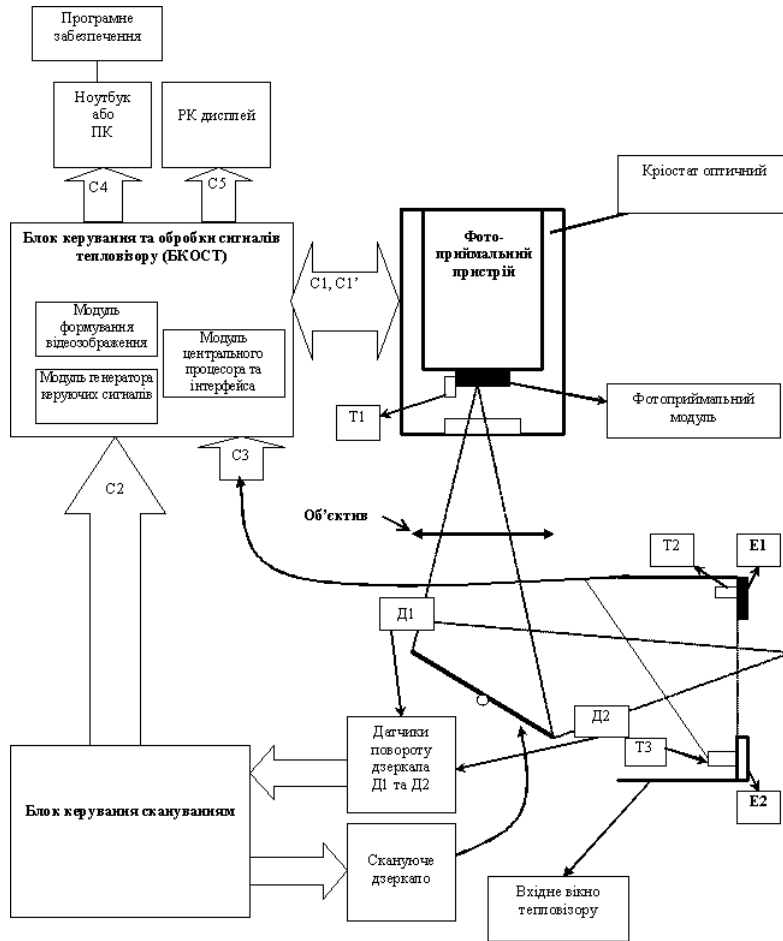


Рис. 1. Принципова схема функціональних модулів тепловізора. Е1, Е2 – температурні еталони для корекції неоднорідності чутливості фотодіодів, Т1, Т2 – датчики температури, Д1, Д2 – датчики початку та закінчення сканування, С1, С1', С2, С3, С4, С5 – сигнали взаємодії БКОСТ та основних компонентів

том низьких температур ім. Б. І. Веркіна НАН України.

Фотоприймальний модуль розташований у вакуумній частині оптичного кріостата, разом складаючи фотоприймальний пристрій (ФПП). Фотоприймальний модуль представляє собою лінійку фоточутливих елементів форматом  $2 \times 64$ , згібризованих з фокальним процесором (схемою зчитування) для керування режимами роботи та попередньої обробки сигналів, та змонтованих в спеціальний контактний пристрій (див. рис. 2). За рахунок розміщення схеми зчитування в холодній зоні значно зменшується кількість електричних підводів, а значить зменшуються теплопритоки. Крім того, за рахунок безпосередньої близькості між джерелом сигналу та схемами його обробки значно підвищується шумозахищеність фотоприймального пристрою в цілому.

Безпосередньо до контактної пристрою приклеюється охолоджувана діафрагма, що забезпечує формування необхідного кута зору та обмеження фонового випромінювання. Вхідне вікно фотоприймального пристрою виготовлено з оптичного германію з інтерференційним покриттям.

Сигнали з ФПП реєструються блоком керування та обробки сигналів тепловізора



Рис. 3. Зовнішній вигляд розробленого та виготовленого тепловізора

(БКОСТ), який призначений для управління схемою зчитування фотоприймального модулю тепловізора, реєстрації вихідних сигналів, їх обробки та формування відео- і цифрового сигналу. Відеосигнал формує зображення на вмонтованому в корпус тепловізора екрані або на зовнішньому аналоговому моніторі, що підключається через роз'єм ВИДЕО. Цифровий сигнал представляє собою послідовний, в форматі USB 2.0, потік даних, що несуть інформацію про амплітуди вихідних сигналів фотоприймального пристрою.

За допомогою програмного забезпечення можна зробити обробку тепловізійного зображення, в тому числі, виконати корекцію за допомогою просторових, частотних фільтрів та інших алгоритмів, а також застосувати до чорно-білої термограми псевдокольорову палітру.

Строкова розгортка здійснюється за допомогою блоку сканатора зі скануючим дзеркалом.

Температурні еталони E1, E2 забезпечують корекцію сигналів неоднорідних за чутливістю елементів лінійки приймачів випромінювання шляхом порівняння вихідних си-

Таблиця 1. Технічні характеристики тепловізора

Компоновка ФПП	Лінійчатий фотоприймач HgCdTe
Кількість фотодіодних елементів	128 (2×64)
Розмір пікселя	Ø 30 мкм
Метод охолодження	Рідкий азот, 78 К
Миттєве поле зору:	
горизонтальне	1,5 мрад
вертикальне	1,5 мрад
Поле зору:	
горизонтальне	0,24 рад
вертикальне	0,18 рад
Температурна роздільна здатність ФПП при температурі $T=30^{\circ}\text{C}$	$\leq 80$ мК
Відстань до об'єкту	0,5–100 м
Кадрова частота	25 Гц
Спектральний діапазон	2–12 мкм
Живлення	~ 220 В, =12 В
Розміри	350×125×180 мм
Вага	3,5 кг
Час роботи без дозаправки азотом	$\geq 5$ год.

гналів фотоприймального модуля при фокусуванні на холодному та теплому еталону випромінювання. Датчики температури T2 і T3 вимірюють температуру теплового та холодного еталонів E1 та E2, T1 – робочу температуру в криостаті. Датчики початку і закінчення сканування відповідають за синхронізацію кадрової розгортки.

Зовнішній вигляд тепловізора показаний на рис. 3. Основні характеристики приладу приведені в таблиці 1.

## 2. ФОТОДЮДНА ЛІНІЙКА

На сьогоднішній час основним матеріалом для виготовлення приймачів ІЧ-діапазону є твердий розчин CdHgTe [9]. Висока квантова ефективність приймачів на основі CdHgTe вигідно відрізняє їх від приймачів на основі надграток GaAs/AlGaAs, діодів Шотткі на основі PtSi та гетероструктур GeSi/Si. Це дає можливість використовувати короткі часи накопичення сигналів у схемі зчитування та одержувати зображення з частотою кадрів, значно більшою частоти телевізійного стандарту. При виконанні роботи для отримання

фоточутливих елементів використовувалися епітаксійні плівки CdHgTe, вирощені на монокристалічних підкладках CdZnTe. На епітаксійних плівках CdHgTe розміру 6,0×2,0 мм розміщено 128 фотодіодів (ФД), розташованих в два ряди по 64 елементи в кожному, що дозволяє формувати зображення без зазорів між фоточутливими елементами на відміну від матричних приймачів випромінювання. Форма фотодіодів – коло діаметром 30 мкм, відстань між діодами в ряду – 30 мкм, а між рядами – 60 мкм. Обрана форма діодів забезпечує рівномірність електричного поля по всьому периметру діода. Розташування діодів та відстань між ними узгоджені з розташуванням відповідних контактних площадок на пристрої зчитування, на який монтується кристал фотоприймача за допомогою мікроконтактів – індієвих стовпчиків з діаметром  $d \approx 10$  мкм.

## 3. ПРИСТРІЙ ЗЧИТУВАННЯ

Схема зчитування (велика інтегральна схема), блок схема якої наведена на рис. 4, у складі ФПП повинна забезпечувати необхідні електричні режими роботи КРТ-фотоприймача, а саме:

- подачу регульованої електричної напруги зміщення на фотодіоди;
- зчитування інформації з фотодіодів;
- накопичення, запам'ятовування цієї інформації у вигляді зарядових пакетів, та її попередню обробку.

Малі амплітуди сигналів від КРТ-фотодіодів обумовлюють наявність високих вимог до зворотнього зміщення, що задає робочу точку фотодіодів, як щодо величини пульсацій, так і його рівномірності по 128 інформаційним каналах. Схема зчитування повинна мати малі власні шуми, щоб реалізувати роботу фотоприймального пристрою у режимі, обмеженому флуктуаціями фонового

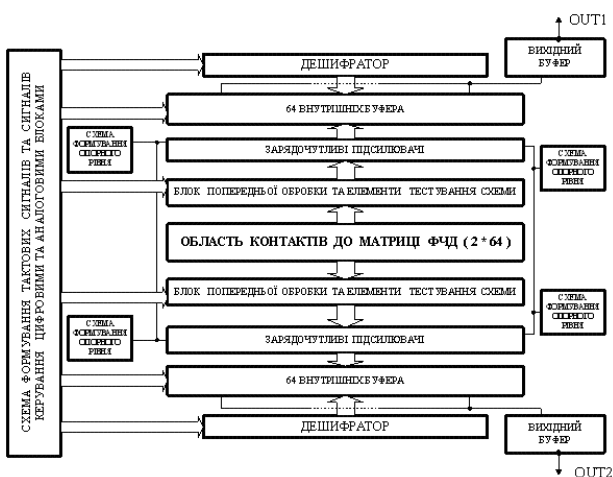


Рис. 4. Блок-схема великої інтегральної схеми зчитування

випромінювання, та високу зарядову ємність для забезпечення високого значення динамічного діапазону. Розроблені та виготовлені кремнієві великі інтегральні схеми (схеми зчитування) повністю відповідають поставленим вимогам [10].

Схему зчитування можна розділити на три частини: частину для фокальної площини, аналогову частину та схему керування. До частини фокальної площини відносяться область контактів до матриці фоточутливих детекторів (ФЧД) та блок попередньої обробки і елементи тестування схеми. До аналогової частини відносяться схеми формування опорного рівня, зарядочутливі підсилювачі, внутрішні буфери, вихідні буфери. До схеми керування відносяться ланцюги формування тактових сигналів керування цифровими та аналоговими блоками, дешифратор.

Центральну частину кристала займає область контактів до матриці фоточутливих діодів (ФЧД). В ній розміщені 128 контактних площадок для підключення ФЧД, а також контактні площадки для підключення спільного виводу матриці ФЧД. Зважаючи на те, що площадки для підключення спільного виводу матриці ФЧД, крім електричного з'єднання служать для механічного контакту кристалу матриці ФЧД з кристалом схеми зчитування, кількість їх рядів збільшена до 3-х з кожної сторони.

Блок попередньої обробки та елементи тестування схеми розміщені безпосередньо біля внутрішніх вхідних контактних площадок ФЧД. Вони забезпечують тестування мікросхеми і попередню обробку вхідного сигналу для кожного фоточутливого діода. Цей сигнал подається на схеми зарядочутливих підсилювачів, які формують і зберігають сигнал. Зчитування сигналів від фоточутливих діодів в потрібному порядку і керування роботою аналогових складових забезпечує схема керування, яка виробляє необхідні так-

**Таблиця 2. Параметри схем зчитування**

ПАРАМЕТР	ЗНАЧЕННЯ	
	Спроектовано	Результати вимірювань
Максимальна зарядова ємність, пКл	≥ 3,0	≤ 3,4
Максимальна частота зчитування, МГц	2,5	2,5
Максимальна амплітуда вихідного сигналу, В	≥ 3,0	≤ 3,5±0,5
Нелінійність вихідного сигналу, %	≤ 3,0	≤ 3,0
Динамічний діапазон, дБ	≥ 68	≥ 68
Ємність навантаження, пФ	≤ 30	≤ 30
Навантажувальний опір, кОм	≥ 100	≥ 10
Споживана потужність, мВт	≤ 70	≤ 50

туючі напруги. Схема формування опорного рівня забезпечує напругу зміщення для всіх аналогових блоків пристрою зчитування.

Параметри виготовлених зразків схем зчитування наведені у таблиці 2. Вимірювання проводились при нормальних кліматичних умовах, температурі  $T = 22 \pm 2^\circ\text{C}$  за спеціально розробленою методикою, що дозволяє на основі вимірювань при  $T = 300\text{ K}$  прогнозувати параметри для робочої температури  $T = 78\text{ K}$ . Дослідження підтвердили, що при робочій температурі (78–80 K) параметри схем зчитування відповідають прогнозованим [11].

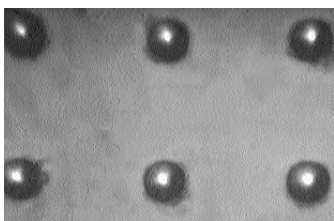
Елементами, які забезпечують з'єднання двох чипів, є індієві стовпчики. Для забезпечення якісного та надійного з'єднання розроблена спеціальна металева структура між шарами алюмінію та індію, яка включає в себе контактуючий та бар'єрний шари металів для отримання низького за рівнем опору контактного з'єднання.

Формування площадок цих металів виконувалось за допомогою контактної фотолітографії, у той час коли вся схема виготовлювалась за допомогою проекційної літографії. Це накладало спеціальні вимоги на виготовлення робочих фотошаблонів (6 шт.), які б давали можливість забезпечити мінімальне розсміщення між елементами інтегральної мікросхеми, виготовленої з використанням проекційної фотолітографії, та елементами контактної фотокопії.

#### **4. ГІБРИДИЗАЦІЯ КРТ-ЛІНІЙКИ ФОТОПРИЙМАЧІВ З КРЕМНІЄВОЮ СХЕМОЮ ЗЧИТУВАННЯ**

Фотоприймальний модуль, що складається з КРТ-лінійки фотоприймачів (кадмій-ртуть-телур) та кремнієвої схеми зчитування, формується за допомогою гібридної технології, заснованої на прецизійному з'єднанні двох функціональних частин в діючий пристрій через взаємні контактні виводи, які є одночасно електричними і механічними. При розташуванні функціональних частин фотоприймального модуля (ФМ) в одній площині з'єднання відбувається за допомогою розпаювання, а при розташуванні частин лицьовими сторонами одна до одної – по так званій "фліп-чип" технології за допомогою індієвих стовпчиків (рис. 5).

При проведенні гібридного з'єднання за "фліп-чип" технологією кристали КРТ-лінійки фотоприймачів та кремнієвої схеми зчитування розташовуються плоскопаралельно, лицьовими сторонами один до одного, а індієві контактні виводи на обох схемах прецизійно суміщені один відносно іншого. При з'єднанні двох кристалів відбувається взаємно пластична деформація індієвих стовпчиків і їх контактна поверхня значно збільшується. Крім того відбувається взаємна дифузія матеріалу (холодне зварювання), що в цілому забезпечує якісний електричний контакт і механічну міцність з'єднань. Для відтворюваності та надійності гібридного з'єд-



**Рис. 5.** Сформовані за розробленою технологією індієві стовпчики ( $\varnothing 11,5$  мкм)

нання індієві стовпчики повинні бути ідентичними за висотою і геометричними розмірами, повинні мати гарну адгезію до нижче розташованого на схемі шару. Індієві стовпчики формуються за допомогою стандартної мікроелектронної технології із використанням ряду фотолітографічних процесів та вакуумного формування металевих шарів. Висота формуємих за вищезгаданою технологією індієвих стовпчиків знаходиться в діапазоні 7–10 мкм.

#### **5. ОПТИЧНИЙ КРІОСТАТ**

Для охолодження багатоеlementного фотоприймача CdHgTe до температури рідкого азоту ( $\approx 78$  К) був розроблений та виготовлений оптичний кріостат заливного типу. Заливні кріостати, незважаючи на розробку багатьох видів мікрокриогенних установок на різноманітних фізичних принципах, на сьогоднішній день являються основним засобом охолодження елементів мікроелектроніки. Вони прості в конструкції, надійні та зручні в експлуатації, споживають мінімум енергії і мають переваги у ціновому відношенні.

Теплова ефективність заливних кріостатів визначається параметрами дренажної горловини, пакета екрано-вакуумної теплоізоляції (ЕВТІ) (взаємним розміщенням екранів та теплообміном між ними), а також інтенсивністю променистого, кондуктивного та конвективного теплообміну у горловині та сосуді кріостату.

Труднощі розробки даного кріостату були обумовлені помітним тепловиділенням фотоприймального чіпу (а саме схеми зчитування).

Процес виготовлення кріостата полягав у наступному. З нержавіючої сталі 2Х13 виготовлялася внутрішня склянка, що представляє собою циліндр діаметром 50 мм. У торець одного з днів вварювалася трубка для заливання рідкого азоту. Зовні на вну-

трішню склянку припаювалася виконана з міді підставка спеціальної форми, на яку потім монтувався фотоприймальний модуль. У верхній і нижній торцевих частинах внутрішньої склянки розташовані порожнини з мідної сітки, заповнені сумішшю адсорбентів: палладійованим силікагелем, що попередньо обезводнювався в муфельній печі протягом 8 годин при температурі 100°C, та адсорбентом СКМ-4.

При термоударах у межах  $T \sim 80\text{--}300\text{ K}$  і більше всі елементи відчувають механічні напруження, тим більші, чим більша різниця між коефіцієнтами температурного розширення матеріалів, з яких вони виготовлені. Узгодження різниць коефіцієнтів температурного розширення здійснювались за допомогою використання спеціального контактного пристрою (рис. 2), наклеєного за допомогою теплопровідного клею на сапфірову підкладку, що в свою чергу через індійський прошарок припаяна до мідної площадки кріостату.

Після розміщення фотоприймального модуля внутрішня склянка обгорталася кількома десятками шарів шарувато-вакуумної ізоляції. Вона складалася з перфорованого майлара ПЭТФ30 (спеціальна лавсанова плівка, покрита Al зі ступенем чорноти 0,03), що чергувався зі спеціальним синтетичним низькотемпературним папером товщиною 10 мкм (СНТ10). Загорнутий внутрішній стакан розміщався у зовнішній склянці з нержавіючої сталі. Усі вакуумні з'єднання здійснювались за допомогою зварювання. На зовнішній склянці напроти фотоприймального чіпу спеціальним клеєм, що забезпечував вакуумне з'єднання, приклеювалося вхідне германієве вікно з просвітлюючим покриттям, яке є прозорим в діапазоні від 2 мкм. Електричні виводи сигналів здійснювались через спеціальний вакуумний роз'єм. У нижній торець зовнішньої склянки впаювалася трубка  $\varnothing 3\text{ мм}$ , через яку потім здійсню-

валася відкачка вакуумної частини. Відкачка кріостата проводилася протягом кількох тижнів з використанням форвакуумного і паромасляного насосів до рівня вакууму  $10^{-5}\text{--}10^{-6}\text{ мм рт. ст.}$  При необхідності для пошуку мікротріщин використовувався гелієвий тічешукач ПТШ-10. Експерименти показали, що обрана конструкція кріостату дозволяє при кількості хладагенту 200 мл та тепловиділенні на чіпі до 100 мВт працювати без додаткової заливки рідкого азоту понад 4 години.

Кріостат з чутливим елементом кріпиться в спеціальний захисний екран на платформі, зовні якого був закріплений ІЧ об'єктив.

## **6. ОБ'ЄКТИВ**

Інфрачервоний (ІЧ) об'єктив призначений для формування зображення об'єктів та фону у площині фотоприймача в заданому спектральному діапазоні (в даному випадку  $\lambda = 2 \div 12\text{ мкм}$ ). На сьогоднішній день в якості ІЧ об'єктивів в основному використовують лінзові системи, які складають до 20 % вартості ІЧ термографічних приладів. Особливістю проектування ІЧ об'єктива є те, що за рахунок великого відносного отвору (оптична система має бути світлосильною, оскільки випромінювання в ІЧ області спектра досить слабке) наявні значні аберації, а при збільшенні кількості лінз зменшується коефіцієнт пропускання оптичного тракту в цілому. Дифракційна межа для оптичних систем ІЧ діапазону приводить до значних розмірів у фокальній площині спостережуваних точкових об'єктів. Так, діаметр кружка Ейрі (дифракційна межа) ІЧ об'єктива з відносним отвором

$$\frac{D}{f'} = 1:1 \quad (\text{де } D - \text{світовий діаметр вхідної лінзи, } f' - \text{фокусна відстань об'єктива})$$

для довжини хвилі  $\lambda = 10\text{ мкм}$  становить:

$$\Delta = 2,44 \cdot \frac{\lambda f'}{D} \cong 25\text{ мкм.}$$

Вихідними даними (визначеними на основі загальних вимог до проектування тепловізійних систем даного класу згідно з умовами експлуатації) для розрахунку конструктивних параметрів даного ІЧ об'єктива були:  $f' \cong 20$  мм – фокусна відстань;  $D_{\text{св}} \cong 20$  мм – світловий діаметр вхідної апертури;  $2\omega \cong 13^\circ$  – повне кутове поле зору в просторі предметів; розмір абераційної плями не більше 45 мкм (для уникнення перехресного засвітлення сусідніх фоточутливих елементів лінійки фотодіодів, які мають діаметр  $\varnothing 30$  мкм і розташовані в два ряди у шаховому порядку, див. розд. 2).

Розрахунок ІЧ об'єктива в тонких компонентах проводився на мінімум сферичної аберації. Подальше коригування конструктивних параметрів оптичної системи здійснювалося з урахуванням загального правила виправлення аберацій [12]: при оптимізації розрахованого на мінімум сферичної аберації ІЧ об'єктива, спочатку потрібно випра-

вляти такі аберації, як кривизна поля та астигматизм, а потім спотворення подібні комі, які змінюються пропорційно до квадрата апертури, і, нарешті, зменшувати помилки сферичної аберації на осі шляхом встановлення фотоприймача в площині Гаусса.

Задовільну якість зображення при забезпеченні заданих вихідних вимог на проектування оптичної системи вдалося отримати використавши чотири лінзи із сферичними поверхнями (матеріал лінз – германій ГОСТ 16153-80, просвітлююче покриття – 29И<sub>300</sub> ОСТ 3-1901-85: сульфід цинку нанесений випаровуванням у вакуумі при температурі 300°C). Розрахункові розміри абераційної плями склали: на осі (в центрі поля зору)  $d_0 \approx 38$  мкм, на краю поля зору  $d_b \approx 43$  мкм. На рис. 6 подано результати хвильового аналізу розробленого ІЧ об'єктива. Розрахункові дані абераційного та хвильового аналізів дають можливість зробити висновок, що спроектований ІЧ об'єктив дозволяє отримати надійні результати щодо просторової роздільної здатності приладу (тобто забезпечує задовільну якість зображення, сформованого в площині фотоприймача). При цьому розроблена ІЧ оптична система задовольняє вимогам щодо кардинальних величин та енергетичного балансу оптичного тракту, згідно з умовами експлуатації.

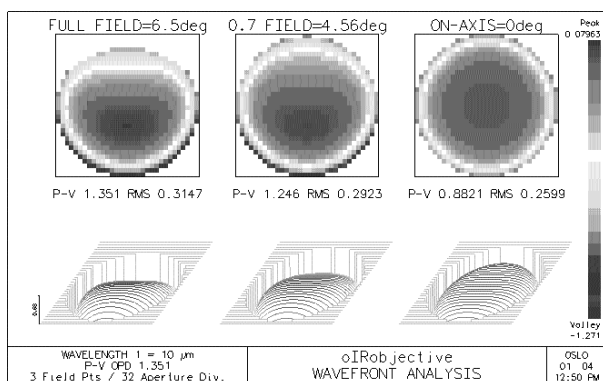


Рис. 6. Результати розрахунків розподілу енергії хвильових фронтів у фокальній площині в центрі та на краю поля зору ( $\omega = \pm 6,5^\circ$ ) для чотирьохлінзового германієвого об'єктива, а також для променів з нахилом ( $\pm 0,7 \omega$ ) в центрі поля зору для довжини хвилі  $\lambda = 10$  мкм (RMS – середньоквадратична похибка відхилення хвильового фронту від сфери, PV – оптична різниця ходу променів). У верхній частині рисунку подано розподіл енергії пучка променів у перерізі, внизу – вигляд хвильових фронтів у ізометрії

## 7. ПРИСТРІЙ СКАНУВАННЯ

Для даної тепловізійної системи принципом сканування було обране коливання плоского дзеркала у напрямку, перпендикулярному лінійці фоточутливих елементів (для даного випадку – горизонтальне коливання дзеркала при вертикальному розміщенні лінійки фотоприймачів). При цьому за один горизонтальний прохід лінійки реалізується відразу  $n$  строк,  $n$  миттєвих полів зчитується у паралель, і смуга пропускання відеосигналу у цьому випадку складає:

$$\Delta v = \frac{1}{2} \frac{N \cdot y \cdot z}{n \cdot dy \cdot dz} \quad \text{або} \quad \Delta v = \frac{N \cdot y \cdot z}{n \cdot dy \cdot dz},$$

де  $y, z$  – відповідно максимальні розміри по горизонталі та вертикалі поля, що сканується,  $dy, dz$  – відповідні розміри миттєвого поля зору,  $y \cdot z / dy \cdot dz$  – кількість пікселів зображення у кадрі,  $N$  – кадрова частота,  $n$  – кількість строк (кількість елементів у лінійці приймачів) (іноді смугу частот пропускання відеосигналу вибирають вдвічі більше для покращення чутливості системи у перехідному режимі).

У розробленому сканері сканування здійснюється за допомогою коливання плоского дзеркала, яке закріплене на пружині спеціальної форми. Резонансні коливання досягаються шляхом подавання послідовності прямокутних імпульсів до котушок електромагнітної системи, що розміщена під пружиною. В схемі горизонтальної розгортки передбачено датчик положення дзеркала, що представляє собою розташовану під дзеркалом оптичому світлодіод-фотодіод з відкритим оптичним каналом. Дзеркало розгортки має спеціальний переривник світлового потоку, розміщений у оптичному каналі таким чином, що при коливаннях дзеркала на виході фотодіоду формується електричний сигнал, пропорційний куту повороту дзеркала. Живлення оптичому здійснюється від прецезійного джерела опорної напруги з високою часовою та температурною стабільністю. Сигнал з датчика положення перетворюється у цифрову форму за допомогою 12-ти розрядного аналого-цифрового перетворювача і далі обробляється за допомогою електронної схеми блока управління сканером на базі сигнального процесору ADSP-2181, функціональним призначенням якого є вироблення послідовності імпульсів живлення електромагнітів та збудження і підтримка резонансних коливань, регулювання та стабілізація кута відхилення дзеркала, формування сиг-

налів строчної синхронізації зображення. Сигнальний процесор визначає миттєве значення кута відхилення дзеркала, що здійснюється по синусоїдальному закону, та інтегральне значення амплітуди коливань за декілька періодів. На основі цих даних процесор по спеціальному алгоритму виконує зміну скважності імпульсів керування електромагнітами, тим самим здійснюючи стабілізацію розмаху коливань дзеркала на потрібному рівні. Така схема включення та наявність датчика положення дозволяють у широких межах контролювати та підтримувати стабільним необхідний кут відхилення дзеркала при зміні резонансної частоти внаслідок коливань навколишньої температури.

Для даної конструкції резонансна частота, яка визначалася геометрією та жорсткістю пружини, а також розмірами та масою дзеркала, складала  $N = 50$  Гц, а зміна резонансної частоти у температурному інтервалі  $(0...+40)^\circ\text{C}$  – приблизно  $\pm 0,5$  Гц.

По сигналу датчика положення дзеркала виробляються імпульси синхронізації, що використовуються блоком керування та обробки сигналів для зазначення початку та кінця строки.

## **8. БЛОК КЕРУВАННЯ ТА ОБРОБКИ СИГНАЛІВ**

Блок керування та обробки сигналів складається з наступних модулів: модуль формування напруг ФПП; блок підсилення сигналів ФПП; блок аналого-цифрового перетворювача; модуль цифрової обробки; модуль формування телевізійного сигналу; USB модуль.

Модуль формування напруг виконує функції захисту ланцюгів живлення ФПП від перенавантаження, вимірювання та контролю температури в кріостаті, формування постійних та імпульсних напруг для забезпечення функціонування та управління схемою зчитування.

Блок підсилення сигналів ФПП складається з восьми однакових схем і виконує функцію узгодження рівнів вихідних напруг з вхідним діапазоном модуля АЦП.

В блок аналого-цифрового перетворювача входить вісім 16-ти розрядних АЦП AD7667A з послідовним виходом, сумісним з інтерфейсом SPI. Використання послідовного інтерфейсу дозволяє різко зменшити кількість провідників на печатній платі. Для зменшення взаємовпливу АЦП працюють в режимі "SLAVE". Запуск циклу перетворення відбувається синхронно з тактами роботи ФПП.

Схема модуля формування телевізійного сигналу складається з аналогової та цифрової частин. Цифрова частина модуля розташована в логічній матриці EP1C6Q240 і включає в себе схему зчитування двоportoвої пам'яті і схеми формування цифрового повного телевізійного сигналу (включно з рівнем чорного та синхроімпульсами). Аналогова частина модуля складається з цифроаналогового перетворювача AD9762AR і вихідного підсилювача AD25.1.

Для зв'язку з комп'ютером використаний FT8U245AM USB FIFO модуль. Він підтри-

мує протокол USB 2.0 і забезпечує двосторонній зв'язок між модулем цифрової обробки та ПК.

Модуль цифрової обробки зібраний на логічній матриці EP1C6Q240 і виконує функції фазового вирівнювання сигналів ФПП згідно топології, корекцію вольт-ватних характеристик елементів ФПП, апроксимацію дефектних елементів, формування сигналів для відображення на монітор, формування сигналів управління процесів обробки та обміну інформацією з комп'ютером і пультом управління.

Застосування багатоелементних ФПП в тепловізорах спрощує систему сканування та зменшує час формування кадру в порівнянні з одноелементними приладами або системами з невеликою кількістю чутливих елементів. В той же час багатоелементні ФПП, як правило, мають недолік, який полягає в тому, що вольт-ватні чутливості кожного елемента різні. На рис. 7 показані типові вольт-ваттні чутливості 128 елементів лінійки фотоприймачів. Для того, щоб досягти рівномірного зображення при освітленні різних фотоприймачів лінійки однаковим потоком випромінювання, враховуючи їх різні чутливості, треба домножити вихідні амплітуди сигналів на відповідні коригуючі коефіцієнти. Якщо не застосовувати корекцію вольт-ватних характеристик, то при спостереженні тепловізором з лінійкою фотоелементів рівномірно випромінюючої поверхні на екрані буде спостерігатись спотворене зображення, так зване "полосате поле". Для усунення цього недоліку застосовують різні методи корекцій вольт-ватних характеристик елементів ФПП.

Принцип використаної корекції полягає в тому що попередньо визначають коригуючі значення зміщень та коефіцієнтів для кожного елемента ФПП. Потім ці значення подають на суматор та перемножувач в момент приходу сигналів з відповідних елементів ФПП. Для вирахування коригуючих

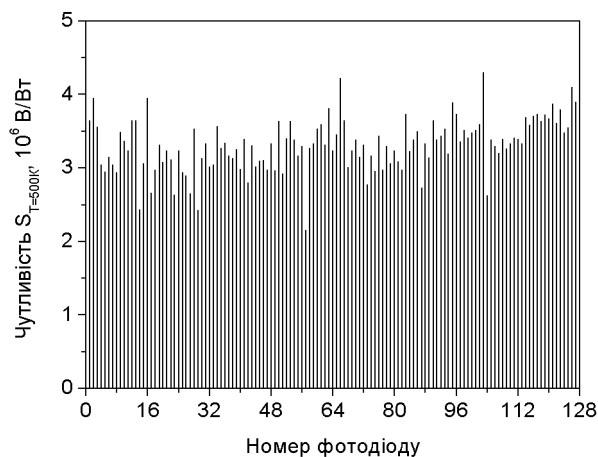


Рис. 7. Вольт-ваттні чутливості лінійки фотоприймачів формату  $2 \times 64$ . Середня чутливість дорівнює  $3.3 \cdot 10^6 \pm 10\% \text{ В/Вт}$

коефіцієнтів в поле зору ФПП в різні моменти часу вводять випромінювачі (температурні еталони) з різною інтенсивністю.

Корекція виконується в два етапи. На першому етапі нескориговані дані першого випромінювача поступають на вхід схеми розрахунку зміщення. На другому етапі частково скориговані дані другого випромінювача поступають на вхід схеми розрахунку коефіцієнтів. Амплітуди вихідних сигналів від 128 фоточутливих елементів коригуються за наступною формулою:

$$A_i = (A_i^0 - E_i^1) \cdot K_i' ,$$

де  $E_i^1$  – нескориговані значення амплітуд сигналів випромінювача з меншою інтенсивністю,  $A_i$  – скориговані значення амплітуд сигналів фотоприймачів,  $A_i^0$  – нескориговані значення амплітуд сигналів фотоприймачів,  $K_i'$  – коригуючий коефіцієнт, що розраховується за допомогою еталонних випромінювачів за наступною формулою:

$$K_i' = \frac{1}{N} \sum \frac{(E_i^2 - E_i^1)}{E_i^2 - E_i^1} ,$$

де  $E_i^2$  – нескориговані значення амплітуд сигналів випромінювача з більшою інтенсивністю,  $N$  – кількість фоточутливих елементів ( $N = 128$ ).

Модуль розрахунку коригуючих коефіцієнтів та модуль корекції виконані на програмній логічній матриці (ПЛМ) EP1C6Q240I7 виробництва ALTERA. Зображення, отримані за допомогою розробленого тепловізора, приведені в наступному розділі.

## **9. ОТРИМАНІ ТЕПЛОВІЗІЙНІ ЗОБРАЖЕННЯ**

На рисунках 8, 9, 10 приведені приклади різних тепловізійних зображень в градаціях сірого кольору, що отримані за допомогою створеного приладу. Темний колір відповідає

нижчій температурі досліджуваного об'єкту, а світлий – вищій. При виводі термограм на екран комп'ютера зазвичай чорно-білу палітру перетворюють на псевдокольори для полегшення їх візуального сприйняття опера-

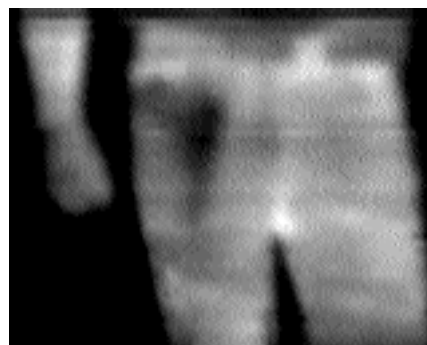


Рис. 8. ІЧ-знімок людини з пістолетом у кишені



Рис. 9. ІЧ зображення краватки під вовняним светром



Рис. 10. ІЧ зображення відбитку руки на обличчі через 1 хвилину після того, як її відняли від обличчя

тором, а також програмними методами підвищують контрастність. На рис. 8 можна побачити чітке зображення пістолету, що прихований в кишені штанів. На рис. 9 зображена верхня частина тіла людини в піджаку, сорочці, вовняному светрі та краватці. За рахунок різної теплопередачі від тіла краватку видно навіть під светром, що говорить про високу температурну чутливість тепловізора. На рис. 10 приведено термограму обличчя людини з відбитком руки на щоці. Знімок було зроблено через 1 хвилину після того, як долоня була віднята від щоки. Приведені знімки дозволяють зробити висновок про досить високу якість термограм, отримуваних за допомогою тепловізора, навіть без додаткової корекції зображень програмними методами. Температурна роздільна здатність створеного приладу при температурі досліджуваного об'єкта  $30^{\circ}\text{C}$  є не гіршою  $80\text{ мК}$ , а просторова роздільна здатність на мінімальній фокусній відстані  $350\text{ мм}$  дорівнює  $0,4\text{ мм}$ , що відповідає закладеному при розробці тепловізійного пристрою миттєвому куту зору  $1,5\text{ мрад}$ .

### 10. ВИСНОВКИ

За останні 15–20 років теплобачення вийшло на якісно новий рівень, що обумовило зріст виробництва та широке впровадження тепловізійної техніки у військові системи та у багато інших галузей господарської діяльності (неопромінююча діагностика деяких онкологічних захворювань, післяопераційна діагностика процесів заживлення, діагностика пожежонебезпечних об'єктів, нафтопроводів і нафтородовищ та ін.). Без тепловізійних приладів неможливо уявити сучасні засоби спостереження та виявлення, що застосовуються у наземних та морських умовах, авіації та космосі, а також у багатьох видах високоточного озброєння, що в значній мірі визначають стратегію і тактику ведення бойових дій. Медичні термографічні прилади

використовуються у розвинених країнах світу та відрізняються від рентгенівських та ультразвукових приладів для виявлення онкологічних захворювань (наприклад, молочної залози – мамографів) тим, що не призводять до опромінення пацієнтів.

Передові держави виділяють на розробку та закупку тепловізійних засобів значні кошти. Так, у 2000 році тільки у державному бюджеті США на такий напрям, як теплобачення було виділено більше  $\$ 1\text{ млрд}$ , а в усіх країнах з річним бюджетом більше  $\$ 10\text{ млрд}$  (включаючи США, Японію, Англію, Францію, Німеччину, Індію та Китай) на ці потреби було використано біля  $\$ 2\text{ млрд}$ . Комерційний світовий ринок ІЧ продукції (перш за все тепловізійних приладів) в 2000 році перевищував  $\$ 500\text{ млн}$  і за прогнозом фірм **Flow Research** та **Ducker Worldwide** (США) повинен в 2005 році перевищити  $\$ 800\text{ млн}$  [13].

Маючи великий науково-технічний потенціал, Україна повинна мати власне виробництво як лінійчатих та матричних пасивних ІЧ фотоприймачів діапазону  $8\text{--}12\text{ мкм}$  на основі напівпровідникових сполук  $\text{CdHgTe}$  з КМДН схемами зчитування, так і тепловізійних систем на їх основі.

В результаті проведеної роботи було розроблено технологічні, схемотехнічні, апаратні та програмні рішення для багатоелементного тепловізора, створено як окремі його частини, так і вперше в Україні прилад загального призначення в цілому. Розроблено комплект конструкторсько-технологічної документації для промислового дрібносерійного випуску тепловізора. Створений тепловізійний прилад, має високу ( $< 80\text{ мК}$ ) температурну та просторову ( $\leq 1,5\text{ мрад}$ ) роздільну здатність, тепловізійну частоту кадрів і може знайти застосування у медицині, при моніторингу втрат у нафтопроводах, теплотрасах, контролю тепловтрат у будівельних та промислових спорудах, інших застосуваннях екологічного моніторингу.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. **Gerald C. Holst.** Common sense approach to thermal imaging.–SPIE Optical Eng. Press, Bellingham, Washington USA, 2000.–377 p.
2. **Белозеров А. Ф., Омелаев А. И., Филиппов В. Л.** Современные направления применения ИК радиометров и тепловизоров в научных исследованиях и технике // Оптический журнал.–1998.–т. 65.–№ 6.–С. 16–27.
3. **Ушакова М. Б.** Зарубежные тепловизионные приборы первого, второго и третьего поколений // Прикладная физика.–2004.–№ 4.–С. 70–78, Прикладная физика.–2004.–№ 5.–С. 64–73.
4. **Fazio G. G.** Infrared array detectors in astrophysics // Infrared Phys. Technol.–1994.–v. 35.–pp. 107–117.
5. **Norton P. R.** Infrared detectors in the next millennium // Proc. SPIE.–1999.–v. 3698.–pp. 652–665.
6. **Pompei F.** Noninvasive temporal artery thermometry: physics, physiology, and clinical accuracy // Proc. SPIE.–2004.–v. 5405.–pp. 61–67.
7. **Абакумов В. Г., Рыбин А. И., Сватош Й. и др.** Системы отображения в медицине.–К.: Юніверс, 2001.–333 с.
8. **Сизов Ф. Ф., Бехтір Р. В., Забудський В. В., Маслов В. П., Чешук В. Є., Кравченко Р. В., Ліпкевич О. В., Єфременко В. Г., Гордієнко Е. Ю., Шустакова Г. В.** Дослідження можливостей дистанційної медичної термографії // Вісник національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут" (Приладобудування).–№ 25.–С. 133–137.
9. **Rogalski A.** Infrared detectors.–Amsterdam, Gordon and Breach Science Publ., 2000.–681 p.
10. **Рева В. П., Сизов Ф. Ф.** Проблемы проектирования и изготовления схем считывания для многоэлементных ИК фотодиодов // Прикладная физика.–2002.–№ 1.–С. 82–100.
11. **Sizov F. F., Reva V. P., Derkach Yu. V., Kononenko Yu. G., Golenkov A. G., Darchuk S. D., Filenko D. A.** IR sensor readout devices with source input // Semiconductor Physics, Quantum Electronics and Optoelectronics.–1999.–v. 2.–№ 1.– pp. 102–110.
12. **Джеймс Г. Бейкер.** Структура изображения и данные испытаний // Оценка качества оптического изображения. Юбилейный симпозиум к 50-летию Национального бюро стандартов США (18–20 октября, 1951) / Пер. с англ. О.А. Герасимовой.–М.: Изд-во геодезич. лит-ры, 1959.–С. 129–175.
13. **Филачев А. М., Пономаренко В. П., Таубкин И. И., Ушакова М. Б.** Инфракрасные матрицы и тенденции их развития. Часть I // Прикладная физика.–2003.–№ 1.–С. 105–120, Часть II // Прикладная физика.–2003.–№ 2.–С. 54–69.

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ГРУНТОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ ТА ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ЇХ СТАНАМИ

*І. В. Сергієнко, В. С. Дейнека*

*Інститут кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, Київ*

*Надійшла до редакції 29.03.05*

**Резюме:** На основі нових математичних моделей (нових класів задач з розривними розв'язками) опису різноманітних процесів, що характерні для багатокомпонентних ґрунтових середовищ з включеннями, високоточних чисельних методів їх розв'язання з великими об'ємами повнопов'язаних даних розроблена інформаційна технологія дослідження складних явищ в зазначених об'єктах. Технологія зорієнтована на використання суперкомп'ютерів сімейства СКІТ. Досліджені питання оптимального керування станами згаданих об'єктів.

**Ключові слова:** інформаційна технологія, суперкомп'ютери сімейства СКІТ, багатокомпонентні ґрунтові середовища, високоточні чисельні методи, великі об'єми повнопов'язаних даних, оптимальне керування станами багатокомпонентних розподілених систем.

**И. В. Сергиенко, В. С. Дейнека. ИНФОРМАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ГРУНТОВЫХ СРЕДАХ И ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ИХ СОСТОЯНИЯМИ.**

**Резюме:** На основании новых математических моделей (новых классов задач с разрывными решениями) описания разнообразных процессов, которые характерны для многокомпонентных ґрунтовых сред с включениями, высокоточных численных методов их решения с большими объемами полностью связанных данных разработана информационная технология исследования сложных явлений в указанных объектах. Технология ориентирована на использование суперкомпьютеров семейства СКІТ. Исследованы вопросы оптимального управления состояниями упомянутых объектов.

**Ключевые слова:** информационная технология, суперкомпьютеры семейства СКІТ, многокомпонентные ґрунтовые среды, высокоточные численные методы, большие объемы полностью связанных данных, оптимальное управление состояниями многокомпонентных распределенных систем.

**I. V. Sergienko, V. S. Deineka. INFORMATION TECHNOLOGY FOR INVESTIGATION OF PROCESSES IN MULTICOMPONENT GROUND MEDIA AND OPTIMAL CONTROL OF THEIR STATES.**

**Abstract:** The paper considers an IT used for investigation of complicated effects in multicomponent ground media with inclusions. An IT is based on new mathematical models (new classes of problems with discontinuous solutions) of description of different processes in multicomponent ground media with inclusions and on higher-order accuracy numerical methods of their solution under a large volume of completely-connected data. The technology is used for an intelligent SCIT cluster family. The problems of optimal control of the above-mentioned states are investigated.

**Keywords:** IT, intelligent SCIT cluster family, multicomponent ground media, higher-order accuracy numerical methods, large volume of completely-connected data, optimal control of the states of distributed systems.

Землі нашої держави багаті на різноманітні корисні копалини. Неконтрольоване природокористування та нераціональне ведення господарської діяльності призвели до зби-днення родовищ, рослинного світу, орних земель та до погіршення загального стану довкілля.

Досить небезпечними також є різноманітні приповерхневі дії (забудова, зокрема, висотними будинками не тільки ґрунтових схилів, а й рівнинних територій; створення підземних споруд різноманітного призначення; бездумна вирубка лісів тощо), які призводять до порушення природно збалансованих режимів руху ґрунтових вод.

Велика загроза нависла над Херсонщиною. Постійно збільшується площа її території, що затоплена водою від Каневського моря за умов поливу сільськогосподарських угідь, заїлення малих річок, руйнації дренажних систем. Збільшується мінералізація підземних вод артезіанських колодязів та ін.

Природно, що доцільність тієї чи іншої видобувної діяльності, створення підземних комунікацій, ведення наземного будівництва та різноманітна господарська діяльність має бути всебічно досліджена – промодельована і це можливо сьогодні за допомогою сучасних комп'ютерних засобів, на яких реалізовані сучасні нові інформаційні технології.

**1. МОДЕЛІ ТА ВИСОКОТОЧНІ МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ В БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ҐРУНТОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

Розвиток основних процесів в однорідних складових реальних ґрунтових середовищ (руху рідини, формування температурного стану, міграції хімічних елементів, переходу солей з твердого стану в розчин і навпаки, механічного деформування) досить повно описується відповідними диференціальними рівняннями в частинних похідних, отриманими на основі основних законів збереження та припущення суцільності середовища. Разом з цим для конкретних багатоконпонентних об'єктів (зокрема ґрунтових), природного чи штучного походжень, розвиток згаданих процесів суттєво залежить від неоднорідності досліджуваного тіла. Про це яскраво свідчать численні дані натурних спостережень, що проведені після Чорнобильської катастрофи, повені в Закарпатті, в зонах водойм-відстійників Качанівського нафтовидобувного вузла, в сильно-неоднорідних водоносних товщах Південно-східного району Татарстану, а також останні підтоплення Херсонської та Запоріжської областей, дані моніторингу свердловин добування прісних вод та ін. Окрім цього, необхідно зауважити, що

наявні тонкі включення (слабкопроникливі, слабкотривкі) породжують істотні відмінності відповідних характеристик (порових тисків, п'єзометричних напорів, дотичних зміщень тощо) на різних сторонах таких включень та тріщин. На цю обставину звернули увагу ще в 40-х роках минулого століття відомі вчені М. К. Гиринський та Г. М. Каменський, які врахували взаємодію водоносних горизонтів через слабкопроникливе включення шляхом введення певної умови, що в літературі отримала назву умови перетікання. За допомогою такого типу умови дослідники температурних процесів в тілах з включеннями враховували перетік тепла через слабкопроникливе включення.

Більш ретельне вивчення та врахування впливу наявних природних чи штучних тонких включень на досліджувані процеси (фільтрації рідини, фільтрації-вологпереносу, теплопровідності), проведене в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, дозволило уточнити згадану умову перетікання на випадок довільно розташованого в просторі тонкого слабкопроникливого включення  $\gamma$ , а потім і на більш загальний випадок – довільно розташоване в просторі тонке тришарове включення  $\gamma = \gamma_1 \cup \gamma_2 \cup \gamma_3$ , де  $\gamma_1, \gamma_3$  – слабкопроникливі складові,  $\gamma_2$  – розташована між  $\gamma_1, \gamma_3$  сильнопрониклива складова. Доведено, що вплив такого включення на рух рідини та температурний режим досить повно описується певними диференціальними виразами (умовами спряження)

$$L_i(u) = 0, \quad x \in \gamma, \quad (1)$$

де  $\gamma$  – серединна поверхня  $\bar{\gamma}$ ,  $u = u(x, t)$  – п'єзометричний напір, чи температура тіла в точці  $x = (x_1, x_2, x_3)$  декартової системи координат  $x_1, x_2, x_3$  в зазначений час  $t$ .

З метою зменшення термоопорів  $R_1, R_3$  слабкопроникливих складових  $\gamma_1, \gamma_3$  (для

вирівнювання температури по багатокомпонентному тілу) на практиці часто виконуються певні запобіжні заходи (зменшення зазорів між складовими тіла, влаштування фольгових прошарків та ін.).

При  $R_1 = R_3 = 0$  природна складова системи (1) переходить в головну [1]

$$[u] = -\delta, \quad x \in \gamma, \quad (2)$$

тобто на тонкому включенні заданий стрибок шуканого розв'язку  $u$  відповідної крайової чи початково-крайової задачі,  $\delta$  – деяка відома функція.

В Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України досліджені [1-10] задачі з умовами спряження: власного джерела; коли зміна температурного поля на  $\gamma$  описується диференціальним рівнянням в частинних похідних; різноманітні умови, що відображають вплив тонких слабкотривких включень чи тріщин на напружено-деформований стан складених тіл; умови спряження зосереджених теплоємностей, зосереджених мас (започаткованих А. М. Тихоновим, О. А. Самарським); різноманітні умови спряження на власні функції в спектральних диференціальних задачах та ін.

Ретельний аналіз різноманітних умов спряження (співвідношень, що враховують вплив тонких включень на досліджувані процеси) показав, що доцільно їх класифікувати як природні та головні [1], аналогічно як це зроблено з крайовими умовами в задачах математичної фізики відомим вченим С. Г. Міхліним.

В результаті проведених теоретичних досліджень для крайових задач, що описуються еліптичними рівняннями другого порядку з різноманітними типами умов спряження та змішаними крайовими умовами (в тому числі за наявних неоднорідних головних умов спряження та крайових умов), побудовані відповідні класичні узагальнені задачі (задачі в слабких постановках), що поля-

гають в пошуку функції  $u = u(x) \in H = \{v(x) \in \bar{H} : L_2(v) = \varphi\}$ , яка  $\forall w \in H_0 = \{v(x) \in \bar{H} : L_2(v) = 0\}$  задовольняє тотожність

$$a(u, w) = l(w), \quad (3)$$

де  $a(\cdot, \cdot) : \bar{H} \times \bar{H} \rightarrow R^1$  та  $l(\cdot) : \bar{H} \rightarrow R^1$  відповідно, деякі білінійна форма та лінійний функціонал,  $\bar{H} = \{v(x) : v|_{\Omega_i} \in W_2^1(\Omega_i), i = 1, 2\}$ ,  $R^1$  – множина дійсних чисел,  $W_2^1(\Omega_i)$  – простір функцій Соболева, що визначені на області  $\Omega_i$ ,  $L_2(v)$  – оператор, що задає головні крайові умови та головні умови спряження. Отримані достатні умови існування непорожніх множин  $H$  [1].

Доведені теореми існування та єдиності розривних розв'язків  $u \in H$  відповідних задач (3) [1, 7, 8]. Показано, що за умови достатньої гладкості на  $\Omega_i, i = 1, 2$ , узагальнений розв'язок  $u = u(x) \in H$  є класичним розв'язком вихідної диференціальної (крайової) задачі, де природні умови (крайові та спряження) виконуються автоматично.

Доведено, що єдині розв'язки  $u \in H$  задач вигляду (3) доставляють найменше значення на  $H$  функціоналу енергії

$$\Phi(v) = a(v, v) - 2l(v), \quad (4)$$

де білінійна форма  $a(\cdot, \cdot)$  та лінійний функціонал  $l(\cdot)$  визначені задачею (3).

Розроблено методику побудови класів  $H_k^N, H_{k0}^N$  розривних функцій методу скінченних елементів (МСЕ), де наближені розв'язки  $u_k^N \in H_k^N$  розглядуваних диференціальних задач є розв'язками наступних задач:

а) знайти функцію  $u_k^N \in H_k^N$  таку, що  $\forall v_k^N \in H_{k0}^N \subset H_0$  має місце тотожність

$$a(u_k^N, v_k^N) = l(v_k^N); \quad (5)$$

б) знайти функцію  $u_k^N \in H_k^N$  таку, що

$$\Phi(u_k^N) = \min_{v_k^N \in H_k^N} \Phi(v_k^N) = \min_{v_k^N \in H_k^N} (a(v_k^N, v_k^N) - 2l(v_k^N)). \quad (6)$$

Доведено еквівалентність задач (5), (6). Встановлено існування та єдиність їх спільного розв'язку  $u_k^N \in H_k^N$ . Отримано оцінки похибок наближених розв'язків

$$\|u - u_k^N\|_L \leq ch^k, \quad (7)$$

де  $\|\cdot\|_L = a^{1/2}(\cdot, \cdot)$  – енергетична норма, що породжена оператором вихідної задачі,  $u$  – класичний розв'язок,  $c = \text{const}$ ,  $h$  – найбільший з діаметрів всіх скінченних елементів,  $k$  – степінь поліномів МСЕ,  $N$  – кількість скінченних елементів, на які розбита область  $\bar{\Omega}$  з розрізом  $\gamma$ .

Доведено, що у випадку  $H_k^N \not\subset H$

$$\|u - u_k^N\|_L \leq ch^k, \quad 0 \leq \Phi(u_k^N) - \Phi(u) \leq c_1(h^{2k} + \bar{h}^{k+1}), \quad (8)$$

а при  $H_k^N \subset H$

$$0 \leq \Phi(u_k^N) - \Phi(u) \leq c_1 h^{2k}, \quad (9)$$

$$\|u - u_k^N\|_{W_2^1} \leq c_2 h^k, \quad (10)$$

де  $c_1, c_2 = \text{const}$ ,  $\bar{h}$  – найбільший з діаметрів скінченних елементів розбиття частини  $\Gamma_1$  границі області  $\bar{\Omega}$  та розрізу  $\gamma$ , на яких задані неоднорідні головні умови.

Для чисел обумовленості матриць  $A$  систем алгебраїчних рівнянь МСЕ

$$Ax = B, \quad (11)$$

отриманих на основі еквівалентних задач (5), (6), має місце оцінка

$$\text{cond}(A) \leq ch^{-2}, \quad (12)$$

де  $h$  – довжина найменшої з сторін прямокутної дискретної сітки розбиття складеної області  $\bar{\Omega}$ .

Отримані також еквівалентні узагальнені задачі вигляду (3), (4) для еліптичних задач, що визначені в циліндричних та полярних системах координат з розривними розв'язками. Для них побудовані відповідні класи  $H_k^N, H_{k0}^N$  функцій МСЕ. Для наближених

розв'язків  $u_k^N \in H_k^N$  отримані оцінки вигляду (7)–(10), а для чисел обумовленості матриць  $A$  систем алгебраїчних рівнянь МСЕ вигляду (11) – оцінку вигляду (12).

Зазначимо, що отримані оцінки (7)–(10) для розривних наближених розв'язків МСЕ за порядком кроку розбиття області  $\bar{\Omega}$  не гірші аналогічних, відомих для відповідних класів задач з гладкими розв'язками. Цю властивість має і оцінка (12).

Для всіх розглянутих класів задач розроблена методика заміни неоднорідних головних умов спряження та неоднорідних головних крайових умов природними з використанням малого параметру  $\varepsilon > 0$ . Встановлена оцінка похибки збурення розв'язку [1–3]

$$\|u - u_\varepsilon\|_{W_2^1} \leq c\sqrt{\varepsilon}, \quad (13)$$

де  $u$  та  $u_\varepsilon$  – розв'язки, відповідно, вихідної та збуреної задач.

Розв'язуючи за допомогою МСЕ збурену задачу, маємо наближений розв'язок  $u_{k_\varepsilon}^N$  вихідної задачі. Отримана оцінка похибки [1–3]

$$\|u - u_{k_\varepsilon}^N\|_{W_2^1} \leq c(h^k + \sqrt{\varepsilon}). \quad (14)$$

Побудовані крайові задачі для квазілінійних еліптичних рівнянь з різноманітними типами умов спряження (в тому числі і з головними неоднорідними) [1, 11]. Розглянуті класичні чотири типи нелінійності оператора, що зустрічаються в роботах Варги Р., Марчука Г. І., Самарського О. А. та ін.

На основі розробленої в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України методики отримані класичні узагальнені задачі в слабких постановках, що визначені на класах розривних функцій.

Доведено теореми про існування та єдиність розривних узагальнених розв'язків квазілінійних задач з неоднорідними природними та головними умовами [11].

Для визначення наближених узагальнених розв'язків побудовані обчислювальні

схеми підвищеного порядку точності дискретизації отриманих узагальнених задач. Доведено теореми про існування та єдиність розривних наближених узагальнених розв'язків цих задач. Для наближених узагальнених розв'язків отримані оцінки вигляду (10).

Для всіх розглянутих класів квазілінійних задач розроблена методика побудови регуляризатора  $B$  ітераційного методу

$$B \frac{y_{k+1} - y_k}{\tau} + A(y_k) = 0, \quad k = 0, 1, 2, \dots, \forall y_0 \in E^n, \quad (15)$$

розв'язування проміжної нелінійної системи алгебраїчних рівнянь

$$A(y) = 0, \quad (16)$$

де  $\tau > 0$  – параметр.

Оператор  $B$  будується так, що забезпечується збіжність геометричної прогресії ітераційного процесу (15) [1], тобто

$$\|y_k - y\|_B \leq \rho_0^k \|y_0 - y\|_B, \quad (17)$$

де  $0 < \rho_0 < 1$ ,  $y$  – розв'язок системи (16).

Для цих задач розглянута та теоретично обґрунтована методика використання малого параметру  $\varepsilon > 0$  при заміні неоднорідних головних умов природними. Для збуреного розв'язку  $u_\varepsilon$  та наближеного узагальненого розв'язку  $u_{k_\varepsilon}^N$  отримано, відповідно, оцінки вигляду (13) та (14) [1].

Досліджені питання побудови обчислювальних схем підвищеного порядку точності розрахунку нелінійних температурних полів складених тіл обертання в циліндричній системі координат та циліндричного складеного тіла в полярній системі координат за різноманітних умов на межах контакту складених тіл [1]. Отримані класичні узагальнені задачі в слабких постановках, що визначені на класах розривних функцій. Для різноманітних типів нелінійностей та різноманітних типів умов спряження розроблені обчислювальні схеми підвищеного порядку точності дискретизації відповідних задач в слабких поста-

новках. Доведено теореми про існування та єдиність наближених розривних узагальнених розв'язків  $u_k^N \in H_k^N$  МСЕ. Для наближених узагальнених розв'язків  $u_k^N(x)$  отримані оцінки похибки вигляду (10).

Для всіх розглянутих класів квазілінійних задач в циліндричній та полярній системах координат з різноманітними типами умов спряження розроблена методика побудови регуляризатора  $B$  ітераційного методу (15) розв'язування відповідних проміжних нелінійних систем (16) алгебраїчних рівнянь МСЕ, що забезпечує збіжність геометричної прогресії (17) цього ітераційного процесу [1].

Розглянута та теоретично обґрунтована методика використання малого параметру  $\epsilon > 0$  при заміні неоднорідних головних умов природними [1].

Побудовані нові диференціальні математичні моделі пружного деформування багатокомпонентних тіл, що вміщують довільно зорієнтовані в просторі тонкі тріщини, що заповнені рідиною за умов розклинювального тиску та заданим нормальним розходженням берегів продовгуватої тріщини [1]. Подібні диференціальні математичні моделі побудовані для складених ізотропних та ортотропних циліндричних тіл обертання.

Розроблена методика побудови відповідних класичних узагальнених задач в слабких (3) та варіаційних (4) постановках. Для останніх доведено їх еквівалентність та встановлено існування їх єдиного розривного розв'язку (в кожному з зазначених випадків).

На основі використання класів розривних функцій методу скінченних елементів розроблені обчислювальні схеми підвищеного порядку точності дискретизації побудованих нових узагальнених задач. Для наближених узагальнених векторних розв'язків  $u_k^N(x)$  МСЕ отримані оцінки вигляду (7)–(10), що засвідчують те, що такі обчислювальні алгоритми за точністю не гірші аналогічних відомих для відповідних класів задач з гладкими

розв'язками. Показано, що для чисел обумовленості матриць МСЕ розроблених обчислювальних алгоритмів, як і для еліптичних задач з розривними розв'язками, має місце оцінка  $O(1/h^2)$  [1].

Побудовані нові диференціальні математичні моделі динамічного пружного деформування багатокомпонентних тіл з розклинювальним тиском на довільно зорієнтованій у просторі продовгуватій тріщині та за умов наявності зосереджених мас на берегах тріщини [9]. Початково-крайові задачі для динамічної пружної рівноваги з розривними зміщеннями отримані для декартової та циліндричної (осесиметричний випадок) систем координат.

Розроблена методика (шляхом використання відповідних класів розривних функцій) побудови відповідних класичних узагальнених задач. На основі використання класів розривних вектор-функцій методу скінченних елементів побудовані обчислювальні схеми підвищеного порядку точності дискретизації отриманих нових узагальнених задач динамічної пружної рівноваги багатокомпонентних тіл. Для наближеного розривного розв'язку  $u_k^N(x, t)$  МСЕ має місце оцінка

$$\|u - u_k^N\|_{L_2 \times L_\infty} \leq ch^k, \quad (18)$$

а для дискретного за часом наближення  $U^j$ , отриманого за допомогою МСЕ та різницевої схеми Кранка-Ніколсона, маємо оцінку

$$\max_{j=0, m} \|U^j - u^j\|_{L_2} \leq \tilde{n}_1 (h^k + \tau^2), \quad (19)$$

де  $c, c_1 = \text{const}$ ,  $u = u(x, t)$  – класичний розв'язок відповідної початково-крайової задачі,  $u^j = u^j(x) = u(x, t_j)$ ,  $t_j = j\tau$ ,  $\tau$  – крок дискретизації по часовій змінній,  $\|\varphi\|_{L_2 \times L_\infty} =$

$$= \sup_{t \in (0, \delta)} \|\varphi\|_{L_2}, \quad \|\varphi\|_{L_2} = \left\{ \int_{\Omega} \varphi^2 dx \right\}^{1/2}.$$

Отримані оцінки (18), (19) засвідчують, що за порядками кроків дискретизації  $h, \tau$  розроблені обчислювальні алгоритми для задач динамічної рівноваги тіл з включеннями не гірші аналогічних відомих для відповідних класів задач з гладкими розв'язками.

Дослідження процесів напірної фільтрації рідини в багатокомпонентних тілах з різноманітними включеннями, а також дослідження формування усталених температурних полів в таких тілах при заданих на їх границі потоках рідини чи тепла (при заданих крайових умовах Неймана) зводяться до розв'язування крайових задач Неймана для еліптичних рівнянь другого порядку з умовами спряження та неєдиними розривними розв'язками (з неєдиними розривними п'єзометричними напорами в задачах фільтрації рідини чи неєдиними розривними полями температур) [1–3, 7, 8].

Для різноманітних типів умов спряження отримані умови сумісності – необхідні умови існування класичних розривних розв'язків таких задач, що пов'язують внутрішні джерела / витоки тіла  $\Omega \cup \gamma$ , значення потоків  $g$  на границі  $\Gamma$  досліджуваного багатокомпонентного тіла  $\Omega$  та джерела / витоки  $\omega$  на поверхнях тріщин  $\gamma$ , у вигляді

$$\int_{\Omega} f dx + \int_{\Gamma} g d\tilde{A} = \int_{\gamma} \omega d\gamma. \quad (20)$$

Побудовані відповідні задачі в слабкій постановці пошуку функції  $u \in H_Q$  такої, що  $\forall w \in H_0$  задовольняє тотожність вигляду (3),

$$\text{де } H_Q = \left\{ v(\delta) \in \tilde{T} : \int_{\Omega} v dx = Q \right\}, \quad Q - \text{ довільне}$$

$$\text{фіксоване дійсне число, } H_0 = \left\{ v(\delta) \in \tilde{T} : \int_{\Omega} v dx = 0 \right\}.$$

Для цього випадку доведено твердження.

**Теорема 1.** Задача вигляду (3) має єдиний розв'язок  $u = u(x) \in H_Q$ , який доставляє на  $H_Q$  найменше значення функціоналу вигляду (4).

Якщо  $u|_{\bar{\Omega}_\ell} \in C^1(\bar{\Omega}_\ell) \cap C^2(\Omega_\ell)$ ,  $\ell = 1, 2$ ,  $|D^2 u|_{\Omega_\ell} < \infty$  і виконана умова (20), то  $u = u(x)$  – єдиний класичний розв'язок вихідної крайової задачі Неймана, що задовольняє умову

$$\int_{\Omega} u dx = Q. \quad (21)$$

**Зауваження 1.** Для існування єдиного розв'язку еквівалентних узагальнених задач вигляду (3), (4) виконання умови узгодженості (20) вихідних даних не вимагається.

**Зауваження 2.** Умова узгодженості вихідних даних (20) отримана для випадку умов спряження тришарового включення з природними та головними умовами спряження. Для інших типів умов спряження вона може мати інший вигляд.

**Зауваження 3.** Множини  $H_Q, H_0$  визначені для випадку природних умов спряження (1) з довільно розміщеним у просторі тришаровим тонким включенням  $\gamma$ . Для випадку наявності неоднорідної головної умови спряження (2) ці множини визначаються таким чином:

$$H_Q = \left\{ v(x) \in \tilde{T} : [v]|_{\gamma} = -\delta, \int_{\Omega} v dx = Q \right\},$$

$$H_0 = \left\{ v(x) \in \tilde{T} : [v]|_{\gamma} = 0, \int_{\Omega} v dx = 0 \right\}.$$

Розроблено методику [1–3, 7, 8] заміни розглядуваних задач Неймана з єдиними розв'язками  $u = u(x)$  в відповідній замкнутій опуклій множині  $H_Q$  еквівалентними, що визначені на множинах без обмеження (21). Доведено еквівалентність такої заміни при виконанні умови узгодженості (20). Нова задача в слабкій постановці полягає в пошуку функції  $u \in H$ , що  $\forall w \in H_0$  задовольняє тотожність

$$a_1(u, v) = \ell_1(v), \quad (22)$$

де для випадку природних умов спряження (1)  $H = \bar{H}$ ,  $H_0 = H$ , а для умов спряження (2)

$$H = \{v(x) \in \bar{I} : [v]_\gamma = -\delta\}, H_0 = \{v(x) \in \bar{I} : [v]_\gamma = 0\};$$

$$a_1(u, v) = a(u, v) + \int_{\Omega} u dx \int_{\Omega} v dx, \quad \ell_1(v) = \ell(v) + Q \int_{\Omega} v dx.$$

Доведено існування та єдиність розв'язку задачі (22), що доставляє найменше значення функціоналу

$$\Phi(z) = a_1(z, z) - 2l_1(z) \quad (23)$$

на множині  $H$ .

Показана справедливість твердження.

**Теорема 2.** Нехай класичний розв'язок диференціальної задачі Неймана  $u|_{\Omega_i} \in C^{k+1}(\Omega_i), |D^{k+1}u|_{\Omega_i} < \infty, i = 1, 2$ . Тоді для наближеного розв'язку  $u_k^N(x) \in H_k^N \subset H$  методу скінченних елементів еквівалентних задач (22), (23) має місце оцінка вигляду (10).

Слід зауважити, що розроблена методика дозволяє досить легко будувати обчислювальні схеми підвищеного порядку точності для чисельного розв'язання складних задач Неймана з різноманітними типами умов спряження та з неєдиними розв'язками.

**Зауваження 4.** Факти існування та єдиності розривних розв'язків  $u \in H_Q$  та  $u \in H$  еквівалентних задач вигляду (3), (4) та (22), (23) показані на основі доведеної для класів розривних функцій  $v \in \bar{H}$  узагальненої нерівності Пуанкаре

$$\int_{\Omega} v^2 dx \leq c \left( \int_{\Omega} \nabla v \nabla v dx + \left( \int_{\Omega} v dx \right)^2 + \int_{\gamma} [v]^2 d\gamma \right), \text{ де } c = \text{const.}$$

Аналогічні результати отримані стосовно задач Неймана для еліптичних рівнянь другого порядку в ортогональних криволінійних (циліндричній та полярній) системах координат з різноманітними тонкими включеннями [1], а також для рівнянь 4-го порядку про прогини складеної стрижневої системи [12] та складеної тонкої пластини [13].

**Зауваження 5.** Деякі з умов спряження, наприклад, умови власного зосередженого джерела  $[u] = 0, x \in \gamma, [q_u] = \beta, x \in \gamma$ , де

$\beta = \text{const} > 0$  (стрибок потоку пропорційний шуканому розв'язку) визначають єдиність розв'язку задачі Неймана для еліптичних рівнянь 2-го порядку як в декартовій, так і в ортогональних криволінійних системах координат. В цьому випадку приходимо до пошуку функції  $u \in H = \{v(x) \in \bar{I} : [v]_\gamma = 0\}$  що задовольняє  $\forall w \in H_0 = H$  тотожність вигляду (3), або доставляє найменше значення на  $H$  функціоналу вигляду (4). Доведена еквівалентність цих задач та існування їх єдиного розв'язку  $u \in H$ .

За допомогою МСЕ будемо наближений розв'язок  $u_k^N(x) \in H_k^N \subset H$ , для якого має місце оцінка вигляду (10).

**Зауваження 6.** Типи крайових умов, умов спряження визначають як єдині розв'язки, так і неєдині, а для рівнянь 4-го порядку – неєдиність розв'язків з одним та двома ступенями свободи.

Нусталені процеси руху рідини у стислих багатокомпонентних ґрунтових середовищах з включеннями та неусталені процеси формування температурних полів в таких тілах описуються лінійними та нелінійними початково-крайовими задачами для параболічних рівнянь з умовами спряження неідеального контакту [4]. Побудовані відповідні класичні узагальнені задачі, що визначені на класах розривних функцій, для лінійних та нелінійних параболічних рівнянь з умовами спряження. На основі використання відповідних класів розривних функцій МСЕ побудовані обчислювальні алгоритми підвищеного порядку точності знаходження наближених узагальнених розв'язків вихідних початково-крайових задач.

Аналогічні питання досліджені для системи нелінійних параболічних та еліптико-параболічних рівнянь (опису руху рідини в стисло-нестисливих ґрунтах) [14], псевдопараболічного рівняння (опису руху рідини в тріщинуватих тілах) [15] з умовами спряження неідеального контакту.

Дослідження нестационарних полів та процесів вільних коливань, стійкість складених тіл породжують різноманітні диференціальні спектральні задачі з умовами спряження неідеального контакту для власних функцій розглянутих задач [1, 10, 16].

Такі спектральні задачі отримані для еліптичних операторів другого порядку в декартовій, циліндричній та полярній системах координат [1], для операторів теорії пружності в декартових та циліндричних системах координат [1], для еліптичних операторів 4-го порядку [16].

Слід зазначити, що розгляд нестационарних задач з умовами спряження зосередженої теплоємності та динамічних задач з умовами спряження зосереджених мас призводить до розгляду диференціальних спектральних задач з власними значеннями не тільки в операторі стану, а й в умовах спряження та крайових умовах [1–3, 10].

Для всіх зазначених диференціальних спектральних задач отримані відповідні класичні спектральні задачі в слабких постановках. Отримані класичні функціонали Релея. Для всіх зазначених різноманітних спектральних задач з умовами спряження розроблена методика побудови обчислювальних алгоритмів підвищеного порядку точності їх дискретизації. Запропоновані алгоритми за точністю не гірші аналогічних, що відомі для відповідних класів спектральних задач з гладкими власними функціями.

Аналогічні питання розглянуті для псевдогіперболічних рівнянь з умовами спряження [17].

## **2. ОПТИМАЛЬНЕ КЕРУВАННЯ ПРОЦЕСАМИ В БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ГРУНТОВИХ СЕРЕДОВИЩАХ**

З метою збереження ґрунтових пластів в природному чи близькому до нього стані досить

актуальним є проведення попереднього аналізу доцільності застосування певних технологій та їх наслідків при добуванні корисних копалин, забудові схилів, вирубуванні лісів, забудові рівнинних територій висотними будинками, створенні різноманітних підземних комунікацій та ін., від чого суттєво залежить життя сьогоденного та майбутніх поколінь населення.

За допомогою певних заходів (дренування, тепловідводу та ін.) можна покращити стан багатокомпонентних ґрунтів. Питанням оптимального керування основними процесами, що характерні для багатокомпонентних тіл з різноманітними довільно розташованими в просторі тонкими включеннями, присвячені монографії [7, 8].

Як зазначено вище, основними процесами, що є характерними для ґрунтових масивів природного чи штучного походжень є: рух рідини за різноманітних режимів, формування температурних станів, механічне деформування. Врахування впливу тонких включень на досліджувані процеси породжує принципово нові класи математичних задач, а саме задач з розривними розв'язками, що виступають математичними задачами станів відповідних багатокомпонентних розподілених систем.

Вибір оптимальних режимів функціонування запобіжних засобів в таких системах в математичному плані зводиться до визначення оптимальних збурень крайових умов, умов спряження та ін., щоб забезпечити мінімальне відхилення стану (по всьому тілу, на окремих його ділянках) від бажаного. В значній мірі питання оптимального керування однорідними розподіленими системами досліджені в відомій монографії французького вченого Ж.–Л. Ліонса "Оптимальное управление системами, описываемыми уравнениями с частными производными" (М.: Мир, 1972. – 414 с.). В монографіях [7, 8] фундаментальні результати Ж.–Л. Ліонса отрима-

ли подальше узагальнення та розвиток на нові важливі класи неоднорідних розподілених систем, стани яких описуються крайовими задачами для еліптичних рівнянь (в тому числі умовно коректними – з неєдиними розривними станами), крайовими, початково-крайовими задачами для рівнянь пружної рівноваги багатокомпонентних тіл з умовами спряження та початково-крайовими задачами для параболічних, еліптико-параболічних, гіперболічних, псевдогіперболічних систем з різноманітними типами умов спряження.

Оптимальне керування процесами напірної фільтрації рідини в багатокомпонентних ґрунтових середовищах та формування усталених температурних полів в таких тілах зводиться до розгляду задач оптимального керування станами, що описуються еліптичними рівняннями з крайовими умовами та умовами спряження. В роботах [7, 8] розглянуті різноманітні можливості оптимального керування такими системами (внутрішніми джерелами, в крайових умовах, в умовах спряження, комплексним керуванням – одночасно на різних складових багатокомпонентних тіл) з різноманітними спостереженнями за станами системи (по всьому багатокомпонентному тілу, на частині та всій його границі, на тонкому включенні, за значеннями стану та потоками, одночасно на різних складових тіла та ін.). В цих розглянутих випадках доведено теореми про існування оптимальних керувань з квадратичними функціями вартості. Розглянуті також випадки коли крайові задачі опису стану вміщують головні неоднорідні крайові умови та неоднорідні головні умови спряження.

У випадку, коли множина допустимих керувань  $U_\partial$  співпадає з відповідним повним гільбертовим простором  $U$  керувань, показана можливість побудови на основі використання розривних функцій методу скінченних елементів обчислювальних схем підвищено-

го порядку точності визначення оптимальних керувань.

Дослідження питань оптимального керування усталеними процесами дифузії при заданих потоках на границі багатокомпонентного тіла зводиться до вивчення питання неперервної залежності розривного стану системи (яке може бути неєдиним) від різноманітних збурень (керувань). Показано, що при визначенні стану системи  $y = y(x, u) = y(u)$

серед функцій множини  $V_Q = \left\{ v \in \bar{H} : \int_{\Omega} v dx = Q \right\}$ , де

$x \in \bar{\Omega}_1 \cup \bar{\Omega}_2$ ,  $\Omega_1, \Omega_2$  – складові двохкомпонентного тіла  $\bar{\Omega}$  з включенням  $\gamma = \partial\Omega_1 \cap \partial\Omega_2 \neq \emptyset$ ,  $Q$  – довільне фіксоване дійсне число,  $\bar{H} = \{v : v|_{\Omega_i} \in W_2^1(\Omega_i), i = 1, 2\}$ ,  $u \in U_\partial$  – керування,  $U_\partial$  – допустима множина керувань, стан  $y(u)$  та його сліди на певних складових тіла  $\bar{\Omega}$  неперервно залежать від різноманітних керувань, що перераховувались раніше для еліптичних систем з єдиними станами. Це дало змогу довести існування єдиних оптимальних керувань таких умовно-коректних еліптичних систем з розривними станами. Для того, щоб зняти складне для врахування в обчислювальних алгоритмах пошуку оптимальних керувань обмеження  $\int y dx = Q$ , розроблена методика заміни еліптичних задач з різноманітними збуреннями (керуваннями) та таким обмеженням еквівалентними крайовими задачами для еліптичних рівнянь з умовами спряження, де єдиний стан  $y = y(u)$  визначається в відповідному класі розривних функцій без цього обмеження. Показана можливість побудови обчислювальних схем підвищеного порядку точності для чисельного визначення наближення єдиного оптимального керування  $u \in U_\partial = U$ .

Окрім зазначених в роботах [7, 8] досліджені питання оптимального керування станами стрижневої системи з проміжним шарніром з жорсткістю  $\alpha > 0$ . Розглянуті наступні оптимізаційні задачі:

- ◆ керування розподіленням навантаженням зі спостереженням за прогинами складеного стрижня;
- ◆ керування жорсткістю підпори шарніру зі спостереженням за прогинами складеного стрижня;
- ◆ граничне керування величиною прикладеного моменту зі спостереженням за прогинами системи;
- ◆ граничне керування величиною прикладеного моменту зі спостереженням за прогинами системи при пружному закріпленні протилежного кінця складеного стрижня;
- ◆ управління жорсткістю пружної внутрішньої опори зі спостереженням за її прогином;
- ◆ управління жорсткістю внутрішнього шарніру зі спостереженням за прогином складеного стрижня при наявних неоднорідних головних крайових умовах.

В усіх зазначених випадках доведено існування єдиного оптимального керування конкретної системи. Показана можливість побудови обчислювальних схем підвищеного порядку точності чисельного визначення наближення оптимального керування  $u \in U_\delta = U$ .

Досліджені питання оптимального керування станами складеної тонкої пластини. Розглянуті наступні оптимізаційні задачі:

- ◆ керування розподіленням навантаженням складеної пластини зі спостереженням за її прогинами;
- ◆ керування жорсткістю пружної підпори і пружного шарніру, за допомогою якого з'єднані дві тонкі пластини, зі спостереженням за прогинами складеної пластини;
- ◆ керування жорсткістю пружної підпори пружного шарніру, за допомогою якого з'єднані дві тонкі пластини, зі спостереженням за його прогинами;
- ◆ керування жорсткістю пружної підпори пружного шарніру зі спостереженням за прогинами краю складеної пластини;

- ◆ керування величиною перерізуючої сили на частині границі складеної пластини зі спостереженням за прогинами шарніру з'єднання її складових;
- ◆ керування величинами зкручуючого моменту на частині границі складеної пластини зі спостереженнями за прогинами шарніру з'єднання її складових;
- ◆ керування величинами зкручуючого моменту на частині границі складеної пластини зі спостереженнями за її прогинами;
- ◆ керування розподіленням навантаженням складеної пластини при заданих зміщеннях її краю зі спостереженням за прогинами всієї пластини.

В усіх зазначених випадках доведено існування єдиного оптимального керування конкретної системи. Показана можливість побудови обчислювальних схем підвищеного порядку точності чисельного визначення наближення оптимального керування  $u \in U_\delta = U$  конкретної системи.

Оптимальне керування неусталеними процесами фільтрації рідини у стисливих багатоконпонентних ґрунтових середовищах та формування неусталених температурних полів в таких тілах зводиться до розгляду задач оптимального керування станами багатоконпонентних тіл з довільно розташованими у просторі тонкими включеннями, що описуються параболічними рівняннями з крайовими, початковими умовами та умовами спряження неідеального контакту. В роботах [7, 8] розглянуті різноманітні можливості оптимального керування такими системами (внутрішніми джерелами, величинами джерел / витоків на тонких складених включеннях, в крайовій умові) за умов різноманітних спостережень (за формуванням п'єзOMETричних напорів (температур) по всьому багатоконпонентному тілу, на його границі, на тонкому включенні, в фінальний час функціонування системи).

Оптимальне керування неусталеними процесами фільтрації рідини у стисливих ба-

гатокомпонентних ґрунтових середовищах та формування неусталених температурних полів в таких тілах за умов відкачування рідини та наявних тонких включень з зосередженими теплоємностями породжує принципово інші задачі стану багатокомпонентних тіл – принципово інші початково-крайові задачі для параболічних рівнянь з умовами спряження зосереджених теплоємностей. Досліджені питання різноманітного оптимального керування станами таких систем за умов різноманітних спостережень.

Оптимальне керування неусталеними процесами фільтрації рідини в багатокомпонентних ґрунтових тілах зі щільними стисливими та нестисливими складовими зводиться до вивчення питань оптимального керування станами багатокомпонентних тіл з довільно розташованими у просторі тонкими включеннями, що описуються початково-крайовими задачами для еліптико-параболічних рівнянь з крайовими, початковими умовами та умовами спряження неідеального контакту. За допомогою використання малого параметру встановлено існування та єдиність стану (розв'язку відповідних початково-крайових задач) багатокомпонентної системи за різноманітних умов збурень вихідних даних (правої частини еліптико-параболічного рівняння, умов спряження, крайових умов, початкової умови) та неперервність стану системи і його слідів на певних поверхнях від відповідних збурень. Це дало змогу дослідити оптимальну керованість (правими частинами еліптико-параболічного рівняння, умовами спряження, крайовими та початковими умовами) багатокомпонентних неоднорідних розподілених систем з різноманітними спостереженнями (по всьому багатокомпонентному тілу, на його границі, на тонкому включенні, за фінальним станом системи).

Оптимальне керування неусталеними процесами фільтрації рідини у тріщинуватих багатокомпонентних тілах зводиться до роз-

гляду задач оптимального керування системами, стан яких описується початково-крайовими задачами для псевдопараболічних рівнянь з умовами спряження неідеального контакту. Досліджені різноманітні можливості оптимального керування такими системами (внутрішніми джерелами, в умовах спряження, крайових умовах) за умов різноманітних спостережень (за формуванням п'єзометричного напору по всьому багатокомпонентному тілу, на його границі, на тонкому включенні, за фінальним станом системи). В усіх розглянутих задачах доведено існування єдиного оптимального керування.

Різоманітні коливні процеси описуються початково-крайовими задачами для рівняння та систем диференціальних рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу. В роботах [6, 7] досліджені питання оптимального керування системами, стан яких описується початково-крайовими задачами для рівнянь в частинних похідних гіперболічного типу з умовами спряження неідеального контакту. Розглянуті різноманітні можливості оптимального керування зазначеними системами (рівномірно розподіленими внутрішніми джерелами, в умовах спряження, в крайових умовах) за умов різноманітних спостережень за станом системи (по всій багатокомпонентній області, на її границі, з фінальним спостереженням за станом системи та за швидкістю його зміни).

Питання оптимального керування динамічними процесами багатокомпонентних систем за умов в'язкості в роботах [7, 8] досліджені стосовно систем, стани яких описуються початково-крайовими задачами для псевдогіперболічних рівнянь з умовами спряження неідеального контакту. Розглянуті різноманітні можливості оптимального керування такими системами (внутрішніми джерелами, в умовах спряження, в крайових умовах) за умов різноманітних спостережень (за станом по всьому багатокомпонентному

тілу, на його границі, на тонкому включенні, за станом системи в фінальний момент спостережень). В усіх зазначених випадках доведено теореми про існування єдиних оптимальних керувань.

В роботах [7, 8] досліджені питання оптимального керування деформованим станом пружного багатокомпонентного тіла з тонкими слабкотривкими включеннями / тріщинами. Досліджені питання оптимального керування (масовими силами, напругами на частині границі заданого тіла) зі спостереженнями за зміщеннями по всьому багатокомпонентному тілу, на тонкому включенні за стрибком дотичних зміщень, за нормальною складовою зміщень на тонкому слабкотривкому включенні, за зміщеннями на частині границі тіла. В усіх розглянутих випадках доведено теореми про існування єдиного оптимального керування. При співпаданні множини  $U_\partial$  допустимих керувань з відповідним повним гільбертовим простором  $U$  показана можливість побудови шляхом використання відповідних класів розривних функцій методу скінченних елементів обчислювальних схем підвищеного порядку точності визначення наближення  $u_k^N$  оптимального керування  $u$ .

В роботах [7, 8] стосовно деяких задач екології розглянуті питання комплексних керувань (на різноманітних складових багатокомпонентного тіла) з комплексними спостереженнями. Доведені теореми про існування єдиних оптимальних керувань такими системами.

В разі співпадання множин допустимих керувань з відповідними повними гільбертовими просторами побудовані відповідні крайові чи початково-крайові задачі, що визначають єдині оптимальні керування всіх вище перерахованих складних систем.

Досліджені питання оптимального керування термонапруженим станом [18], квазістатичним напружено-деформованим станом

[19], динамічним напружено-деформованим станом багатокомпонентних тіл, а також систем, що описуються гіперболічними, псевдогіперболічними рівняннями з зосередженими масами; конвективно-дифузійними процесами та ін.

### **3. НОВА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ПРОБЛЕМ ЕКОЛОГІЇ ТА РАЦІОНАЛЬНОГО ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ**

Як зазначено вище реальні природні чи штучні ґрунтові об'єкти багатокомпонентні, складові яких відрізняються між собою фізичними характеристиками: пористістю, коефіцієнтами теплопровідності, міцнісними властивостями та ін. Крім цього, вони часто вміщують в собі різноманітні тонкі включення (природного чи штучного походжень): прошарки глин, мергелів, протифільтраційні мембрани та завіси, технологічні прошарки, продовгуваті тріщини та ін. Незважаючи на те, що товщини зазначених прошарків значно менші характерних розмірів інших складових багатокомпонентних тіл, такі прошарки значно впливають на розвиток вищезгаданих процесів: по різні сторони слабкопроникливих включень різні тиски рідини, по слабкотривким включенням відбуваються зрушення масивів ґрунту – дотичні зміщення мають розриви та ін. Властивість слабкопроникливості часто використовують як позитивний фактор – створюються тонкі протифільтраційні елементи з метою запобігання суфозії, обводнення слабкотривких складових, тобто з метою запобігання руйнацій різноманітних об'єктів.

В силу того, що вище зазначена неоднорідність є визначальною в розвитку основних процесів, що характерні для багатокомпонентних ґрунтових масивів природного чи штучного походжень, нехтуванням цією осо-

близістю є недоцільним. Оскільки традиційні математичні моделі опису згаданих процесів (що базуються на різноманітних засадах заміни багатокомпонентних тіл з включеннями відповідними однорідними тілами) є неприйнятними, в роботах [1–19] побудовані нові математичні моделі – як принципово нові класи математичних задач з розривними розв'язками, де вплив різноманітних довільно зорієнтованих в просторі тонких включень / тріщин враховується певними обмеженнями – умовами спряження неідеального контакту. Останні отримані на основі певних законів збереження. Розроблена в роботах методика використання відповідних класів розривних функцій дозволила для отриманих нових математичних моделей опису різноманітних процесів в багатокомпонентних ґрунтових тілах з різноманітними тонкими включеннями / тріщинами будувати відповідні класичні узагальнені задачі в слабких постановках та мінімізації функціоналів енергії на відповідних класах розривних функцій (в тому числі і задач з єдиними розв'язками на опуклих підмножинах повних гільбертових просторів) та узагальнених задач на власні значення з розривними власними функціями. Розроблена методика побудови обчислювальних алгоритмів підвищеного порядку визначення наближених розривних розв'язків всіх отриманих авторами нових класів задач, шляхом використання відповідних множин розривних функцій методу скінченних елементів. Зазначимо, що точність розроблених алгоритмів за порядками кроків дискретизації просторових об'єктів та часових проміжків не гірша аналогічних, відомих для відповідних класів задач з гладкими розв'язками.

Побудовані нові класи математичних (диференціальних) моделей з умовами спряження, що описують основні процеси в багатокомпонентних ґрунтових середовищах з довільно зорієнтованими в просторі тонкими

включеннями / тріщинами природного чи штучного походжень; отримані нові класичні узагальнені задачі, що визначені на відповідних класах розривних функцій; розроблена методика визначення відповідних класів допустимих розривних функцій МСЕ; побудова дискретних моделей та обчислювальних алгоритмів **складають нову теоретичну платформу нової інформаційної технології дослідження основних процесів, характерних для багатокомпонентних ґрунтових об'єктів з різноманітними включеннями.**

Зазначена теоретична платформа програмно реалізована в автоматизованих системах НАДРА, НАДРА-2П, НАДРА-3Д – відповідно розрахунку двовимірних-профільних / площинних процесів усталеного та неусталеного руху рідини в багатокомпонентних тілах з довільно розташованими у просторі тонкими включеннями різноманітного походження, формування температурних полів в таких об'єктах та їх механічного деформування [20, 21]; розрахунку планово-просторової фільтрації в тришаровому тілі з прошарками, що характерне для 30-ти кілометрової зони ЧАЕС – розрахункова область 27 км × 25 км; розрахунку тривимірних процесів в довільних тривимірних багатокомпонентних тілах з довільно розташованими у просторі тонкими включеннями чи тріщинами [22]. Всі автоматизовані системи оснащені потужними підсистемами: опису та корегування складних геометричних двох- та тривимірних об'єктів з довільними розрізами; скінченно-елементного розбиття складних тіл з розрізами; опису та корегування фізичних характеристик складових тіл – макроелементів; опису та корегування умов взаємодії виділених тіл з оточуючим простором та їх параметрів; опису та корегування властивостей впливу тонких включень на досліджувані процеси – умов спряження неідеального контакту та їх параметрів; реалізації проблемно-орієнтованих обчислю-

вальних алгоритмів за відповідними класами фізичних процесів – математичних задач; обробки результатів автоматизованого комп'ютерного дослідження процесів.

Системи неодноразово демонструвались на міжнародних виставках Екологія–2000–2004 рр., Sebit (2001–2005, м. Ганновер, ФРН) і отримали позитивну оцінку фахівців.

Слід зазначити, що для отримання прийняттого шуканого комп'ютерного розв'язку конкретної задачі зі значними геометричними розмірами необхідно використовувати скінченно-елементне розбиття розрахункових областей зі значною кількістю скінчених елементів. Виникає потреба формувати та розв'язувати проміжні системи лінійних та нелінійних алгебраїчних рівнянь великих розмірів – понад  $5 \cdot 10^5$  невідомих. За таких умов вище зазначені процеси не можуть бути досліджені навіть на сучасних потужних ПЕОМ сім'ї PENTIUM. В зв'язку з цим створені модифікації систем НАДРА та НАДРА-2П – автоматизованого дослідження процесів, характерних для багатокомпонентних ґрунтових середовищ, та планово-просторового руху рідини в тришарових тілах при використанні необхідної значної кількості скінчених елементів. Зазначені модернізовані комплекси функціонують на обчислювальних комплексах ПЕОМ-СКІТ, де СКІТ (СКІТ-2, СКІТ-3) виступає як потужний суперкомп'ютер для розв'язування проміжних систем алгебраїчних рівнянь з порядками понад  $5 \cdot 10^5$  і до  $1,3 \cdot 10^6$  невідомих. На кластерному суперкомп'ютері СКІТ-2, створеному в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України, розв'язуються системи алгебраїчних рівнянь з числами обумовленості менше ніж  $10^{14}$ , а при більших числах обумовленості відповідні системи алгебраїчних рівнянь розв'язуються на кластерному суперкомп'ютері СКІТ-3, створеному також в Інституті кібернетики ім. В. М. Глушкова НАН України.

На комплексі ПЕОМ-СКІТ-2 розв'язана задача аналізу впливу створених порожнин на напружено-деформований стан шаруватого ґрунтового схилу з характерними просторовими розмірами активної зони  $700 \times 300$  м. В цьому випадку проміжні системи алгебраїчних рівнянь з симетричними додатно означеними матрицями стрічкової структури містять 532 тисячі невідомих з півшириною 898 елементів стрічки ненульових елементів матриці. Така задача розв'язана за 5 хв 15 с і використано оптимальне число 15 процесорів СКІТ-2.

Зазначимо, що максимально допустимий порядок системи алгебраїчних рівнянь для використання всієї доступної оперативної пам'яті 32 процесорів комплексу СКІТ-2 складає 1 322 544 невідомих з півшириною стрічки матриці 1264. Така система алгебраїчних рівнянь, що отримана при розв'язуванні задачі теорії пружності в багатозв'язній області, на суперкомп'ютері СКІТ-2 розв'язана за 23 хв.

За допомогою модернізованої системи НАДРА-2П на комплексі ПЕОМ-СКІТ-2 розв'язана задача планово-просторової фільтрації рідини в 30-ти кілометровій зоні Чорнобиля – розрахункова область з розподіленою мережею поверхневих водойм складає  $27 \text{ км} \times 25 \text{ км}$ . Крок розрахункової сітки становить 62,5 м, число невідомих систем алгебраїчних рівнянь – 230 тисяч. На суперкомп'ютері СКІТ-2 ця задача розв'язана за 70 с і використано 10 процесорів. Така задача на ПЕОМ (PENTIUM-2.4) розв'язується за 5 год.

Слід зазначити, що розглядувані задачі відносяться до класів задач, які потребують обробки в паралельному режимі повнопов'язаних даних значних об'ємів. Організація ефективної паралельної обробки (організації обчислень) таких даних є надзвичайно складною проблемою та потребує розробки принципово нових відмінних від підходів, що

розвивалися при створенні програмно-алгоритмічних засобів, реалізація яких орієнтована на однопроцесорні обчислювальні комплекси.

Розроблена інформаційна технологія дослідження процесів в багатокомпонентних тілах з включеннями має загальний характер – в тому числі і для споруд різноманітного призначення, об'єктів машинобудування та ін. Зокрема, під науковим керівництвом одного з авторів даної роботи в Тернопільському державному технічному університеті ім. Івана Пулюя вона розповсюджена на задачі трібології – задачі про тертя складових багатокомпонентних тіл. Вона реалізована у вигляді автоматизованого програмно-алгоритмічного комплексу DIFUS дослідження процесів дифузії в складених тілах з включеннями та тріщинами в декартовій, циліндричній та полярній системах координат. За допомогою цього комплексу розв'язані деякі задачі трібології [23].

### ЛІТЕРАТУРА

1. Дейнека В. С., Сергиенко И. В. Модели и методы решения задач в неоднородных средах.–Киев: Наук. думка, 2001.–606 с.
2. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Задачи с условиями сопряжения и вычислительные схемы повышенного порядка точности их дискретизации // Праці Українського математичного конгресу 2001.–Київ: Ін-т математики НАНУ.–2002.–С. 106–120.
3. Сергієнко І. В., Дейнека В. С. Задачі трансмісії з неоднорідними головними умовами спряження та високоточні чисельні алгоритми їх дискретизації // Укр. матем. журн.–2002.–54.–№ 2.–С. 258–275.
4. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Численное моделирование нелинейных нестационарных процессов с разрывными характеристиками полей // Кибернетика и систем. анализ.–1999.–№ 3.–С. 3–13.
5. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Задачи с условиями сопряжения и высокоточные вычислительные алгоритмы их дискретизации // Кибернетика и систем. анализ.–1999.–№ 6.–С. 100–124.
6. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Модели с условиями сопряжения и высокоточные методы их дискретизации // Кибернетика и систем. анализ.–2000.–№ 1.–С. 110–131.
7. Дейнека В. С., Сергиенко И. В. Оптимальное управление неоднородными распределенными системами.–Киев: Наук. думка, 2003.–506 с.
8. Sergienko Ivan V., Deineka Vasyi S. Optimal Control of Distributed Systems with Conjugation Conditions.–New York: Kluwer Academic Publishers.–2005.–400 p.
9. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. О численном решении задачи динамической теории упругости для тел со средоточенными массами // Прикл. механика.–2004.–т. 40.–№ 12.–С. 65–75.
10. Сергієнко І. В., Дейнека В. С. Високоточні алгоритми розв'язання спектральних задач з власними значеннями в умовах спряження та в крайових умовах // Доп. НАН України.–2001.–№ 2.–С. 74–80.
11. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. О существовании единственного обобщенного решения квазилинейного эллиптического уравнения с условиями сопряжения // Доп. НАН України.–2002.–№ 4.–С. 72–82.
12. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Вычислительные алгоритмы для условно корректной задачи прогибов составной балки // Доп. НАН України.–2002.–№ 4.–С. 77–82.
13. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. О численном исследовании прогибов составной тонкой пластины // Доп. НАН України.–2003.–№ 6.–С. 52–58.
14. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Моделирование процессов, описываемых эллипτικο-параболическими системами с условиями сопряжения // Пробл. управления и информатики.–2000.–№ 3.–С. 57–75.
15. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Високоточные вычислительные алгоритмы исследования псевдопараболических распределенных систем с условиями сопряжения // Доп. НАН України.–2003.–№ 7.–С. 73–81.
16. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. О численном решении спектральной задачи исследования устойчивости и собственных колебаний составных стержней // Прикл. механика.–2002.–т. 38.–№ 11.–С. 124–132.
17. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Численное моделирование динамических процессов, описываемых псевдогиперболическим уравнением с условиями сопряжения // Пробл. управления и информатики.–2004.–№ 1.–С. 61–70.
18. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Комплексное оптимальное управление термонапряженным состоянием составного тела // Кибернетика и систем. анализ.–2004.–№ 3.–С. 43–61.
19. Сергиенко И. В., Дейнека В. С. Оптимальное управление квазистатическим напряженно-деформированным состоянием составного тела //

- Пробл. управления и информатики.–2004.–№4.– С. 58–79.
20. **Сергиенко И. В., Дейнека В. С., Калынюк Н. А. и др.** Автоматизированная диалоговая система НАДРА-Д и исследования процессов в многокомпонентных средах // Пробл. программирования.– 2004.–№ 2–3.–С. 520–533.
21. **Сергиенко И. В., Дейнека В. С., Калынюк Н. А. и др.** Автоматизированный комплекс НАДРА для исследования процессов в многокомпонентных средах: В 2 ч.–Киев, 2002.–(Препринт / НАНУ. Ин-т кибернетики).– ч. 1.–36 с. (...; 2002–3); ч. 2.–36 с. (...; 2002–4).
22. **Дейнека В. С., Вещунов В. В.** Система автоматизованого розрахунку процесів у тривимірних багатоконпонентних середовищах NADRA 3D // Матеріали конференції "Динаміка, міцність і надійність сільськогосподарських машин", 4–7 жовтня 2004 р., Тернопіль: Тернопільський державний технічний університет ім. Івана Пулюя.– 2004.– С. 138–144.
23. **Дейнека В. С., Баран І. О.** Автоматизована система DIFUS для розрахунку процесів дифузії в неоднорідних середовищах // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах.– 2002.–№ 2.–С. 111–115.

## **ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ РАДІАЦІЙНОЇ ПАСТЕРИЗАЦІЇ ТА КОНСЕРВАЦІЇ ПРОДУКТІВ ХАРЧУВАННЯ**

**І. М. Вишневський, В. І. Сахно, С. П. Томчай, А. Г. Зелинський,  
О. В. Сахно**

*Інститут ядерних досліджень НАН України, Київ*

*Надійшла до редакції 01.04.05*

**Резюме:** В 2004 р. НАН України започаткувала інноваційний проект "Впровадження технологій радіаційної пастеризації та консервації продуктів харчування" з метою впровадження в Україні технологій променевої пастеризації та консервації продуктів харчування для запобігання втрат продуктів при зберіганні та захисту споживачів від інфекційних захворювань. У статті наведено результати проведених досліджень фізико-технічних і технологічних розробок для впровадження сучасних радіаційних технологій у харчове виробництво України. Запропоновано технічні і технологічні рішення їх реалізації. Аналізуються економічні показники виробництва з використанням радіаційних технологій і перспективи розширення мережі виробництв за рахунок конверсії, наприклад, оборонних підприємств чи промислових організацій з інших галузей. Міжнародні організації (ООН, ВООЗ) рекомендують залучати опромінення продуктів харчування як важливі і ефективні заходи запобігання виникненню і поширенню інфекційних захворювань та епідемій. Умовою поширення цих технологій є створення спеціальних промислових технологічних ліній (установок) і нормативної документації на виробництво продуктів харчування. Наведено характеристики створених за сприяння інноваційного проекту технічних засобів для реалізації промислових технологічних ліній виробництва з використанням опромінювання. Досліджуються й розробляються найбільш ефективні способи їх використання. Наведено результати промислового випробування нових технологій і перспективні шляхи їх впровадження у виробництво України.

**Ключові слова:** радіаційна установка, харчові продукти, пастеризація, пікохвильова обробка, технологія.

**И. В. Вишневский, В. И. Сахно, С. М. Томчай, А. Г. Зелинский, А. В. Сахно. ВНЕДРЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ РАДИАЦИОННОЙ ПАСТЕРИЗАЦИИ И КОНСЕРВАЦИИ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ.**

**Резюме:** В 2004 г. в НАН Украины выполнялся инновационный проект "Внедрение технологий радиационной пастеризации и консервации продуктов питания" с целью внедрения в Украине технологии лучевой пастеризации и консервации продуктов питания для снижения потерь при хранении и защиты потребителей от инфекционных болезней. В статье приведены результаты проведенных исследований физико-технических и технологических разработок для внедрения современных радиационных технологий в пищевое производство Украины. Предложены технические и технологические решения их реализации. Анализируются экономические показатели производства с использованием радиационных технологий и перспективы расширения сети производств за счет конверсии, например, оборонных предприятий или промышленных организаций из других отраслей. Международные организации (ООН, ВОЗ) рекомендуют применять облучение пищевых продуктов как важнейший и эффективный способ предупреждения возникновения и распространения инфекционных заболева-

ний і епідемій. Условием распространения этих технологий есть создание специальных промышленных технологических линий (установок) и нормативной документации на производство пищевых продуктов. Приведены характеристики созданных при поддержке инновационного проекта технических средств для реализации промышленных технологических линий производства с использованием облучения. Исследуются и разрабатываются наиболее эффективные способы их использования. Приведены результаты промышленных испытаний новых технологий и перспективные пути их внедрения в производство Украины.

**Ключевые слова:** радиационная установка, пищевые продукты, пастеризация, пиковолновая обработка, технология.

### **I. M. Vyshnevskiy, V. I. Sakhno, S. P. Tomchay, A. G. Zelinskiy, O. V. Sakhno. IMPLEMENTATION OF THE RADIATION PASTEURIZATION TECHNOLOGIES AND PRESERVATION OF FOOD PRODUCTS.**

**Abstract:** Innovation project "Implementation of radiation pasteurization technologies and preservation of food products was commenced by National Academy of Sciences in Ukraine during 2004. The purpose was to implement in the Ukraine technologies of radiation pasteurization and preservation of food products to prevent the loss of the products while storage and the protection of consumers from infections diseases. The paper contains the physical technical and technological development results of the researches for the introduction of modern radiation technologies to food industry in Ukraine. The technical and technological decision of such realization is proposed. Economic indexes with use of radiation technologies and the perspective of the extension to industry due to the conversion, like an example – military facilities or industrial organizations from another domain are analyzed. International organizations (UN and WHO) recommend to apply the radiation as important and effective measures for prevention and spreading of infection diseases and epidemics. The indispensable condition of such technologies expansion is the creation of the special industrial facilities and normative documentation for food processing. Under assistance of the hardware innovation project the characteristic for the realization of the industrial technological lines with the use of radiation is given. The most effective methods of its usage are studied. A result of the new technological test and the perspective ways of its implementation into the production in the Ukraine is given.

**Keywords:** radiation facility, food products, pasteurization, peak-wave processing, technology.

## АКТУАЛЬНІСТЬ ПРОБЛЕМИ

Вирішення продовольчої програми в Україні та санітарно-епідемічної проблеми безпеки споживання продуктів харчування є однією з найбільш гострих гігієнічних проблем. За офіційними даними тільки на стадії зберігання втрачається від 25 до 50 % і більше продуктів харчування. Загальносвітові тенденції прогресуючої мікробіологічної небезпеки харчових продуктів, пов'язаної з патогенними мікроорганізмами, роблять актуальною задачею підвищення фізіологічної цінності, збалансованості та безпеки харчування. За даними Росії, для прикладу, тільки рівень шлунково-кишкових захворювань становить 30 млн випадків на рік.

Гострою проблемою для виробників України, як і в інших країнах світу, є висока контамінація харчових продуктів (у першу чергу спецій, кави, какао тощо), які надходять з епідемічно ризикових регіонів – Латинської Америки, Африки, Південно-Азіатських країн, Індії. Виготовлені з них продукти харчування мають обмежений строк зберігання і створюють підвищений ризик для споживачів. Мають місце періодичні епідемічні проблеми в різних регіонах України.

Звичні для теперішніх виробників хімічні методи – введення до складу продуктів харчування високоактивних хімічних консервантів та стабілізаторів – хоча і запобігають передчасному псуванню продукції, але не вирішують головної проблеми – безпеки споживання.

До числа перспективних технологій факхівці в усьому світі відносять промислову обробку продуктів харчування випромінюванням пікометрового діапазону довжин хвиль (так звана пікохвильова обробка). Суть цих методів полягає в порушенні пікохвильовим випромінювання біохімічних процесів, що відбуваються в мікроорганізмах.

Цей метод належить до радіаційних технологій виробництва, а використання більш конкретного терміну "пікохвильова обробка" [1] пов'язане з тим, що довжина хвилі випромінювання, яка рекомендована міжнародними документами для обробки харчових продуктів, знаходиться в пікометровому діапазоні електромагнітного спектра.

Процеси пікохвильової обробки відбуваються без підвищення температури обробленої сировини. Вони не спричиняють помітних змін структури чи хімічного складу сировини, а значить не змінюють споживчі і смакові якості продуктів.

Пікохвильові технології поширені в усіх розвинутих країнах. Світовий обсяг виробництва опромінених харчових продуктів у минулому десятиріччі становив більше 600 тис. тонн на рік з тенденцією щорічного зростання на 5–10 %. За даними ООН у 2000 р. об'єм продуктів пікохвильової пастеризації і консервації наблизився до 2 % загальносвітового обсягу виробництва харчових продуктів. У розвинутих країнах з теплим кліматом, наприклад, у США, пікохвильова карантинна обробка є традиційним етапом імпорту всіх спецій і фруктів з обмеженим терміном споживання. Ці заходи здійснюються згідно з міжнародними правилами, встановлених ООН (МАГАТЕ / ФАО / ВО-ОЗ), під контролем Міжнародного комітету по опроміненню харчових продуктів.

Офіційний статус пікохвильових технологій було встановлено в 1983 р. Комісією "Codex Alimentarius", створеною за рекомендаціями 11-ї сесії Конференції ФАО / МАГА-

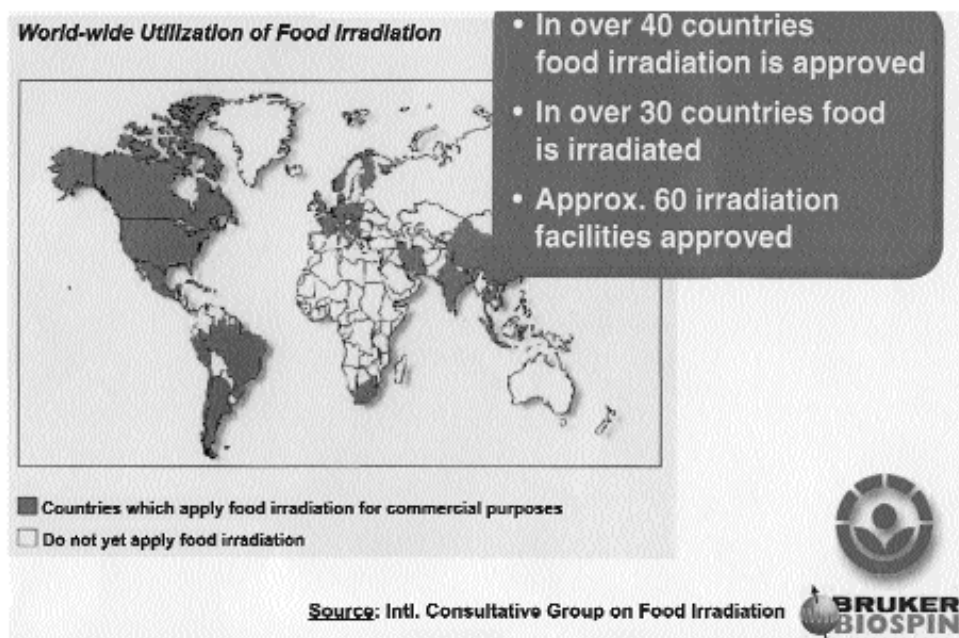


Рис. 1. Центри опромінювання харчових продуктів

TE / ВООЗ [2]. Було встановлено, що харчові продукти, оброблені випромінюванням пікохвильового діапазону є безпечними для споживання людиною. Цей висновок зроблено організаціями ООН ще в 1980 році на підставі численних досліджень і випробувань, проведених за попередні 30 років. Масштаб і глибина виконаних досліджень не мали аналогів. До цього ніякі інші методи обробки харчових продуктів, з точки зору їх безпеки, так старанно ще ніколи не досліджувались. Було об'єктивно встановлено, що пікохвильові харчові технології належать до числа найбільш надійних, що забезпечують високу якість і стабільність продукції. З того часу вони стали важливим елементом сучасного високотехнологічного й рентабельного виробництва.

За кордоном функціонують мережі спеціальних центрів променевої обробки харчових продуктів. Географія їх розташування, за даними фірми BRUKER (США) (рис. 1), охоплює практично усі країни світу. Ці заходи, наприклад, у США, продемонстрували високу ефективність у вирішенні проблеми надійного протиепідемічного захисту населення та зниження витрат бюджету на лікування інфекційних захворювань.

**Таблиця 1 [1]. Витрати енергії при різних методах подовження терміну зберігання харчових продуктів**

<b>Технологія обробки</b>	<b>Параметр процесу</b>	<b>Енергія, МДж/кг</b>
Бланшування	75°C	0,8
Копчення		15
Висушування		15
Теплова стерилізація (автоклав)	120–180°C	0,9
Швидке заморожування	Від 4 до –23°C	7,5
Зберігання в холодильнику	10 днів при 0°C	0,4
Пікохвильова пастеризація електронами 5 MeV	2,5 кГр	0,07
Пікохвильова стерилізація електронами 5 MeV	30,0 кГр	0,43
Приготування страви з тушки курчати	Більше 93°C	2,5

Енергетична криза світової економіки примушує суспільство переглядати доцільність подальшого застосування звичних методів зберігання продуктів харчування. Аналіз енергетичних витрат при різноманітних методах зберігання харчових продуктів (табл. 1) показує, що традиційні методи є енергетично не вигідними й вимагають занадто багато енергії. У певний час це може стати головною причиною обмеження харчування. Наприклад, уже зараз витрати на приготування харчових продуктів у США становлять більше 17 % від загального споживання енергії (3000 ккал/особу) і більше ніж в 14 разів перевищують калорійність вироблених продуктів.

Економічний аналіз показує, що пікохвильові технології харчових продуктів забезпечують позитивний коефіцієнт рентабельності. Типові додаткові витрати на власне новий ефект становлять приблизно 0,9–3,2 % вартості харчового продукту, наприклад для запобігання проростання картоплі чи цибулі, а для дезинсекції зерна – 0,19–1,24 %. Такий же процес для подовження терміну зберігання риби піднімає її собівартість всього на 0,2–2 %.

В Інституті ядерних досліджень НАН України (далі – ІЯД) разом з фахівцями галузевих наукових закладів МОЗ України проведено численні науково-технологічні дослідження ефективності пікохвильових методів у виробництві широкого переліку харчових продуктів та сировини (кондитерських виробів, харчових продуктів з риби, молочних продуктів, овочів, спецій тощо). Було доведено, що пікохвильова обробка дає можливість повністю знешкодити небажану мікрофлору в сільськогосподарській продукції та імпортованій сировині. Було показано, що пікохвильові технології різко збільшують строк зберігання високоякісних (делікатесних) малосолоних продуктів, що дає змогу спростити умови їх безпечного зберігання [4].

Було встановлено, що при променевої пастеризації немає необхідності застосовувати хімічні реагенти, а тому відпадає потреба їх виробництва та безпечного зберігання. Одночасно цим запобігаються функціональні проблеми й захворювання споживачів, що спричиняються хімічними консервантами.

Опромінення дає змогу регулювати численність мікроорганізмів виключно тільки за рахунок витрат електроенергії на живлення відповідної установки всього протягом 10–200 с і тільки в момент пастеризації продукції.

Дослідження дали змогу визначити пріоритетними для України напрямками впровадження пікохвильових технологій у виробництво найбільш нестійких продуктів харчування, наприклад рибних пресервів. Для цих високоякісних продуктів найбільшою проблемою є термін та умови безпечного зберігання, що, відповідно, визначає економічні стимули їх виробництва. Можна узагальнити найбільш очевидні передумови застосування пікохвильових харчових технологій:

- пікохвильові методи практично безальтернативні з точки зору найнижчих енерговитрат;
- при пікохвильовій обробці виключаються з складу харчових продуктів хімічні консерванти та стабілізатори, продукти зберігають свою свіжість і фізичний стан (заморожені, сухі, жарені, варені тощо);
- променеві процеси виробництва характеризуються метрологічно визначеними числовими показниками й надійними методами їх контролю на всіх стадіях. На такому виробництві виключається вплив "суб'єктивного" фактора на якість, є можливість автоматизації процесів й отримання стабільних показників продукції незалежно від об'ємів її виробництва;
- опромінювання харчових продуктів є особливо важливим технологічним прийомом для країн з теплим кліматом, де

об'єктивно важко підтримати потрібну гігієну. І тому перспективи використання пікохвильових технологій є широкими;

- застосування пікохвильових технологій реально дають можливість знизити втрати врожаю і виробляти додатково великі об'єми харчових продуктів. При наявності відповідної технічної бази виробник зможе реалізувати найбільш економічно виправдані технологічні процеси.

Єдиною проблемою застосування опромінювання харчових продуктів є відносна екзотичність опромінювальної техніки.

### РАДІАЦІЙНА УСТАНОВКА ІЯД

Для вирішення проблем пікохвильової обробки продуктів в Україні було започатковано інноваційний проект № 38/04. Його метою було створення першої технологічної лінії універсального призначення для обробки широкого переліку харчових продуктів і сільськогосподарської сировини. Було передбачено створити на технічній базі ІЯД [5] пілотну промислову технологічну лінію, яку потім можна буде повторити в інших регіонах. Було заплановано виконати комплексну розробку:

- джерел випромінювання, технологічних приміщень для розміщення цих джерел та супутніх технічних засобів, спеціальних та допоміжних засобів, інженерної інфраструктури;
- технології виробництва, технологічної та нормативної документації, сертифікованої у відповідних державних органах.

Технічні умови розробок визначались особливостями пікохвильових технологій, у першу чергу високими вимогами до точності дотримання технологічного процесу. Тут додатково необхідно вирішити коло проблем щодо метрології процесів, ефективності за-

стосування, економіки виробництва, а також специфічних застережень радіаційної і технологічної безпеки.

Аналіз технічних можливостей України показав, що базою для промислового впровадження променевих технологій можуть бути прискорювачі електронів, що за своїми характеристиками повністю відповідають міжнародним нормам для опромінення харчової продукції [2]. Указані установки розташовані в різних регіонах України, раніше вони використовувались переважно для високотехнологічних оборонних робіт та унікальних фундаментальних досліджень. Установки мають необхідну комплектацію й відповідний персонал. У результаті конверсії військових програм і ліквідації оборонних підприємств ці установки звільнились для цивільного застосування.

Економічно виправданим, згідно рекомендацій [2, 6], вибрано прискорювач з енергією електронів 4–10 МеВ. В Україні такими є лінійні резонансні прискорювачі серії "Еле-

ктроніка", а також деякі з лінійних прискорювачів Харківського фізико-технічного інституту. З існуючих в Україні 26 прискорювачів різного типу [6] п'ять з них доцільно використати для створення регіональних промислових центрів пікохвильової обробки харчової продукції. Але тут необхідно вирішити науково-технічні проблеми реконструкції цих прискорювачів у технологічні лінії для подальшої безпечної та рентабельної експлуатації на виробництві.

Для лінійних прискорювачів найбільшою проблемою є невисокий промисловий коефіцієнт корисної дії, а також дефіцит імпортованих комплектуючих. Також важливою проблемою є висока вартість облаштування необхідних засобів протирадіаційного захисту цих високоенергетичних прискорювачів, що негативно позначається на одиничній вартості установки і, відповідно, собівартості обробленої харчової продукції.

Дослідження показали, що існує шлях досить ефективного вирішення вказаних

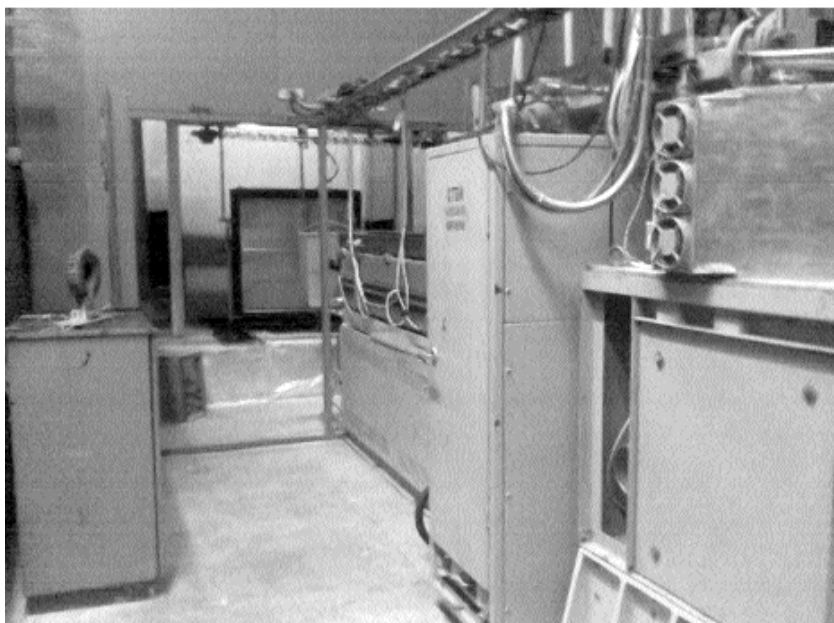


Рис. 2. Технологічна лінія з прискорювачем електронів

Таблиця 2. Технічні характеристики джерела випромінювання

Найменування показника	Одиниця виміру	Показник	Примітка
Середня енергія електронів	МеВ	5	
Струм пучка в імпульсі	А	0,75	4 мкс
Тривалість імпульсів	мкс нс	1-5 2-5	на рівні 0,5 --“--
Частота повторення імпульсів	Гц	1-200	або одиночні
Споживання потужності від силової мережі	кВт	75	макс.
Споживання води	м <sup>3</sup> /год	4	макс.
Споживання повітря	м <sup>3</sup> /год	1	4 кг/см <sup>2</sup>

Таблиця 3. Технічні характеристики установки

Параметр	Значення
Потужність	7500 т/рік
Ресурс	5000 год/рік
Строк служби	Не менше 15 років
Вартість експлуатації	470 грн. /год
Персонал	2 особи/зміну

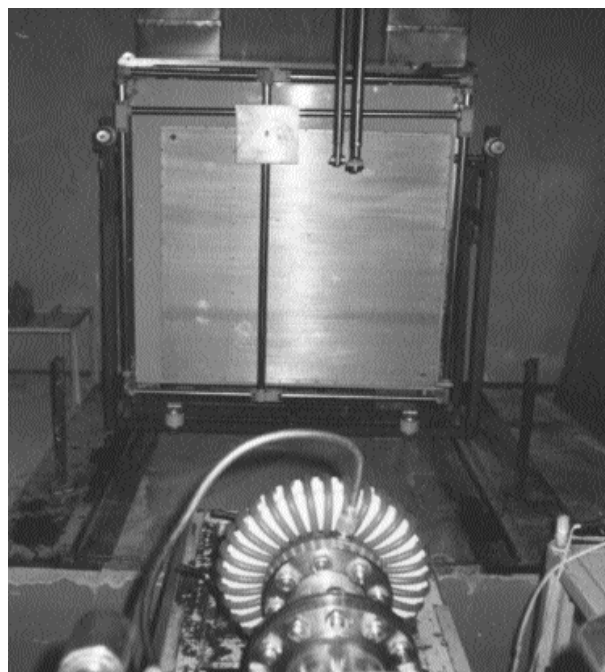


Рис. 3. Технічні засоби технологічної дозиметрії

проблем – це відповідна модернізація енергоємного обладнання прискорювачів і розробки оптимізованих методів проектування протирадіаційного захисту [7].

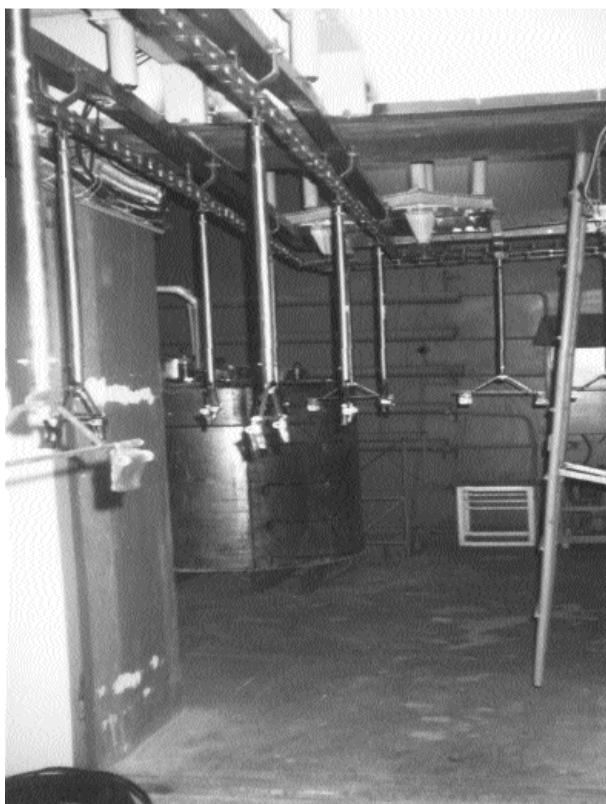
З урахуванням результатів таких досліджень і рекомендацій міжнародних регулюючих документів в ІЯД було створено [8] конструкцію пілотної технологічної лінії пікохвильової пастеризації харчових продуктів (рис. 2). Вона базується на промисловому прискорювачі електронів з середньою енергією 5 МеВ серії "Електроніка", параметри якого наведено в табл. 2. Вона розташована в приміщеннях окремого корпусу. Обладнання, що становить радіаційну небезпеку, розміщено в боксі з протирадіаційним захистом.

До складу установки входять джерело випромінювання та комплекс допоміжних систем. Це система контролю за технологічним процесом, системи технічної безпеки і життєзабезпечення, системи регулювання та

керування, які конструктивно розташовані в спеціальних приміщеннях єдиного корпусу, а також лінія автоматичного транспортування зразків продукції в реакційну камеру.

Технічні характеристики установки наведено в табл. 3. Керування установкою і ходом технологічного процесу здійснюється з центрального пульта керування, до складу якого входять електронно-вимірвальні прилади контролю за режимом численного обладнання установки [9], спеціальні автоматичні засоби технічного захисту обладнання установки, автоматизовані засоби радіаційного контролю і захисту, системи автоматичного регулювання й стабілізації, монітори систем промислового телебачення.

Для вирішення метрологічних проблем на установці створено спеціальну систему технологічної дозиметрії [10], яка складається з засобів оперативного вимірювання радіаційних полів і засобів їх калібрування. У



**Рис. 4.** Операційний конвейер (транспортна лінія)

зв'язку з відсутністю в Україні прототипу таких систем її було побудовано на спеціально розроблених в ІЯД технічних засобах вимірювання. Вона включає комплекс датчиків, апаратуру накопичення й обробки інформації. Основні засоби технологічної дозиметрії встановлено в реакційній камері установки (рис. 3). Система забезпечена відповідною метрологічною атестацією і дозволяє виконувати всі необхідні вимірювання для встановлення дози опромінення.

Технічні засоби системи забезпечують метрологічну точність вимірювання інтенсивності випромінювання 15 % (за абсолютним значенням) у будь-якій точці контрольованого простору. Координати точки вимірювання визначаються з похибкою не більше 1–2 %.

**Таблиця 4.** Технічні характеристики транспортної лінії

Параметр	Вимір	Значення
Максимальне навантаження конвейера	кг	600
Максимальна маса одного зразка	кг	20
Максимальна швидкість переміщення	м/хв	3
Максимальні габарити зразків	см	60×120
Довжина конвейера	м	40
Кількість підвісок	штг	25

Вимірювання розподілу полів опромінення здійснюється за допомогою спеціального вимірювального планшета з прецизійним двокоординатним скануючим механізмом, що дистанційно переміщується по глибині реакційної камери (див. рис. 3). Він дає змогу контролювати розподіл поля в об'ємі 900 × 900 × 1500 мм. Досягнута точність контролю положення каретки цього пристрою не гірше  $\pm 1$  мм.

Отримані параметри системи вимірювань дозволяють сформулювати радіаційне поле в області опромінювання матеріалів об'ємом близько 2 м<sup>3</sup> з нерівномірністю менше  $\pm 5$  %. Це відповідає потребам пікохвильових технологій харчових продуктів, для яких рівномірність опромінення жорстко встановлено відповідними технічними умовами [10].

Матеріали на опромінення подаються за допомогою спеціального операційного конвейера. Його технічні характеристики наведено в табл. 4. Вимоги до параметрів транспортеру – це стабільність і регульована швидкість. При розробці транспортної лінії було вирішено ряд неординарних технічних проблем.

Головною проблемою було забезпечення вказаних технічних параметрів для переміщення продукції через зону опромінювання. Технічно це не просто, враховуючи велику довжину транспортера, на якому одночасно розміщується 20–28 зразків до 20 кг кожний.



Рис. 5. Схема технологічного процесу пікохвильової пастеризації

Швидкість руху транспортера контролюється й регулюється в діапазоні від 0,2 до 4 м/хв залежно від вимог конкретної технології.

Конвейер здійснює складні переміщення продукції для одно- чи двохстороннього опромінення у старт-стопному чи безперервному режимі переміщення, надає можливість зупинки її в зоні опромінення на будь-який час, реверс та інші допоміжні функції.

Створена транспортна лінія (рис. 4) забезпечує підйом продукції з місця завантаження з першого поверху на рівень другого, потім, через лабіринт, транспортування в бокс прискорювача. Там продукція переміщується в реакційну камеру під пучок електронів і повертається назад на перший поверх для вивантаження. Для догляду за роботою транспортної лінії встановлено камери промислового телебачення.

У режимі безперервної роботи конвейера можна опромінювати до 2,5 т матеріалів на годину. Це дозволяє опрацювати оптимальні методи опромінення великих промислових партій матеріалів при практичному випробуванні радіаційних технологій перед передачею їх на підприємство, а також практично використовувати установку виробниками київського регіону.

Керування транспортною лінією ручне або автоматичне. Транспортер забезпечений засобами контролю швидкості переміщення зразків, датчиками наявності зразків в зоні опромінення, електронними засобами керування електроприводом. Такі функції дають змогу виконувати не тільки опромінювання матеріалів, а також проводити великий перелік наукових та технологічних досліджень, складні радіаційні випробування.

## **ПРАКТИЧНІ ПРОМИСЛОВІ ВИПРОБУВАННЯ**

Для промислового випробування установки було розроблено технологічний регламент на пікохвильову пастеризацію рибних пресервів та необхідну супутню технологічну документацію [11]. Схему технології показано на рис. 5. Зі складу цих продуктів виключено будь-які хімічні консерванти, а вміст солі зменшено до 3–4 %, що відповідає сучасному дієтичному рівню. За цими технологіями пресерви було виготовлено в умовах рибопереробного підприємства [12]. Випробування проводилися в об'ємах добового випуску пресервів. Після пастеризації і відповідної витримки було проведено всебічне дослідження споживчих показників нової продукції.

## Інноваційні проекти Національної академії наук України

Таблиця 5. Техніко-економічні показники виробництва

Характеристики	Параметри
Обсяги виробництва	5 млн банок/рік (2,5 млн умовних банок/рік)
Об'єм переробленої сировини	131 т/міс
Сировина	оселедці
Продукція	пресерви по ТУУ 23724640-001-97
Ціни на продукцію	1,0 дол США
Чисельність робітників	50 осіб
Річний режим роботи	500 змін/рік
Процес пастеризації	прискорювач електронів 5–9 МєВ

Було підтверджено, що пастеризація не впливає на смакові показники продукту [5], вони були стабільними впродовж 60 діб зберігання при позитивних температурах (0–+5°C). Аналізи показали, що після обробки знизився і стабілізувався мікробіологічний статус. Отримані результати дали підставу провести техніко-економічну оцінку перспектив організації підприємства середньої потужності по випуску таких пастеризованих пресервів. Розрахунки наведено в табл. 5. Показано, що на базі пікохвильових технологій можна створити високорентабельне виробництво й випускати для населення України високоякісні й недорогі продукти харчування. А можливість тривалого зберігання при вказаних температурах є вагомим аргументом щодо експорту такої продукції.

### ВИСНОВКИ

У рамках виконання інноваційного проекту в Україні на технічній базі ІЯД створено сучасну промислову технологічну опромінювальну установку, що відповідає вимогам міжнародного та національного законодавства. На установці випущено дослідні партії харчових продуктів, отримано сертифікати відповідності діючим вимогам законодавства. Цим було практично засвідчено, що в Україні створено першу технологічну лінію промислової пікохвильової пастеризації харчових продуктів.

Для такої лінії в проекті розроблено й представлено методи підвищення ефективності електричних джерел випромінювання, а також способів їх застосування для опромінювання харчових продуктів. Було досліджено й розроблено сучасні принципи побудови електрофізичного обладнання, визначено оптимальні шляхи конструювання різноманітних допоміжних технічних засобів. Досліджувались і перевірялись заходи зниження витрат на спорудження спеціальних приміщень для розміщення джерел випромінювання. Вивчались і розроблялись сучасні методи побудови систем метрології й контролю якості променевої технологічної процесів, які було сертифіковано відповідно до діючих в Україні положень.

Промислові можливості, наприклад для пастеризації пресервів з риби, перевищують 5 млн упаковок на рік. Розрахунковий термін окупності однієї такої технологічної лінії не більше трьох років.

Дослідно-промислова експлуатація установки показала, що опромінювання є ефективним шляхом подовження строків зберігання й карантинної санітарно-гігієнічної обробки будь-яких продуктів харчування – особливо з групи так званих "ризикових" продуктів з риби, морських молюсків, спецій та прянощів, південних фруктів та овочів. Експериментально було доведено, що впровадження технологій променевої пастеризації дасть змогу виключити втрати харчових продуктів через їх псування, особливо в теплі періоди року (за оцінками виробників втрати харчових продуктів у теплий період можуть перевищувати 30 % виробленої продукції).

На відповідність діючим нормативним положенням було випробувано в реальних умовах на діючому виробництві технологічну документацію (технічні умови, технологічні інструкції, технологічні регламенти тощо). Експериментальне промислове випробування технологій показало, що за своєю

ефективністю, економічними та екологічними показниками вони не мають альтернативи.

За результатами виконання даного проекту можна започаткувати нові інноваційні проекти для сільськогосподарської, переробної та харчової галузі. В їх обсязі можна створити в Україні мережу регіональних центрів пастеризації і консервації сільськогосподарської сировини й готової харчової продукції. Базою для неї є існуючі прискорювачі електронів, конвертовані в галузь виробництва харчових продуктів. Такі центри, наприклад, можуть бути створені в Одесі, Херсоні, Ужгороді, Києві, Харкові, Славутичі.

В результаті українська промисловість отримає можливість реалізувати сучасні високоефективні технології, підняти рівень національної економіки, а також покращити санітарно-епідемічну обстановку в Україні.

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Нечаев А. Ф.** Пиковолновая обработка пищевых продуктов // Химическая промышленность. Сер. Радиационная химия и технология; радиационная стойкость.– М., 1991.
2. Codex Alimentarius (CAC/Vol, XV – Ed. I). Rome: FAO/WHO, 1984.
3. Combination processes for irradiation: proceedings of the Final Research Co-ordination Research Programme on Irradiation in Combination with Other Processes for Improving Food Quality / organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in Pretoria, South Africa, 27 February – 3 March 1995. –Vienna: IAEA, 1998.
4. **Сахно В. И., Нехамкин Б. Л., Голенкова В. В.** Технология низкотемпературной пастеризации пресервов // Новые направления в области традиционных технологий переработки рыбы. Сб. науч. тр.–Калининград: Изд. Атл. НИРО, 1996.– С. 116.
5. **Сахно В. И., Вишневский И. Н., Халова Н. В., Томчай С. П.** Разработка технологии производства рыбных пищевых продуктов с использованием электрофизических установок // ВАНТ.–1997.–Т. 2.–Вып. 4, 5 (31, 32).–С. 172.
6. **Sakhno V.** Accelerators in Ukraine.–Accelerator newsletter.–I.A.E.A. Austria.–1995.–Vol II.–No. 4.
7. **Сахно В. И.** Проблемы оптимизации использования радиационных установок // ВАНТ.–2005. Сер. Физика радиационных повреждений.– С. 149–152.
8. **Вишневский И. Н., Зелинский А. Г., Сахно В. И. и др.** Радиационная установка с ускорителем электронов ИЯИ НАН Украины // Атомная энергия.–2003.–Т. 94.–Вып. 2, февраль.–С. 163–166.
9. **Вишневський І. М., Сахно В. І., Зелінський А. Г. та інш.** Розробка та дослідження параметрів датчика струма пучка електронів радіаційної установки ІЯД // Зб. наук. праць ІЯД.–2003.–№ 2(10).–С. 146–149.
10. **Вишневський І. М., Сахно В. І., Зелінський А. Г. та інш.** Система вимірювання розподілу полів випромінювання на радіаційній установці ІЯД // Зб. наук. праць ІЯД.–2004.–№ 2(13).–С. 159–162.
11. **Сахно В. И., Нехамкин Б. Л., Андреев М. П.** Пресерви рыбні низькотемпературної пастеризації.–Технічні умови України. ТУУ–23724640–97–001.
12. Итоги науки и техники. Сер. Химия и технология пищевых продуктов. Т. 2. Радиационная обработка пищевых продуктов.–М., 1989.–С. 156.

## СТВОРЕННЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ В МЕДИЧНУ ПРАКТИКУ ТЕСТ-СИСТЕМ ДЛЯ ГЕННОЇ ДІАГНОСТИКИ ТЯЖКИХ СПАДКОВИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

*Л. А. Лівшиць, В. М. Пампуха, О. А. Ясінська, Г. Б. Лівшиць,  
Н. В. Грищенко, С. А. Кравченко, М. В. Нечипоренко, Г. В. Єльська*  
*Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, Київ*

*Надійшла до редакції 08.04.05*

**Резюме:** Розроблені тест-системи та створені їх лабораторні зразки, основані на застосуванні ДНК-аналізу для діагностики найбільш поширених в Україні моногенних спадкових захворювань таких як муковісцидоз, спадковий гемохроматоз, синдром Мартіна-Бела (ламкої Х-хромосоми) та генетично обумовлених форм чоловічого безпліддя. Розроблені тест-системи можуть застосовуватись в спеціалізованих медико-генетичних, педіатричних закладах, центрах з планування родини та клініках, які застосовують допоміжні репродуктивні технології.

**Ключові слова:** мутації, муковісцидоз, спадковий гемохроматоз, синдром ламкої Х-хромосоми, фактор азооспермії, ДНК-діагностика, ПЛР.

**Л. А. Лившиц, В. М. Пампуха, О. А. Ясинская, А. Б. Лившиц, Н. В. Грищенко, С. А. Кравченко, М. В. Нечипоренко, А. В. Ельская. СОЗДАНИЕ И ВНЕДРЕНИЕ В МЕДИЦИНСКУЮ ПРАКТИКУ ТЕСТ-СИСТЕМ ДЛЯ ГЕННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТЯЖЕЛЫХ НАСЛЕДСТВЕННЫХ ЗАБОЛЕВАНИЙ.**

**Резюме:** Разработаны тест-системы и созданы их лабораторные образцы, основанные на использовании ДНК-анализа для диагностики наиболее распространенных в Украине моногенных наследственных заболеваний таких как муковисцидоз, наследственный гемохроматоз, синдром Мартина-Белла (ломкой Х-хромосома) и генетически обусловленной формой мужского бесплодия. Разработанные тест-системы могут применяться в специализированных медико-генетических, педиатрических заведениях, центрах по планированию семей и клиниках, которые применяют вспомогательные репродуктивные технологии.

**Ключевые слова:** мутации, муковисцидоз, наследственный гемохроматоз, синдром ломкой Х-хромосома, фактор азооспермии, ДНК-диагностика, ПЦР.

**L. A. Livshits, V. M. Pampukha, O. A. Yasinska, G. B. Livshits, N. V. Hryshchenko, S. A. Kravchenko, M. V. Nechiporenko, G. V. Elska. CREATION AND APPLICATION OF TEST-KITS FOR SEVERE HEREDITARY DISEASES GENE DIAGNOSTICS TO MEDICAL PRACTICE.**

**Abstract:** Test-systems and their exhibition working samples based on the DNA-analysis for diagnosis most spread in Ukraine monogenic hereditary disorders such as: cystic fibrosis, hereditary chromatosis, Martin-Bell syndrome (fragile X), genetic forms of male infertility were elaborated. The elaborated test-systems would be used in special medical centers for medical genetics, pediatric and in IVF clinics, which apply assessment reproductive technologies.

**Keywords:** mutations, cystic fibrosis, hereditary chromatosis, Martin-Bell syndrome (fragile X), azoospermia factor, DNA-diagnosis, PCR.

Результати проведених нами досліджень природи, спектру та розповсюдженості мутацій, які призводять до розвитку муковісцидозу, спадкового гемохроматозу, синдрому ламкої Х-хромосоми, факторів азооспермії, проведені серед населення різних регіонів України, дозволили встановити специфічність спектру мажорних мутацій, що локалізуються в різних екзонах гена ТРБМ, 2-му та 4-му екзонах гена HFEI, в ділянці FRAXA гена FMR1, в ділянці AZFc фактора азооспермії [1–4]. Отримані результати стали підґрунтям для розробки методів ДНК-діагностики мутантних генів в родинях високого ризику та при проведенні селективного і масового скринінгу населення з метою профілактики та прецизійного ефективного лікування цих тяжких спадкових захворювань. Метою проекту була розробка діагностичних методик ДНК-аналізу мутацій в різних екзонах гена ТРБМ (муковісцидоза), 2-му та 4-му екзонах гена HFEI, в ділянці FRAXA гена FMR1, в ділянці AZFc фактора азооспермії та створення готових до впровадження діючих лабораторних зразків ампліфикаційних тест-систем, для використання в спеціалізованих медико-генетичних центрах та дитячих лікарнях з метою пре- і постнатальної діагностики, уточнення діагнозу, медико-генетичного консультування родин високого ризику та проведення масового і селективного скринінгу носіїв мажорних мутацій вище означених генів.

В ході даної розробки були поставлені та вирішені наступні задачі:

- 1) Оптимізація методу виділення та очищення препаратів геномної ДНК з біологічних тканин людини (лейкоцитів периферійної крові, біоптатів хоріона, плаценти). Створення колекції зразків ДНК з мутантними і нормальними варіантами.
- 2) Розробка дизайну (нуклеотидної послідовності) праймерів для ампліфікації ДНК *in vitro* в 2-му, 3-му, 4-му, 7-му,

10-му, 11-му, 20-му, 21-му екзонах та в 2-му, 3-му, 4-му і 10-му інтронах гена трансмембранного регуляторного білку муковісцидозу (ТРБМ), 2-му та 4-му екзонах гена HFEI, в ділянці FRAXA гена FMR1, локусів: sY240, sY146, sY254, sY255, sY158 (AZFc). Синтез олігонуклеотидів відповідних послідовностей.

- 3) Розробка і оптимізація складу реакційної суміші та температурно-часових режимів для проведення полімеразної ланцюгової реакції з метою специфічної ампліфікації *in vitro* наступних послідовностей ДНК: 2-й, 3-й, 4-й, 7-й, 10-й, 11-й, 20-й, 21-й екзони та 2-й, 3-й, 4-й і 10-й інтрони (ген ТРБМ), 2-й та 4-й екзони гена HFEI, в ділянці FRAXA гена FMR1, локусів: sY240, sY146, sY254, sY255, sY158 (AZFc).
- 4) Підбір ендонуклеаз рестрикції із сайтами впізнавання, специфічними для послідовностей 1717-1G, R553X, G551D, R117H, 621+1G→T, R334, R347, N1303K, G542X, 1154insTC, 1717-1GaA, S5491, 1677delTA (ген ТРБМ) та C282Y, H63D (ген HFEI).
- 5) Відпрацювання та оптимізація складу реакційної суміші для проведення специфічної рестрикції.
- 6) Відпрацювання та оптимізація температурно-часових режимів для проведення специфічної рестрикції.
- 7) Розробка методів детекції ампліконів з використанням електрофоретичного фракціонування в поліакриламідному та агарозному гелях.
- 8) Розробка робочих діагностичних методик та лабораторних зразків тест-систем.

### **СТВОРЕННЯ КОЛЕКЦІЇ ЗРАЗКІВ ДНК З МУТАНТНИМИ І НОРМАЛЬНИМИ ВАРІАНТАМИ**

Для виділення препаратів геномної ДНК з біологічних матеріалів людини (лейкоцити,

біоптати хоріону, плаценти, клітини амніотичної рідини та букального епітелію) зазвичай використовують депротейнізацію лізатів клітин з використанням протеїнази К та очищення препаратів ДНК фенол-хлороформною екстракцією з наступним осадженням етиловим спиртом [5]. Для виділення препаратів геномної ДНК із зразків свіжої крові, консервованої стандартним препаратом глюцициром, нами проводився розділ лейкоцитарної і еритроцитарної маси за рахунок седиментації клітин в розчині, що містить 3,5 % желатину і 0,8 % NaCl. Після розшарування такого розчину у вузькому циліндрі відбирали верхній шар, що містить завись лейкоцитів, промивали його 0,8 % NaCl рівним об'ємом і осаджували клітини центрифугуванням (3000 об/хв, 10 хвилин). Осад клітин ресуспендували в 2-х мл 0,8 % NaCl, додавали 2 мл 0,5 М ЕДТА (рН 8,0). Після цього лізували розчином додецилсульфату натрію (кінцева концентрація 1 %). Проводили виділення ДНК додаванням розчину перхлорату натрію до кінцевої концентрації 1,2 М. Очищення препарату ДНК проводили хлороформною екстракцією, осадження препарату ДНК проводили 0,6–0,8 об'ємами ізопропілового спирту.

Використаний метод дозволяє уникнути використання токсичної речовини – фенолу, що є суттєвим для охорони навколишнього середовища та охорони праці співробітників. Крім того, з процесу вилучено застосування коштовного препарату – протеїнази К, який не виробляється в Україні і є критичним імпортом.

Було створено банк лейкоцитарної ДНК хворих та членів їх родин, що налічує 50 зразків, з ідентифікованими мутаціями генів: ТРБМ, НFEI, FMR1 та AZF. Зразки ДНК створеного банку відповідають наступним генотипам:

1. ТРБМ –  $\Delta F508/\Delta F508$ ;  $\Delta F508/W$ ;  
 $\Delta F508/CFTR\text{del}21\text{kb}$ ;  $\Delta F508/1677\text{delTA}$ ;

$\Delta F508/G542X$ ;  $\Delta F508/N1303K$ ;  
 $N1303K/N1303K$ ;  $1677\text{delTA}/W$ ;  
 $CFTR\text{del}21\text{kb}/W$ ;  $N1303K/W$ ;  $W1282X/X$ ;  
 $G542X/X$ ;  $R117H/X$ .

2. НFE –  $H63D/W$ ;  $H63D/H63D$ ;  
 $H63D/C282Y$ ;  $C282Y/W$ ;  $C282Y/C282Y$ .

3. FMR1 – зразки містять широкий спектр алельних варіантів з різною кількістю CGG-повторів (від 18 до 57 копій).

4. AZF –  $\text{del } sY153, sY240, sY146, sY254$  (DAZ),  $sY255$  (DAZ),  $sY158$ ;  $\text{del } sY240, sY146, sY254$  (DAZ);  $\text{del } sY254$  (DAZ),  $sY255$  (DAZ),  $sY158$ ;  $\text{del } sY117, sY124, sY134$ .

Зразки ДНК зберігаються при температурі  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  і можуть бути використані як стандарти для контролю якості результатів діагностики відповідних спадкових захворювань.

### **РОЗРОБКА ДИЗАЙНА (НУКЛЕОТИДНОЇ ПОСЛІДОВНОСТІ) ПРАЙМЕРІВ**

Проведено розробку дизайна (нуклеотидної послідовності) праймерів для ампліфікації ДНК *in vitro* в 2-му, 3-му, 4-му, 7-му, 10-му, 11-му, 20-му, 21-му екзонах та в 2-му, 3-му, 4-му і 10-му інтронах гена трансмембранного регуляторного білку муковісцидозу (ТРБМ), в 2-му та 4-му екзонах гена НFEI, в ділянці FRAXA гена FMR1, локусів:  $sY240, sY146, sY254, sY255, sY158$  (AZFc). Аналіз послідовності праймерів на специфічність проводили з використанням комп'ютерної бази даних BLAST SEARCH за умов сканування геномної послідовності ДНК генів ТРБМ [6], НFEI [7], FMR1 [8], AZFc [9]. Основні вимоги до дизайну були наступні: висока специфічність з гомологією не менше ніж 90 %; якомога нижчий склад гуанідину в послідовності; однакові температури плавлення для

кожного з членів пари праймерів. За результатами аналізу були відібрані послідовності, які відповідають всім необхідним вимогам. Послідовності знаходяться в процесі патентування. З використанням твердофазного фосфоамедітного метода проведено синтез відповідних олігонуклеотидів, які можуть бути використані в якості праймерів, що входять до реакційної суміші, в тест-системах з ДНК-діагностики муковісцидоза, спадкового гемохроматоза, синдрому ламкої Х-хромосоми та факторів азооспермії.

### **РОЗРОБКА ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СКЛАДУ РЕАКЦІЙНОЇ СУМІШІ ТА ТЕМПЕРАТУРНО-ЧАСОВИХ РЕЖИМІВ ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ СПЕЦИФІЧНОЇ ПОЛІМЕРАЗНОЇ ЛАНЦЮГОВОЇ РЕАКЦІЇ**

Оптимальні умови проведення полімеразної ланцюгової реакції – склад реакційної суміші та температурно-часовий режим дозволяють отримати достатню для детекції кількість високо специфічного продукту ампліфікації ДНК *in vitro*. З метою створення таких умов проведення реакції нами проводився аналіз послідовностей ДНК-матриць для ПЛР та відповідних фланкуючих праймерів. Критичними параметрами для реакційної суміші були: концентрація іонів магнію, кількість ферменту – термостабільної Таq-полімерази та концентрація праймерів. Критичними вимогами до температурних режимів була: температура відпалення праймерів на ДНК-матриці та температура синтезу. Вимоги до часових режимів були наступними: співвідношення періоду денатурації до періоду відпалення праймерів та оптимальний час фази синтезу, а також загальна кількість повних циклів реакції. В результаті дослідження цих параметрів були зроблені відповідні температурно-часові режими.

### **ПІДБІР СПЕЦИФІЧНИХ ЕНДОНУКЛЕАЗ РЕСТРИКЦІЇ З САЙТАМИ ПІЗНАВАННЯ ПОСЛІДОВНОСТЕЙ МУТАЦІЙ ГЕНА ТРБМ ТА ГЕНА НВЕІ**

Для детекції мононуклеотидних замінів, які мають місце у випадку мутацій (N1303K, R117H, 1717-1G>A (ген ТРБМ) та С282Y, H63D (ген НВЕІ)) використовували метод аналізу поліморфізму довжини рестрикційних фрагментів (ПДРФ). З цією метою необхідно було підібрати ендонуклеази рестрикції, які б специфічно гідролізували мутантні та нормальні послідовності гена ТРБМ та гена НВЕІ. Для аналізу таких ендонуклеаз рестрикції нами була використана програма Vector NTI Suite 6. Реакційна суміш для проведення рестрикції була оптимізована таким чином, що рестрикцію можна було проводити безпосередньо в буфері ампліфікації, що дозволяло уникнути додаткової стадії виділення та очищення ампліфікованих фрагментів ДНК. В результаті проведеного аналізу були підбрані необхідні ендонуклеази рестрикції та відповідні температурно-часові режими для реакції гідролізу цими ендонуклеазами.

### **ВІДПРАЦЮВАННЯ УМОВ ЕЛЕКТРОФОРЕТИЧНОГО ФРАКЦІЮВАННЯ**

Електрофоретичне фракціювання дозволяє проводити візуалізацію та визначення специфічних продуктів ПЛР. Умови проведення цього фракціювання в кожному випадку повинні вирішувати задачу максимального розділення різних за молекулярною масою продуктів ПЛР за мінімальний час. З цією метою нами було проведено дослідження агарозних та поліакріламідних гелів різних концентрацій. Також відпрацьовувались розміри гелів, параметри сили струму та напруги, час про-

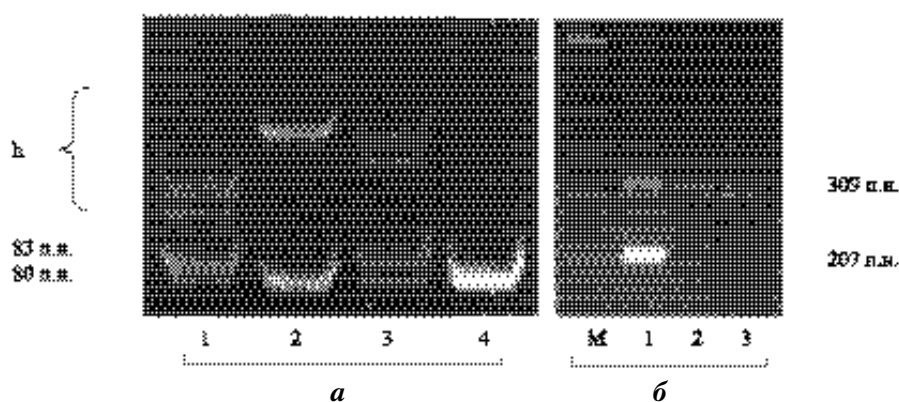


Рис. 1. Аналіз мутацій гена ТРБМ: а) в 10-му екзоні, 12 %-й ПААГ: 1 – гетерозиготний носій делеції 1677delTA; 2 – індивід із генотипом 1677delTA/delF508; 3 – гетерозиготний носій делеції delF508; 4 – індивід із генотипом delF508/delF508; б) протяжної делеції CFTRdele2,3(2,1 kb), 1,8 %-вий агарозний гель: М – маркер молекулярної маси (Ladder 100 bp, Pharmacia); 1 – носій мутації; 2, 3 – здорові індивіди

ведення фракціювання. За результатами дослідження були розроблені відповідні режими для детекції кожної з досліджуваних мутацій.

Розроблено супровідну документацію у вигляді протоколів робочої діагностичної методики для ДНК-аналізу мутацій при муковісцидозі, спадковому гемохроматозі, синдромі ламкої Х-хромосоми, факторах азооспермії.

### ЗАГАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТЕСТ-СИСТЕМ

В ході виконання проекту були розроблені тест-системи та створені їх лабораторні зразки, основані на застосуванні ДНК-аналізу для діагностики найбільш поширених в Україні моногенних спадкових захворювань таких як, муковісцидоз, спадковий гемохроматоз, синдром Мартіна-Бела (ламкої Х-хромосоми) та генетично обумовлених форм чоловічого безпліддя. Дані тест-системи дозволяють не тільки проводити діагностику цілого ряду найбільш розповсюджених спадкових патологій, але й стануть основою системи

вторинної профілактики найбільш розповсюджених тяжких захворювань в родинах високого ризику завдяки можливості проведення пренатальної діагностики на ранніх термінах вагітності та організації програм добровільного генетичного тестування гетерозиготних носіїв мутантних генів.

1. Розроблена тест-система для ДНК-діагностики наступних найбільш розповсюджених в Україні мутацій гена ТРБМ: delF508, delF507, CFTR2, 3del21kb, 1717-1G, R553X, G551D, R117H, 621+1G→T, R334W, R347, N1303K, G542X, 1154insTC, 1717-1GaA, S5491, 1677delTA. На рис. 1 наведено приклад аналізу деяких мутацій. Тест-система може бути використана в клінічній (постнатальне уточнення діагнозу), в пренатальній (з першого триместру вагітності) діагностиці МВ та для виявлення гетерозиготних носіїв а – в родинах високого ризику, б – в програмах добровільного генетичного тестування населення.

2. Розроблена тест-система для ДНК-діагностики найбільш поширених мутацій С282У і Н63D в гені HFE-1. На рис. 2 наведено приклад аналізу деяких мутацій. Тест-сис-

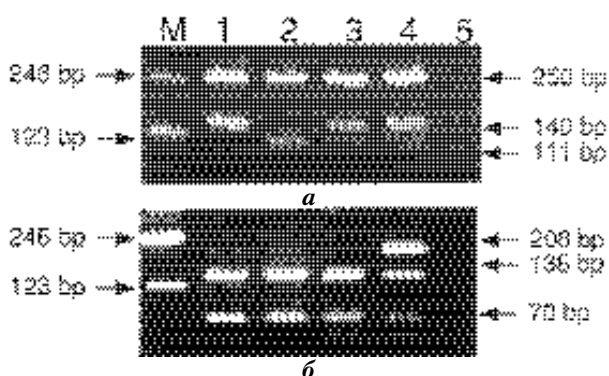


Рис. 2. а) Визначення мутації С282У методом ПЛР/ПДРФ. 2 %-ий агарозний гель. Розчеплення продуктів ПЛР ензимом рестрикції Rsa 1: М – маркер молекулярної маси (Ladder 123 bp); 1 – здоровий індивід; 2 – гомозигота за наявністю мутації; 3–4 – гетерозиготні носії мутації; 5 – негативний контроль ПЛР); б) Визначення мутації Н63D методом ПЛР/ПДРФ. 2 %-ий агарозний гель. Розчеплення продуктів ПЛР ензимом рестрикції Bcl 1: М – маркер молекулярної маси (Ladder 123 bp); 1, 2, 3 – індивіди без мутації; 4 – гетерозиготний носій мутації; 5 – негативний контроль ПЛР

тема може бути використана для уточнення клінічного діагнозу у хворих на гемохроматоз, ідеопатичні панкреатити, гепатити, ци-

роз печінки, цукровий діабет, кардіоміопатії та деякі онкологічні захворювання з метою вибору тактики лікування, а також для виявлення мутантного гена в програмах добровільного генетичного тестування населення.

3. Розроблена тест-система для ідентифікації алелів з кількістю CGG повторів в гені FMR1, що відповідають премутації (~ 50 CGG повторів) та алелів високого ризику, які експануються до розміру премутації за одне покоління (~ 40 CGG повторів). На рис. 3 наведено результати аналізу CGG повторів гена FMR1. Тест-система може бути використана для виявлення гетерозиготних носіїв премутації та алелів "високого ризику" у родичів жіночої статі хворих з синдромом Мартіна-Бела та в програмах добровільного генетичного тестування жіночого населення.

4. Розроблена тест-система для ідентифікації мікрделеції в генах AZFa, AZFb та AZFc (ген DAZ) з використанням ДНК-аналізу в наступних STS локусах: sY84, sY85, USP9Y, sY117, sY124, sY134, sY141, sY153, sY240, sY146, sY254, sY255, sY158 та SRY. На рис. 4 наведено результати аналізу мікрделеції

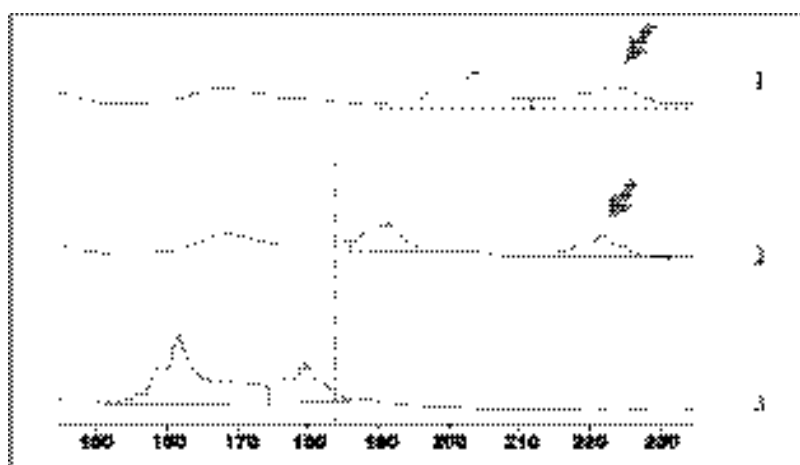


Рис. 3. Тестування жінок на носійство мутації в області CGG-повторів гена FMR1: 1 – індивід з алелями 38 та 45 CGG-повторів (зона ризику), 2 – індивід з алелями 34 та 44 CGG-повторів (зона ризику), 3 – індивід з алелями 24 та 30 CGG-повторів (норма)

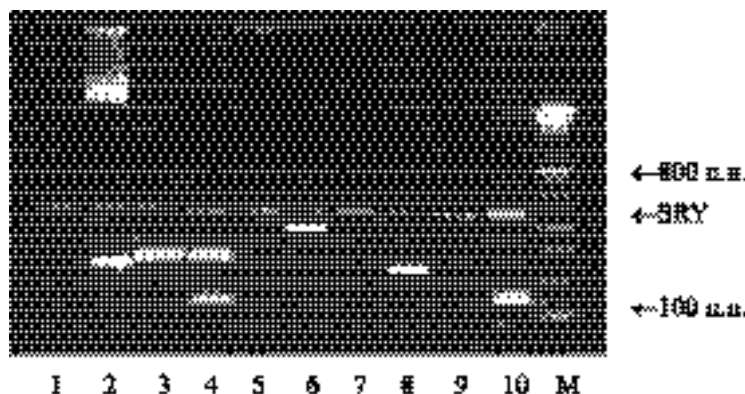


Рис. 4. Електрофореграма. Визначення мутацій мікрodelецій довгого плеча Y-хромосоми (AZFc): 1 – делеція sY158; 2 – відсутність делеції sY158; 3 – делеція sY255 + відсутність делеції sY117 (AZFb); 4 – відсутність делеції sY255 і делеція sY117 (AZFb); 5 – делеція sY254; 6 – відсутність делеції sY254; 7 – делеція sY240; 8 – відсутність делеції sY240; 9 – делеція sY153; 10 – відсутність делеції sY153; M – маркер (Ladder 100 bp)

лецій з області AZFb і AZFc. Тест-система може бути використана для діагностики етіології у чоловіків із необструктивними формами безпліддя. Діагностика цих порушень є важливою для тактики лікування даних форм чоловічого безпліддя з використанням допоміжних репродуктивних технологій, а також необхідна для прогнозу потомства та попередження народження хлопчиків із тяжкими порушеннями сперматогенезу.

Пілотне виробництво тест-систем може бути організовано на базі Інституту молекулярної біології і генетики НАНУ. Масове виробництво для забезпечення потреб всіх регіонів України може бути розпочато за умови створення Центру з проблем молекулярної генетики та генних технологій на базі ІМБіГ НАНУ. Потенціальними інвесторами можуть стати вітчизняні підприємства, які спеціалізуються на випуску біомедичних тест-систем, наприклад, такі як "Стирол Біофарм", "Діапрофмед", БАТ та інші.

Перелік установ, в яких для клінічної діагностики 1100 пацієнтів з муковісцидозом,

синдромом Мартіна-Бела, генетично обумовленими формами чоловічого безпліддя, спадковим гемохроматозом та пов'язаних з ним вторинними патологіями було застосовано розроблені методи ДНК-аналізу: Інститут педіатрії, акушерства та гінекології АМН України, Науковий центр радіаційної медицини АМНУ, Інститут нейрохірургії АНМУ, Інститут медицини праці АМНУ, Інститут очних хвороб і тканинної терапії ім. В. П. Філатова АМНУ, Інститут спадкової патології АМН України (м. Львів), Кримський республіканський центр медичної генетики та репродукції людини (м. Симферополь), Український центр діагностики та лікування муковісцидозу (м. Одеса), Міжобласні медико-генетичні центри: Київський, Донецький, Харківський, Одеський, Криворізький; обласні медико-генетичні консультації: Тернопільська, Рівненська, Полтавська, Хмельницька, Вінницька, Волинська, Івано-Франківська, Чернігівська, Закарпатська, Луганська; клініка "Ісіда-IVF" (м. Київ). За матеріалами розробки проводиться оформлення патентів на винахід.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. **Лівшиць Л. А., Малярчук С. Г., Екшиян О. Ю., Кравченко С. А., Нечипоренко М. В., Пампуха В. М., Бичкова А. М., Михайлець Л. П., Афанасьєва Н. О., Сопко Н. І., Баріляк І. Р.** Генетика і селекція в Україні на межі тисячоліть у чотирьох томах: Молекулярно-генетичні дослідження та ДНК-діагностика найбільш поширених в Україні спадкових захворювань моногенної природи // Київ, Логос, 2001.–т. 4.–С. 604–622.
2. **Лівшиць Л. А., Ясінська О. А.** Роль мікроределцій хромосомної області Yq11 в розвитку необструктивних форм чоловічого безпліддя // Цитологія і генетика.–2002.–т. 36.–№ 5.–С. 73–78.
3. **Пампуха В. М., Розуменко В. Д., Черченко А. П., Лівшиць Л. А.** Аналіз мутацій С282У та Н63D гену спадкового гемохроматозу НFE серед населення України та хворих з гліальними пухлинами мозку // Биополимеры и клетка.–2003.–т. 19.–№ 6.–С. 536–541.
4. **Грищенко Н. В., Малярчук С. Г., Екшиян А. Ю., Бычкова А. М., Лівшиць Л. А.** Аналіз метилювання промоторної області гена FMR1 у больних с синдромом Мартина-Белла из Украины // Цитология и генетика.–2002.–т. 36.–№ 4.–С. 53–56.
5. **Маниатис Т., Фрич Е. Е., Сэмбрук Ж.** Молекулярное клонирование.–М.: Мир, 1985.–420 с.
6. **Kerem B., Rommens J. M., Buchanan J. A. et al.** Identification of the cystic fibrosis gene: genetic analysis // Science.–1989.–v. 245.–P. 1073–1080.
7. **Feder J. N., Gnirke A., Thomas W. et al.** A novel MHC class I-like gene is mutated in patients with hereditary haemochromatosis // Nature Genet.–1996.–13.–P. 399–408.
8. **Webb T. P., Bunday S. E., Thake A. I., Todd J.** Population incidence and segregation ratios in the Martin-Bell syndrome // Am. J. Med. Genet.–1986.–v. 23.–P. 573–580.
9. **Tiepolo L., Zuffardi O.** Localization of factors controlling spermatogenesis in the nonfluorescent portion of the human Y chromosome long arm // Hum. Genet.–1976.–v. 34.–P. 119–124.

## РОЗРОБКА ТЕСТ-СИСТЕМИ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ РН-ЛЕЙКЕМІЙ ЗА ДОПОМОГОЮ ПОЛІМЕРАЗНОЇ ЛАНЦЮГОВОЇ РЕАКЦІЇ

С. С. Малюта, Г. Д. Телегеев, М. В. Дибков, Д. О. Мірошниченко,  
Г. В. Єльська

Інститут молекулярної біології і генетики НАН України, Київ

Надійшла до редакції 08.04.05

**Резюме:** Філадельфійська хромосома – головний маркер розвитку пухлини для більшості пацієнтів з хронічною мієлопроліферативною лейкемією та для значної кількості хворих на гострий лімфобластний лейкоз. Вона обумовлена реципрокною транслокацією між 9 та 22 хромосомами. На молекулярному рівні утворення хромосоми супроводжується утворенням гібридного *bcr/abl*-гена. У даній роботі наведені відомості щодо розробки вітчизняної тест-системи для детекції гібридного гена методом полімеразної ланцюгової реакції. Показано, що використання у системі специфічного поєднання праймерів підвищує вірогідність отриманих результатів.

**Ключові слова:** Ph-позитивна лейкемія, *BCR/ABL*, діагностика, полімеразна ланцюгова реакція (ПЛР).

С. С. Малюта, Г. Д. Телегеев, М. В. Дибков, Д. А. Мірошниченко, А. В. Єльська. РАЗРАБОТКА ТЕСТ-СИСТЕМЫ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ РН-ЛЕЙКЕМИЙ С ПОМОЩЬЮ ПОЛИМЕРАЗНОЙ ЦЕПНОЙ РЕАКЦИИ.

**Резюме:** Филадельфийская хромосома – главный маркер роста опухоли для большинства пациентов с хронической миелоидной лейкемией и острым лимфобластным лейкозом. Она обусловлена реципрокной транслокацией между 9 и 22 хромосомами. На молекулярном уровне образование хромосомы сопровождается образованием гибридного *bcr/abl*-гена. В работе представлены данные о разработке отечественной тест-системы для определения наличия гибридного гена методом полимеразной цепной реакции. Показано, что использование в системе специфического сочетания праймеров позволяет повысить достоверность получаемых результатов.

**Ключевые слова:** Ph-позитивная лейкемия, *BCR/ABL*, диагностика, полимеразная цепная реакция (ПЦР).

S. S. Maliuta, G. D. Telegееv, M. V. Dybkov, D. O. Miroshnychenko, A. V. El'skaya. TEST-SYSTEM DEVELOPMENT FOR PH-LEUKAEMIA DIAGNOSTICS BY POLYMERASE CHAIN REACTION.

**Abstract:** The hallmark of tumor growth for the majority of patient with chronic myelogenous leukemia is Philadelphia chromosome (Ph') – a product of reciprocal translocation of 9 and 22 chromosomes. At the molecular level it is connected with *bcr/abl*-fusion gene. This paper presents data of development of national test-system for detection of hybrid gene with PCR method. It was shown that specific combination of primers used allow to advance a probability to obtain the correct data.

**Keywords:** Ph-positive leukaemia, *BCR/ABL*, diagnostics, PCR.

### 1. ВСТУП

Різного роду лейкемії складають близько 5 % від загальної кількості онкологічних захворювань. Смертність від лімфом та лейкемії становить близько 1,3–1,7 % від загальної, що

складає більше 10 % смертності від онкологічних захворювань.

Методи діагностики лейкозів, що застосовуються в повсякденній практиці, включають використання простих цитологічних критеріїв, таких, як форма та розмір клітин,



Рис. 1, а. Схематичне зображення гена *bcr* та основні ділянки розривів при утворенні химерного гена *bcr/abl*

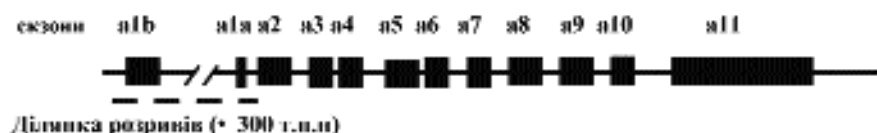


Рис. 1, б. Схематичне зображення гена *abl* та ділянки розривів при утворенні химерного гена *bcr/abl*

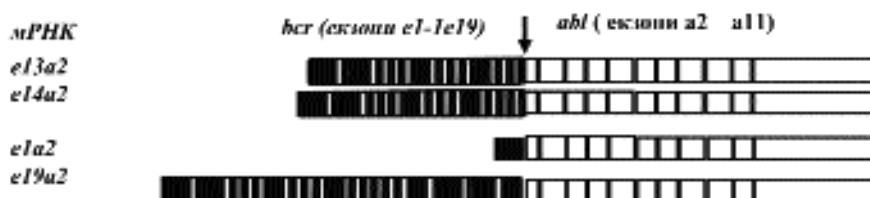


Рис. 1, в. Схематичне зображення основних типів химерних мРНК *bcr/abl*, що утворюються в наслідок розривів в різних ділянках гена *bcr*

характер зернистості цитоплазми, ядерно-цитоплазматичне співвідношення, структура ядра тощо. Ці методи доповнюються також цитохімічними методами (визначення активності кислоти фосфатази, мієлопероксидази, PAS-реакція) [1]. На підставі результатів, що дають ці методи, можна встановити вірогідний діагноз для більшості пацієнтів. Уточнення ж природи конкретного лейкомічного клона вимагає проведення імунофенотипування та цитогенетичного аналізу. Використання моноклональних антитіл, а також імунофлуоресцентних та імуноферментних методів дозволяє більш точно встановлювати рідкісні форми та варіанти лейкозів і, таким чином, застосовувати відповідні методи лікування [2, 3].

Хромосомні транслокації виявляються при більшості неоплазій у людини і головним чином саме вони зумовлюють один чи декілька етапів розвитку пухлини.

У зв'язку з цим результати цитогенетичного аналізу, під час якого виявляють характерні аномалії (транслокації, інверсії, делеції тощо) шляхом диференційного забарвлення хромосом, мають самостійне діагностичне і прогностичне значення [4–6]. Першим подібним маркером росту пухлини була маленька G-забарвлена хромосома, описана в 1960 р. і названа філадельфійською (Ph') [7]. Утворення даної хромосоми обумовлене реципрокною транслокацією між 9 і 22 хромосомами  $t(9;22)(q34;q11)$  [8]. Вона виявляється приблизно у 95 % хворих на хронічну гранулоцитарну лейкомію, а також у 25–30 % дорослих та 2–10 % дітей, хворих на гостру лімфобластну лейкомію (ГЛЛ) [9]. На молекулярному рівні утворення Ph'-хромосоми супроводжується утворенням нового злитого *bcr/abl*-гена (представленого на 5'-кінці ділянкою гена *bcr*, а на 3'-кінці – ділянкою гена *abl* (рис.1) [10]. Як показали чис-

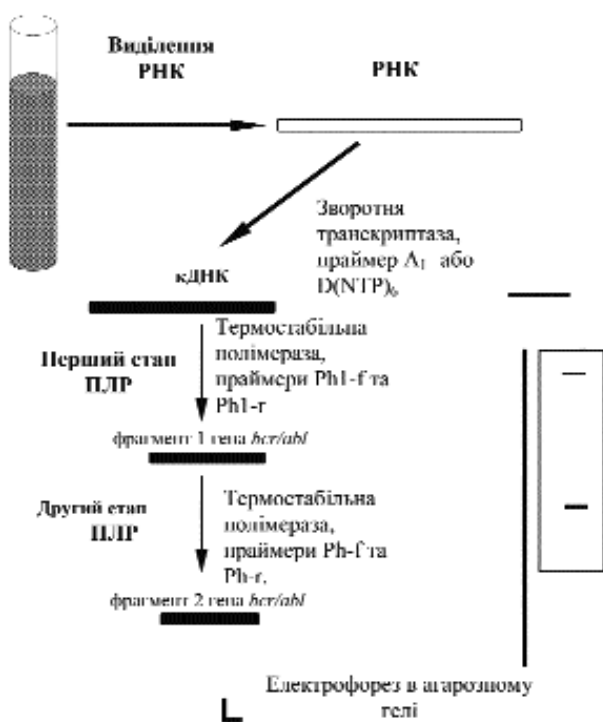


Рис. 2. Схема виявлення гена *bcr/abl* методом ПЛР

ленні експерименти, саме продукт транскрипції гена *bcr/abl* є головним етіологічним моментом у розвитку Ph<sup>+</sup>-лейкемії. Наявність цього гена в клітинах крові та кісткового мозку дозволяє виявляти Ph<sup>+</sup> хромосому методами молекулярної біології.

Сучасні молекулярно-біологічні методи включають використання геномних зондів [11, 12], полімеразної ланцюгової реакції (ПЛР) [13, 14], флуоресценції *in situ* гібридизації (FISH) [15], PCR in cell [16] тощо.

Найбільш простим і чутливим є метод полімеразної ланцюгової реакції.

Тест-системи для діагностики лейкемії, що наразі використовуються в Україні, закуповуються за кордоном. В Україні такі тест-системи не розроблялися. Дана робота присвячена розробці вітчизняної тест-системи для детекції гібридного *bcr/abl*-гена, що є маркером хронічної мієлоїдної лейкемії (ХМЛ) та значної кількості гострих лімфоб-

ластних лейкозів. Створення такої системи є доцільним як з економічних міркувань (значна вартість закордонних аналогів), так і виходячи з отриманих в нашій лабораторії даних щодо високої нестабільності *bcr*- та *abl*-генів, внаслідок чого потрібне використання додаткових праймерів.

В основу запропонованої тест-системи поставлена задача створення такого методу, який би підвищив достовірність діагностики для людей з мієлопроліферативними захворюваннями за рахунок створення умов зменшення негативних моментів полімеразної ланцюгової реакції шляхом врахування нестабільності пухлинного геному.

## 2. КЛІНІЧНІ МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ ДОСЛІДЖЕННЯ

У роботі використовували зразки крові хворих, які проходили лікування у гематологічних клініках м. Києва. На рис. 2 схематично зображені основні етапи виявлення Ph<sup>+</sup>-хромосоми у клітинах крові хворих.

РНК отримували методом, описаним в [17]. Реакційна суміш для синтезу кДНК містила 1–5 мкг РНК, 10 рМ праймера A1 (5'-TGATTATAGCCTAAGACCCGGA-3') (рис. 2 та 3) або розсіяного праймера d(NTP)<sub>6</sub>, 20 одиниць зворотної транскриптази M-MLV (GibcoBRL), 10–20 одиниць РНазіну, 1мМ dNTP та буфер для зворотної транскриптази. Загальний об'єм суміші – 40 мкл. Синтез проводили при 37 °С протягом 1 год. Аліквоти реакційної суміші (5–10 мкл) використовували для проведення ампліфікації. На першому етапі проводили 30 циклів полімеразної ланцюгової реакції з використанням праймерів Ph1-f та Ph1-g в об'ємі 30 мкл (рис. 3) за умов, рекомендованих фірмою-виготовлювачем Taq-полімерази. Температурний режим синтезу був: 94 °С – 18 сек, 55 °С – 18 сек, 72 °С – 1 хв. Далі проводили другий етап ПЛР з використанням

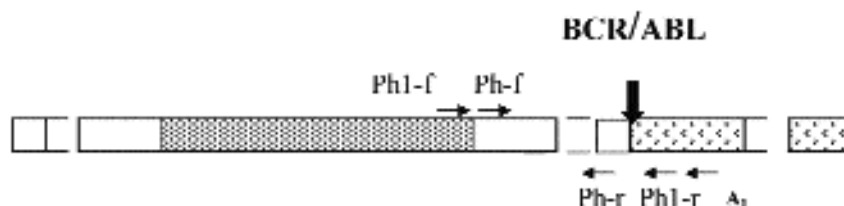


Рис. 3. Схема розміщення праймерів, що використовувались для ампліфікації гібридної ділянки *bcr/abl*

праймерів Ph-f та Ph-r (рис. 3) 94 °С – 24 сек, 58 °С – 18 сек, 72 °С – 1 хв. Продукти ампліфікації аналізували в 1,5 %-ому агарозному гелі.

### 3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Полімеразна ланцюгова реакція використовується для отримання значної кількості певних ділянок молекули ДНК. Це досягається проведенням кількох (до 40) циклів, кожен з яких включає стадії денатурації, відпау та синтезу. На стадії синтезу відбувається копіювання ДНК-ланцюга (на ділянці, обмеженій спеціально підібраними праймерами) термостабільним ферментом.

У нашому випадку напрацьовувалась ділянка гібридного гена *bcr/abl*. У зв'язку з тим, що розрив у генах *bcr* та *abl* відбувається на значних за розміром ділянках, це робить проблематичним застосування ДНК у полімеразній ланцюговій реакції. Тому для діагностики використовують дослідження РНК, яка має значно менший розмір. Нами було перевірено декілька наборів фірм-виробників MoBio, Sigma, Quagene для виділення РНК (табл. 1). Всі ці набори базуються на використанні принципу сорбції-десорбції РНК на колонках.

При використанні цих наборів були помічені такі особливості. Набори вимагають більш точного (аніж за методом Chomczynski та Sacchi) обрахунку кількості клітин крові пацієнтів, оскільки всі вони мають малу ємність, яка, до того ж, різниться для різних

наборів. При її перевищенні відбувається значне забруднення препарату РНК домішками ДНК та білку, а в ряді випадків і повна деградація РНК. На це слід звертати особливу увагу, оскільки кількість клітин крові у пацієнтів, що перевіряються на позитивні Ph-лейкемії, в залежності від стадії захворювання та індивідуальних особливостей може різнитися на кілька порядків. Тому кількість крові необхідно розраховувати для кожного пацієнта індивідуально, виходячи з даних загального аналізу крові.

Наступним етапом було отримання копіюної ДНК (кДНК), яку синтезували за допомогою зворотної транскриптази, використовуючи РНК як матрицю, а праймер A1 - як затравку (або розсіяного праймера d(NTP)<sub>6</sub>) (рис. 2, 3; табл. 1).

Перший етап ПЛР, котрий проводили з використанням праймерів Ph1-f та Ph1-r, не дає такої кількості продукту, котра необхідна

Таблиця 1. Перелік праймерів для виявлення Ph-хромосоми

Назва праймеру	Нуклеотидний склад
A <sub>1</sub>	5-TGATTATAGCCTAAGACCCGGA-3
A <sub>2</sub>	5-TCAGACCCCTGAGGCTCAAAGTC-3
B <sub>1</sub>	5-GAAGTGTTCAGAAAGCTTCCTCC-3
B <sub>1</sub> <sup>1</sup>	5-GGAGCTGCAGATGCTGACCCAAC-3
B <sub>1</sub> <sup>2</sup>	5-CCCATGTTCCTCCGACAAAAGC-3
B <sub>1</sub> <sup>3</sup>	5-ACCATCTGTGGCGCTCCGCCAAGA-3
I <sub>a</sub>	5-ATCTGCCCTGAAGCTGGTGGGCT-3
I <sub>b</sub>	5-CCAGCAGCCCTGGAAAAGTACTT-3

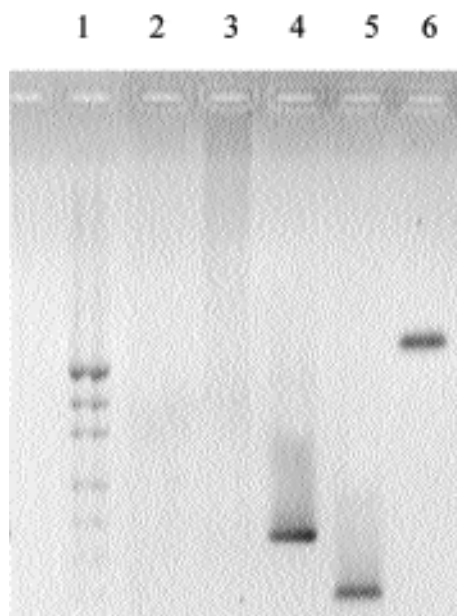


Рис. 4. Електрофореграма продуктів ПЛР, що були отримані при дослідженні крові хворого Н: 1 – маркер молекулярної ваги; 2 – негативний контроль; 3 – продукт ПЛР з використанням стандартного набору (B2-A3); 4, 5 – позитивний контроль -176 п.н., -118 п.н.; 6 – продукт ПЛР з використанням праймерів Ph-f та Ph-r -590 п.н.

для візуального виявлення в агарозному гелі. Тому проводили другий етап ПЛР, використовуючи аліквоту ПЛР продукту з першого етапу та інші (внутрішні) праймери Ph-f та Ph-r (рис. 3). Праймери Ph1-f, Ph1-r, Ph-f та Ph-r були підібрані за допомогою програми GeneRunner. При цьому враховували такі параметри, як довжина праймера, температура плавлення та компліментарність праймерів між собою.

Приведені дані свідчать про високу ефективність ПЛР в діагностиці хворих з невизначеним діагнозом. Використання ПЛР дає змогу виявляти мінімальну кількість патологічних клітин ( $10^{-4}$  –  $10^{-5}$ ), що дуже важливо для ранньої діагностики.

На рис. 4 наведені результати аналізу крові хворого Н. з використанням стандарт-

ного набору праймерів та праймерів, що пропонуються. Як бачимо, використання стандартних праймерів [13, 14] не виявляє гібридного *bcr/abl*-гена (рис. 4, доріжка 3), в той час, як використання Ph-праймерів детектувало наявність такої перебудови. Подальше секвенування гібридної ділянки показало, що стандартний праймер не мав зони комплементарності в гібридному гені.

Таким чином, запропонований метод дає змогу прогнозувати подальший перебіг захворювання, оцінювати цитогенетичну ремісію та ефективність лікування. Використання запропонованого способу з праймерами Ph1-f, Ph1-r, Ph-f, Ph-r дає можливість підвищити достовірність отриманих результатів діагностики у хворих на мієлопроліферативні захворювання шляхом створення умов для зменшення негативних моментів полімеразної ланцюгової реакції, а також врахування факту високої нестабільності пухлинного генома й отримання позитивної ланцюгової реакції при наявності характерної геномної перебудови (*bcr/abl*).

Висока ефективність тест-системи була апробована на більш ніж 150 зразках крові пацієнтів з різних регіонів України з підозрою на ХМЛ.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Бутенко З.А., Глузман Д.Ф., Зак К.П. и др. Цитохимия и электронная микроскопия клеток крови и кроветворных органов // Киев, Наукова Думка, 1974, 244 с.
2. Глузман Д.Ф., Бебешко В.Г., Надгорная В.А. и др. Эмбриональное кроветворение и гемобластозы у детей // Киев, Наукова Думка, 1988, 200 с.
3. Пинчук В.Г., Глузман Д.Ф., Надгорная В.А. и др. Иммуноцитохимические методы и моноклональные антитела в онкогематологии // Киев, Наукова Думка, 1990, 233 с.
4. Boehm, T.H. Rabbits A chromosomal basis of lymphoid malignancy in man // E.J.Biochem, 1989. –V.185, P. 1–17.
5. M.J. Cline The molecular basis of leukemia // The

- New England Journal of Medicine, 1994.–V.330, N5. –P. 328–336.
6. T.H. Rabbitts Chromosomal translocations in human cancer // Nature, 1994.–V.372, N.6502.–P. 143–149.
  7. Nowell PC, Hunderford DA. A minute chromosome in human chronic granulocytic leukemia // Science 1960.–V.132, P. 1497–1499.
  8. Rowley JD. A new consistent chromosomal abnormality in chronic myelogenous leukaemia identified by quinacrine fluorescence and Giemsa staining // Nature.–1973.–V.243, N5405.–P. 290–293.
  9. Телегеев Г.Д., Дыбков М.В., Карпенко О.И., Черепенко Е.И. Молекулярные основы Ph-лейкемии и пути их лечения Биополимеры и клетка 1994; 10(5):78–92.
  10. Gishizky ML. Molecular mechanisms of Bcr-Abl-induced oncogenesis // Cytokines Molular Therapy 1996.–V2, N4.–P. 251–261.
  11. E.M. Southern. Detection of specific sequences among DNA fragments separated by gel electroforesis // J. Mol.Biol.–1975.–V.98, N.3.–P. 503–517.
  12. G.Grosveld, T.Verwoerd, T van Agthoven et al. The chronic myelocytic cell line K 562 contains a breakpoint in bcr and produces a chimeric bcr/c-abl transcript // Molecular and Cellular Biology, 1986.–V.6, N2.–P. 607–616.
  13. E.S.Kawasaki, S.S.Clark, M.Y.Coyne et al. Diagnosis of chronic myeloid and acute lymphocytic leukemias by deletion of leukemia-specific mRNA sequences amplified in vitro // Proc. Natl. Acad. Sci. USA, 1988.–V.85, N15.–P. 5698–5702.
  14. Maurer J., Janssen J., Thiel E., et al. Detection of chimeric BCR-ABL genes in acute lymphoblastic leukemia by the polymerase chain reaction // The Lancet.–1991.–V.337, N 8749.–P. 1055–1058.
  15. Tkachuk D.C., Westbrook C.A., Andreeff M., et al. Detection of bcr-abl fusion in chronic myelogenous leukemia by in situ hybridization // Science.–1990.–V.250, N.4980.–P. 559–562.
  16. N.Testori, G.Martinelli, P.Farabedoli et al. A new method of "in-cell reverse transcriptase-polymerase chain reaction" for detection of BCR/Abl transcripts in chronic myeloid leukemia patients // Blood.–1996.–V.87, N.9.–P. 3884–3892.
  17. Chomczynski P., Sacchi N. Single-step method of RNA isolation by acid guanidinium thiocyanate-phenol-chloroform extraction // Analyt. Biochem.–1987.–V.162.–P. 156–159.

## ПОЛУЧЕНИЕ НАНОДИСПЕРСНЫХ ПОРОШКОВ ДИОКСИДА ЦИРКОНИЯ. ОТ НОВАЦИИ К ИННОВАЦИИ

Т. Е. Константинова, И. А. Даниленко, В. В. Токий, В. А. Глазунова  
Донецкий физико-технический институт НАН Украины, Донецк

Надійшла до редакції 13.05.05

**Резюме:** Исследовано влияние сверхвысокочастотного излучения, импульсного магнитного поля (ИМП) и их комбинаций с ультразвуковой обработкой на процесс химического синтеза нанопорошков легированного диоксида циркония. Исследования проводились при непосредственном контроле на различных этапах получения порошка его структуры, свойств и фазового состава. Показано, что существенное влияние на дисперсность порошка диоксида циркония оказывает структура и размер агломератов гидроксида циркония. Образующаяся при обработке СВЧ-полем и сушке в ИМП более рыхлая структура агломерата легче разрушается под действием ультразвуковых колебаний. Получаемые нанопоршки диоксида циркония с заданным размером частиц в диапазоне 5–20 нм и удельной поверхностью 40–140 м<sup>2</sup>/г могут использоваться для получения конструкционной, инструментальной и функциональной биокерамики, сорбентов и катализаторов.

**Ключевые слова:** нанотехнология, пилотное производство оксидных нанопорошков, СВЧ, ИМП, ультразвук, нанодиагностика, керамика.

Т. Є. Константінова, І. А. Даніленко, В. В. Токий, В. О. Глазунова. ОТРИМАННЯ НАНОДИСПЕРСНИХ ПОРОШКІВ ДВООКСИДУ ЦИРКОНІЮ. ВІД НОВАЦІЇ ДО ІННОВАЦІЇ.

**Резюме:** Досліджено вплив надвисокочастотного випромінювання, імпульсного магнітного поля (ІМП) та їх комбінацій з ультразвуковою обробкою на процес хімічного синтезу нанопорошків легированого двооксиду цирконію. Дослідження проводилися при безпосередньому контролі на різних етапах отримання порошку його структури, властивостей і фазового складу. Показано, що істотний вплив на дисперсність порошку двооксиду цирконію має структура і розмір агломератів гідроксиду цирконію. Більш рихла структура агломерату, що утворюється під час обробки НВЧ-полем та сушіння в ІМП, легше руйнується під дією на неї ультразвукових коливань. Отримані нанопоршки двооксиду цирконію із заданим розміром часток у діапазоні 5–20 нм та питомою поверхнею 40–140 м<sup>2</sup>/г можуть використовуватись для отримання конструкційної, інструментальної та функціональної біокераміки, сорбентів та каталізаторів.

**Ключові слова:** нанотехнологія, пільне виробництво оксидних нанопорошків, НВЧ, ІМП, ультразвук, нанодіагностика, кераміка.

T. Ye. Konstantinova, I. A. Danilenko, V. V. Tokiy, V. A. Glazunova. OBTAINING OF NANODISPERSED POWDERS OF ZIRKONIA. FROM NOVATION TO INNOVATION.

**Abstract:** Influence of MW radiation, pulse magnetic field and their combinations with ultrasonic processing on process of chemical synthesis zirconia nanopowder with the direct control of their structure, properties and influence of phase structure at various stages of reception of a powder is investigated. It is shown, that essential influence on dispersiveness of a zirconia powder is rendered by structure and the size of agglomerates zirconium hydroxide. Formed at processing by the MICROWAVE field and drying in PMF more friable structure of agglomerate collapses at action on it of ultrasonic fluctuations more easy. Received zirconia nanopowder with the set size of particles in a range 5–20 nanometers and a specific surface 40–140 m<sup>2</sup>/g, can be used for reception constructional, tool, functional and bioceramics, sorbents and catalysts.

**Keywords:** nanotechnology, pilot production of oxide nanopowders, MW, PMF, ultrasound, nanodiagnostics, ceramics.

## **1. ВВЕДЕНИЕ**

Достижения в получении наноматериалов различного назначения в наибольшей степени определяются уровнем развития технологий, которые позволяют получать наноструктуры необходимых конфигураций и размеров, а также совершенством методов диагностики свойств наноматериалов, включая контроль в процессе изготовления и управление на его основе технологическими процессами. По многим прогнозам именно развитие нанотехнологий определит облик XXI века, подобно тому, как открытие атомной энергии, изобретение лазера, транзистора и компьютера определили облик XX столетия. В настоящее время наноматериаловедение – это весьма обширная область, включающая в себя целый ряд направлений физики, химии, биологии, электроники, медицины и других наук.

В настоящее время многие страны стремятся занять лидирующее положение в области нанотехнологий. Примерно треть мировых инвестиций в эту область согласно отчета Business Communications [1] приходится на долю США. Большую долю финансов тратят в этом направлении Япония, Германия и другие ведущие страны мира.

Оксидные нанопорошки уже широко используются в производстве за рубежом. Проведенный нами маркетинговый анализ сегмента рынка керамических нанопорошков на основе диоксидов циркония и титана [2] показал, что потенциальные потребители на региональном и мировом рынках это: производства топливных элементов с керамическим оксидным электролитом (SOFC); технической, огнеупорной, конструкционной и биокерамики; абразивных материалов и лакокрасочной продукции; пластмасс и пленочных материалов; медицинской продукции и косметики; ювелирных изделий и т. п.

Наличие большого числа операторов (как производителей, так и дистрибьюторов) на

рынке объясняется тем, что продукт востребован потребителем в различных формах и с различными характеристиками. Сегментацию продукта на данном рынке необходимо проводить соответственно его техническим характеристикам, значения которых непосредственно влияют на формирование цен. Выделим наиболее важные характеристики продукции из нанопорошков: а) размер частиц; б) удельная поверхность; в) чистота продукта (имеется в виду наличие в химическом составе оксидных порошков попутных оксидов – алюминия, железа, кальция, кремния; для оксида циркония важно также присутствие гафния); г) фазовый состав; д) стабилизация. (Порошки диоксида циркония классифицируются по степени их стабилизации иттрием, скандием и некоторыми другими металлами).

Согласно данному сегментированию уровень ценообразования для описываемого продукта устанавливается по следующему принципу: чем меньше размер частиц, больше удельная поверхность и меньше сопутствующих химических элементов (либо их соединений), тем выше цена.

В результате анализа выявлен ряд предприятий, являющихся операторами в исследуемом сегменте рынка: в США – MTI Corporation (шт. Калифорния); Nanostructured & Amorphouse Materials, Inc. (шт. Нью-Мексико); NGimat Co., NanoEngineered Materials (шт. Джорджия); Fuel Cell Materials (шт. Огайо); TAL Materials, Ltd., Inframat Advanced Materials, Nanotechnologies, Inc. (шт. Мичиган); в Германии – Kerafol GmbH, PlasmaChem; в Австралии – ANT Corporation; в Японии – Tosoh Corporation.

По сравнению с прошлым годом число организаций, предлагающих на мировом рынке нанопорошки диоксидов циркония и титана, заметно увеличилось. Данные организации стали более активно проводить поиск потенциальных потребителей и осуществлять рекламную деятельность.

Среди материалов, привлекающих в настоящее время внимание ученых и практиков, особое место занимают оксидные нанопорошки на основе диоксида циркония [1]. Этот давно известный огнеупорный материал после освоения метода выращивания крупных монокристаллов – фианитов – стал интересовать также и ювелиров как заменитель алмаза. А исследование свойств наномасштабных частиц этого материала выявили новые привлекательные качества и заставили засверкать его новыми гранями.

Диоксид циркония обладает уникальным сочетанием разнородных свойств: высокой прочностью; трещиностойкостью и износостойкостью; термостойкостью; химической устойчивостью и стабильностью к излучениям, в том числе и к нейтронному потоку; ионной проводимостью; биологической совместимостью и т. д. Это определяет его широкое применение в различных отраслях промышленности и позволяет ожидать необычных эффектов в свойствах материалов на его основе при переходе к наноструктурному состоянию. Однако от красивой идеи до ее реального воплощения, как правило, проходит длительный период, необходимый для решения многих проблем: разработки технологий получения новых материалов, их аттестации, финансирования необходимых исследований и производственного освоения.

Слово “новация” (лат. *novatio*) означает обновление, возникновение нового. А *novatio* с приставкой *in* (в) – это термин, означающий развитие путем вложения в новацию (инвестирование новации), вложение новых знаний в производство новых продуктов.

Это достаточно тривиальное пояснение мы решили привести здесь потому, что именно на такой основе был осуществлен проект, финансируемый НАН Украины “Разработка технологии и организация пилотного производства керамических нанопорошков из украинского сырья для технического и медицин-

ского применения” и выполнявшийся коллективом авторов ДонФТИ НАН Украины.

## **2. ПРОБЛЕМЫ**

Вопросы получения, изучения свойств и использования наноразмерных материалов в последнее время широко обсуждаются в мировой литературе, поскольку перспективы их применения обещают существенный прогресс в материаловедении и в физике твердого тела вообще [4]. Так, в области оксидной керамики снижение размеров частиц исходного порошка от микро- до нанометров позволяет не только повысить плотность и улучшить механические характеристики керамических материалов, но и существенно изменить их физические свойства. Последнее обусловлено тем, что при переходе от макро- и микро- к нанометровому диапазону размеров частиц твердых тел (менее 100 нм или 0,1 мкм) свойства веществ существенно изменяются. При этом изменения затрагивают основные характеристики твердого тела – параметр решетки, электронную структуру, температуры плавления и фазовых превращений, температуры Дебая и Кюри, скорость диффузии и химических реакций.

Среди множества создаваемых наноструктурных материалов особо выделяются системы слабосвязанных частиц, которые могут иметь самостоятельное применение в виде порошков или использоваться в производстве пленок и монокристаллических материалов. Необычные свойства нанопорошков обусловлены как особенностями строения отдельных частиц, включая большую долю поверхности, так и коллективным их поведением, свойственным лишь таким малым объектам.

Анализ научно-технической информации по проблеме получения оксидных нанопорошков [3] показывает, что эта проблема в мировой практике решается самыми разнообразными технологическими методами

(раздельно и в комбинациях). Наиболее распространенными из них являются: метод осаждения (соосаждения) из растворов солей; гидротермальный метод; распылительный пиролиз; золь–гель процесс с использованием алкоксидов и промышленно выпускаемых прекурсоров; аэрозольный метод; метод получения порошков при обработке исходных материалов в факеле пламени; плазмохимический метод; лазерный синтез; химические газофазные методы конденсации; механические методы и др.

Особенно эффективен метод химического осаждения. Основные его преимущества перед другими – низкая себестоимость продукции и возможность получения порошков заданного состава в промышленных масштабах. Однако наряду с преимуществами этот метод имеет и существенный недостаток – порошки, получаемые таким способом, имеют высокую степень агрегации и агломерации продуктов осаждения и прокаливания осадков, а также широкий спектр размеров как первичных частиц, так и агломерированных. Другими словами, этот метод, в его классическом варианте, не позволяет получать неагломерированные порошки с наноразмерными частицами. Причина заключается в высокой степени межчастичного взаимодействия, характерной для гидрогелей, связанной с явлением, называемым синерезисом [5], и приводящей к сжатию (гр. *synairesis* – сжатие) отдельных участков с формированием крупных стеклообразоагломератов во всем объеме осадка (рис. 1, слева).

Явление синерезиса часто встречается как в природных, так и в техногенных процессах. Все многообразие минеральных образований, возникающих из коллоидных растворов, проходит стадию синерезиса, свидетельством чему являются характерный внешний вид и микроструктура этих образований, как показано на рис. 1 (слева). Самопроизвольное сжатие студней, сопровождаю-

щаяся отделением жидкости, лежит в основе технологии получения резины, пластмасс, сыров, творога, хлеба и др. Однако если в перечисленных процессах синерезис – благо, то в химической технологии получения нанодисперсных материалов – препятствие, преодоление которого является одной из трудных задач нанотехнологии. Традиционное решение этой проблемы для химической технологии – использование на заключительных стадиях высокоэнергетического размола шарами или в планетарных мельницах (как и любой другой способ получения мелких порошков из систем более крупных частиц).

### 3. НОВАЦИЯ

Особенностью экспериментальных исследований, проводившихся в ДонФТИ НАН Украины в последнее десятилетие, было то, что к решению любой из поставленных задач привлекался широкий спектр методик, методов и приемов [6–8]. Так, для выявления общих закономерностей фазообразования, формирования структур и становления свойств материалов оксидных систем в процессе синтеза изучалось поведение системы



Рис. 1. Порошки гидроксида циркония, полученные по традиционной технологии (слева) и по разработанной в ДонФТИ НАНУ (справа)



**Рис. 2. Участок физических воздействий линии пилотного производства нанопорошков**

не только на конечных, но и на промежуточных стадиях, причем как под влиянием традиционных термодинамических параметров: температуры и высокого гидростатического давления (ВГД), так и при таких воздействиях, как ультразвук (УЗ), СВЧ-нагрев, импульсное магнитное поле (ИМП), и ряд других.

Используемый нами технологический процесс получения порошка диоксида циркония, основанный на методе химического осаждения, включает три основные стадии:

- получение гелеобразного осадка гидроксида циркония  $Zr(OH)_4 \cdot nH_2O$  в результате взаимодействия азотно-кислых солей циркония с водным раствором аммиака;
- обезвоживание осадка и дегидроксилизация (удаление OH-групп) гидроксида циркония нагревом до температур 120–350 °С с превращением гидроксида в аморфный  $ZrO_2$ ;
- кристаллизация частиц  $ZrO_2$  при температуре 400–800 °С.

Установлено, что размер будущих кристаллических частиц  $ZrO_2$  закладывается уже в гелеобразном осадке гидроксида в результате полимеризации, а также в процессе суш-

ки осадка и дегидроксилизации гидроксида циркония, когда вследствие синерезиса возникают наиболее жесткие агломераты, превращающиеся впоследствии в крупные кристаллические частицы. Поэтому предотвращение или хотя бы минимизация указанных явлений – это важнейшее звено в химической технологии получения наноразмерных порошков вообще и диоксида циркония в частности.

Этот вывод не новый. С целью предупреждения или снижения степени агрегирования и агломерирования частиц в осадке издавна применяются поверхностно-активные вещества (ПАВ), а также электролиты. Эти вещества, добавленные в раствор реагирующих солей, способны адсорбироваться на поверхности выпадающих в осадок частиц и снижать их взаимодействие: в одном случае за счет снижения поверхностной энергии частиц, а в другом за счет создания на их поверхности одноименных зарядов. Однако результат применения этих методов не всегда прогнозируем, особенно в тех случаях, когда осадки подвергаются термообработке. Более радикальным способом предупреждения агрегации частиц и возникновения жестких агломератов является, по нашим данным, применение импульсно-волновых воздействий: СВЧ-нагрева и ИМП в процессе сушки и прокаливания осадков гидроксида, а также их ультразвуковой обработки (рис. 2).

В результате систематических многоплановых и в определенной мере нетрадиционных исследований удалось выявить ряд зависимостей, позволивших наметить пути управления процессом синтеза, которые обеспечили бы возможность получения материалов с наперед заданными характеристиками, в частности нанокристаллических материалов на основе циркония и титана. Проведенные научно-исследовательские работы позволили установить кинетику кристаллизации гидроксида циркония, вероятные меха-

низмы роста наночастиц в различных температурных интервалах, а также найти возможность управления характеристиками порошков с помощью импульсно-волновых воздействий на определенных стадиях технологического процесса. С применением методов ИК-спектроскопии и ядерного магнитного резонанса (ЯМР) были изучены процессы дегидрогенизации гидроксида циркония. Выявлены закономерности следующих процессов: влияния размера и пористости агрегата гидроксида циркония на размер кристаллизующейся частицы оксида циркония; изменения формы и уменьшения размера частиц оксида циркония при прокаливании; уменьшения размера частиц при повышении концентрации оксида иттрия. Установлено, что вероятным механизмом образования и роста частиц оксида циркония на ранних стадиях кристаллизации является коллективная кристаллизация группы аморфных частиц.

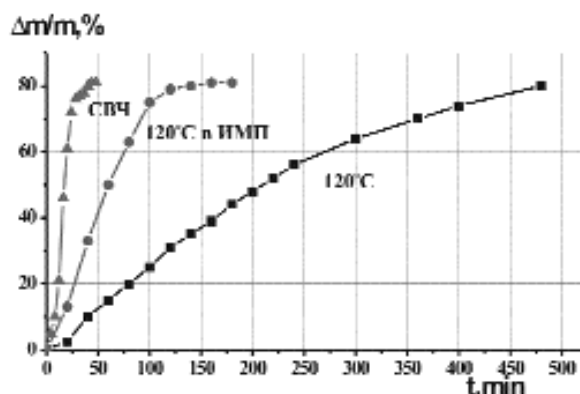
Одной из основных задач при разработке данной технологии являлось управление характеристиками выпускаемого продукта с помощью импульсно-волновых воздействий. Подавляющее большинство физических явлений на наномасштабном уровне обусловлено волновой природой частиц (электронов и т. д.), поведение которых подчиняется законам квантовой механики. Нами было проведено компьютерное моделирование электронной структуры наночастиц [9, 10] и оценена энергия активации процессов дегидратации и дегидрогенизации [11]. Описана кинетика кристаллизации гидроксида циркония в зависимости от вида воздействий. Детально изучено влияние воздействий СВЧ, ИМП и УЗ на процесс синтеза порошков диоксида циркония с непосредственным контролем на различных технологических этапах получения их структуры, фазового состава и механических свойств. Отработаны режимы термической обработки. Изучены механизмы дегидратации обводненного гидро-

ксида циркония при конвекционной и СВЧ-сушке (рис. 3). Определены оптимальные режимы импульсно-волновых воздействий на выпускаемые порошки для достижения свойств, максимально удовлетворяющих потребителя.

Эти результаты и стали той новацией, которая легла в основу научно-технического инновационного проекта НАН Украины на 2004 г. "Разработка технологии и организации пилотного производства керамических нанопорошков из украинского сырья для технического и медицинского применения".

#### **4. ИННОВАЦИОННЫЙ ПРОЕКТ**

Успех работы определился, фактически, решением двух основных проблем: разработкой новых надежных способов создания нанопорошковых материалов с требуемыми свойствами и развитием существующих методов нанодиагностики с атомным разрешением. Однако успешное выполнение работы было бы невозможным без выделения НАН Украины финансирования на отработку технологических процессов, которое академия осуществила для победителей конкурса инновационных проектов, среди которых оказался и наш.



**Рис. 3.** Влияние импульсно-волновых воздействий на кинетику процесса сушки

Развитие всевозможных методов диагностики (в частности, диагностики, встроенной в технологию), учитывающих специфику нанообъектов и их характерные размеры, является неотъемлемой частью развития высоких технологий получения наноматериалов нового поколения и анализа их свойств.

Выполнение задания потребовало разработки новых и усовершенствования уже существующих диагностических методов (рис. 4), а также модернизации оборудования для получения наноматериалов и анализа их свойств и процессов в них.

Предотвращение агломерации ультрадисперсных порошков в процессах получения и спекания было нашей главной задачей. Мно-

го внимания уделялось способам получения наноразмерных однородных порошков с формой, близкой к дискообразной (рис. 5), и с узким интервалом распределения по размерам частиц (рис. 6).

Была организована многофункциональная линия пилотного производства керамических нанопорошков из украинского сырья (рис. 7) с размерами частиц от 5 до 50 нм, удельной поверхностью в диапазоне 50–200 м<sup>2</sup>/г, высоким уровнем монодисперсности и мягкими агломератами. Линия может легко перестраиваться на выпуск широкого спектра химических и фазовых составов порошков и обеспечивать выпуск продукции до 10 кг в месяц. Опытные партии уже получены.

Разработана технология получения высококачественных керамических нанопорошков методом совместного осаждения с использованием СВЧ, ИМП и УЗ на определенных стадиях технологического процесса для управления характеристиками наносистем. Проведена корректировка и оптимизация технологических условий получения порошков с учетом масштабного фактора при увеличении объема синтезируемой продукции. Согласно результатам патентных иссле-



Рис. 4. Электронная микроскопия – необходимый элемент нанодиагностики

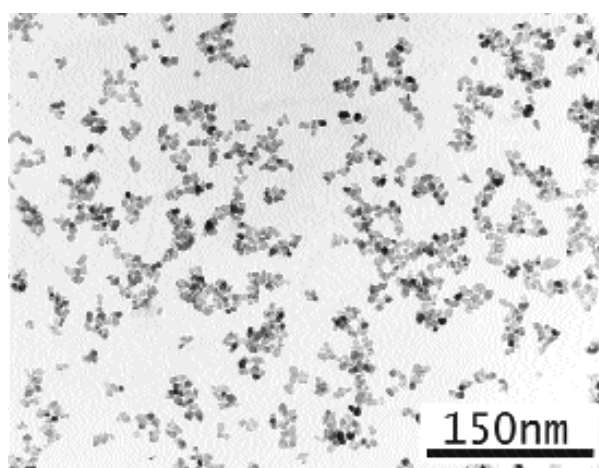


Рис. 5. Наноразмерные кристаллиты диоксида циркония (просвечивающая электронная микроскопия)

дований технологія не має аналогів ні в Україні, ні за рубежом.

Для оптимізації виробництва розроблена і створена модульна система, що складається з взаємопов'язаних секторів маркетингу, проектування, хімічного методу (включаючи частини підготовки сировини, осадження і фільтрації), фізичного методу обробки гелів (включаючи частини фізичних методів, термічної, дроблення і фасувки) і, нарешті, аналітичного сектора і сектора техніки безпеки.

Підготовлені приміщення в відповідності з вимогами до хімічної лабораторії; придбано і модернізовано обладнання для синтезу, обробки і тестування нанопорошків і проміжних продуктів; здійснені монтаж і налагодка технологічної лінії синтезу і обробки нанопорошків.

Були удосконалені методики атестації і підготовки сировини, тестування порошкових наносистем і проміжних продуктів технологічної ланки пілоного виробництва з допомогою рентгенофазового аналізу, просвічуючої електронної мікроскопії, визначення уділь-

ної поверхності по методу Брунауєра, Еммета і Теллера (БЭТ), ІК-спектроскопії, ЕПР-спектроскопії, гранулометричного і хімічного аналізу.

Ітак, сьогодні поряд з дослідницькими роботами нам необхідно проводити пошук і налагоджувати зв'язок з потенційними споживачами (в тому числі і з дистрибуторськими організаціями) для виконання продажі зразків і подальшого відслідковування ситуації на світовому ринку нанопорошків, особливо враховуючи, що ціна останніх на 30–40 % вище ціни пропонованого нами пілоного виробництва. Тільки таким чином дозволить в подальшому повністю забезпечити керамічними нанопорошками ринок України і експортувати їх в країни ближнього і дальнього зарубіжжя.

## **5. ПЕРСПЕКТИВИ ПРИМЕНЕННЯ КЕРАМІЧЕСКИХ НАНОПОРОШКОВ**

Для забезпечення широкого впровадження інноваційних нанотехнологій, в частині нанопорошків, необхідно удосконалювати вже існуючі технології, засновані

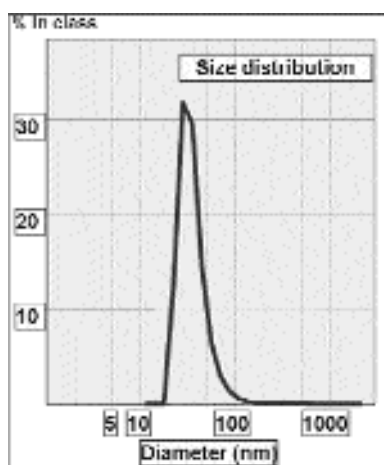


Рис. 6. Розподіл частинок діоксида цирконію за розміром



Рис. 7. Хімічний сектор лінії пілоного виробництва нанопорошків

на использовании промышленных порошков, а также разрабатывать принципиально новые. Нами получены первые результаты по разработке новых технологий изготовления различных изделий с использованием нанопорошков (образцы представлены на рис. 8) по следующим направлениям:

- а) разработка технологии ультразвукового перемешивания при изготовлении толстых пленок;
- б) разработка технологии изготовления гофрированных керамических пластин для SOFC;
- в) получение пористых электродов;
- г) получение керамического инструмента с высокой износостойкостью (плунжеры, рассекатели, фильеры);
- д) снижение температуры спекания за счет введения нанопорошков в промышленные порошки более крупных размеров или иных химических составов;
- е) изготовление керамических деталей протезов и челюстных накладок.

В качестве примера рассмотрим эффект снижения температуры спекания за счет введения нанопорошков в промышленные образцы. На основе  $Al_2O_3$  создано много высококачественных материалов. При условии



Рис. 8. Керамические изделия из нанопорошков

удачного подбора модифицирующих добавок в каждом конкретном случае можно получить уникальное сочетание свойств, а именно: высокую механическую прочность, твердость, износостойкость, огнеупорность, химическую стойкость. Очень важно реализовать задачу – получить высокую плотность и износостойкость, снизив при этом температуру спекания.

При использовании компактирования нанопорошков  $ZrO_2 + 3 \text{ mol } \% Y_2O_3$  в условиях высокого гидростатического давления (ВД) удается снизить температуру спекания керамики до  $1350^\circ C$ . Полученная керамика имеет плотность  $5,9\text{--}6,0 \text{ г/см}^3$ , размер зерна  $0,2\text{--}0,3 \text{ мкм}$ , прочность на изгиб  $1000 \text{ МПа}$  и коэффициент вязкости разрушения  $9\text{--}11 \text{ МПа}\cdot\text{м}^{1/2}$ .

Использование нанопорошков при спекании керамики на основе обычного химически чистого  $Al_2O_3$  позволяет снизить температуру спекания на  $150^\circ C$ . Подобные материалы могут широко применяться в тех областях, где необходимы высокие показатели износостойкости, плотности, твердости, прочности при изгибе, стойкости к коррозии изделий. На данном этапе необходим еще ряд экспериментов по отработке этого метода на конкретных материалах и для конкретных изделий, а также оптимальный подбор пластификаторов, связующих, диспергаторов, форм и режимов формования и обжига для соответствующих изделий.

Использование современных конструкционных материалов обычно ограничивается тем, что увеличение прочности приводит к снижению пластичности. Уменьшение структурных элементов и более глубокое изучение физики деформационных процессов, которые определяют пластичность нанокомпозитных материалов, могут привести к созданию новых материалов, сочетающих высокие прочность и пластичность. Первые результаты на этом пути уже получены.

Нанопорошки на основе диоксида циркония, обладающие уникальным сочетанием свойств, находят широкое применение в различных отраслях производства: ядерной энергетике, металлургии, угольной и химической промышленности, авиационно-космической технике, электронике и медицине.

Структура керамики на основе  $ZrO_2$ , полученной из нанопорошков, обеспечивает высокую стойкость изделий при работе в агрессивных средах. Так, срок работы плунжеров шахтных насосов, изготовленных из порошков, полученных по разработанной в ДонФТИ НАН Украины технологии, уже в десять раз превысил время эксплуатации плунжеров из легированной стали. Испытания этих изделий продолжаются. Положительный результат обусловлен именно применением новой технологии получения нанопорошков, поскольку она обеспечивает одинаковый размер зерен, однородность распределения легирующих элементов и высокую стабильность фазового состава в керамическом изделии, в отличие от керамики, изготовленной из более крупных и неоднородных порошков.

В последние годы резко возрос интерес к диоксиду циркония в связи с проблемами энергетической безопасности многих государств, в том числе Украины. Решение этих

проблем требует поиска новых альтернативных источников энергии. Уже сейчас в ведущих странах мира создаются топливные элементы с керамическим оксидным электролитом (SOFC) из диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия. Эти элементы позволяют непосредственно превращать химическую энергию топлива в электрическую с коэффициентом эффективности 50–60 % (рис. 9). Главные проблемы, которые предстоит решить для развития этого вида энергетике – это повышение срока службы и эффективности работы, снижение рабочей температуры и стоимости энергетических устройств на основе топливных ячеек. В ближайшие годы планируемые инвестиции США и стран НАТО в эту область науки и техники составят 3 млрд долларов в год, а рынок продуктов нанотехнологий оценивается в США в 30–50 млрд долларов в год.

Одной из последних возможностей применения нанопорошков диоксида циркония есть повышение ионной проводимости нанокерамики, обусловленной зернограничной составляющей (рис. 10) [12]. Известные в этой области фирмы США и Европы (Westinghouse, Siemens, NexTech) начинают

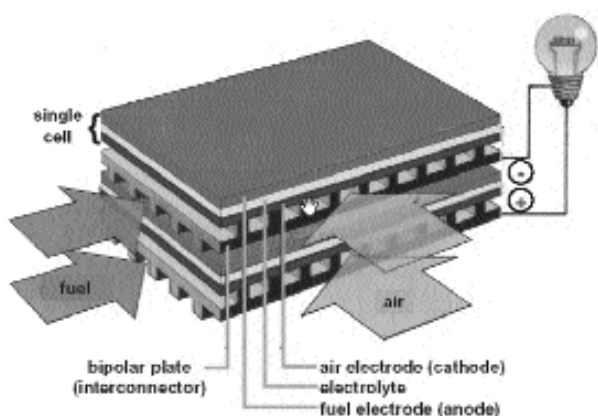


Рис. 9. Топливный элемент с керамическим оксидным электролитом (схема)

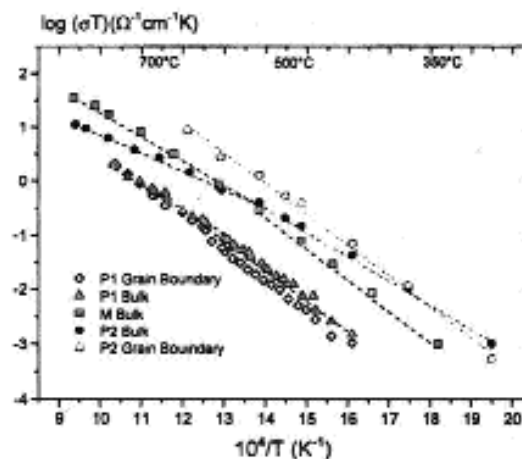


Рис. 10. Сравнение ионной проводимости монокристаллического (M), поликристаллического (P1 – 9 мол %  $Y_2O_3$ ,  $D = 0,9$  мкм) и нанокристаллического (P2 – 4 мол %  $Y_2O_3$ ,  $D = 0,03$  мкм) диоксида циркония

внедрять в производство нанопорошки диоксида циркония и ведут поиск новых составов.

Использование стабилизированных нанопорошков, производимых по технологии ДонФТИ НАН Украины, может дать целый ряд преимуществ для SOFC, а именно:

- повышение ионной проводимости электролита;
- увеличение каталитической способности анода и катода;
- уменьшение поляризационных потерь на интерфейсе катод-электролит;
- снижение температуры спекания;
- гомогенность распределения легирующих добавок;
- однородность распределения микронапряжений и повышение механических свойств при перепаде температур и прохождении газа через электроды;
- возможность формировать очень тонкие пленки (10–15 мкм).

Проблемы получения, исследования и применения нанопорошков и нанокомпозитов на основе диоксида циркония возникли лишь несколько лет назад и многие вопросы, связанные с получением и спеканием порошков, формированием их структуры при термическом, механическом и электромагнитном воздействиях, а также поведением их в условиях высокого гидростатического давления, еще мало изучены.

Еще одна область применения, в которой нанопорошки имеют большое преимущество, связана с получением и очисткой химических веществ. Нанопорошок диоксида циркония хорошо проявляет себя как селективный адсорбент и носитель ряда катализаторов, а также как ионообменник с регулируемыми сорбционными свойствами. Так, например, с применением  $ZrO_2$  связан бурно развивающийся новый каталитический процесс изомеризации нормальных парафинов, позволяющий повышать октановое число бензинов

без ароматических соединений. Для этой цели разработаны новые активные суперкислотные катализаторы типа  $SO_4^{2-} / ZrO_2$ .

Экспериментально проверено, что основные технологические приемы, используемые для получения диоксидциркониевых порошков, могут с успехом применяться и в случае других оксидных порошков, в частности  $TiO_2$ , для фотокатализаторов и пигментов, а также для  $LaMnO_3$  для катодов SOFC и сенсоров.

Развитие технологии получения нанопорошков даст возможность Украине начать широкое их использование в различных областях промышленности. В энергетике – это топливные элементы, ионные химические источники тока, мембраны для солнечных батарей, покрытия деталей турбин, пар трения; в химической промышленности – детали химического оборудования, носители катализаторов, сорбенты, краски, покрытия; в металлургии – газовые датчики кислорода, распылители; в электронике – фильтры и лезвийный инструмент для оптоволокна, сенсоры, датчики влажности, пьезоэлементы; в машиностроении – режущий инструмент, фильтры и нанокомпозитные материалы; в медицине – протезы, фильтры-ионнообменники, ингаляторы, скальпели.

Предложенная нами технология получения нанопорошков в числе других наукоемких технологий поможет Украине снизить зависимость от импорта и поднять экономический потенциал на уровень ведущих стран мира.

Все, что достигнуто в настоящее время в исследовании свойств и особенностей оксидных наносистем, лишь малая часть того, что еще предстоит сделать. Необходимо осмыслить и объяснить полученные результаты, предсказать и обнаружить новые интересные явления, создать новые технологии и использовать материалы с уникальными свойствами, для чего, безусловно, необходимо объединение усилий различных творческих групп.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Abraham Tomas.** A BCC, Inc. // High Tech Ceramics News.–2003.–v. **15**.–№1.
2. Розробка технології та організація пілотного виробництва керамічних нанопорошків з української сировини для технічного та медичного застосування // Отчет НИР: 101 стр., 25 рис., 11 табл., 43 ссылки.
3. **Константинова Т. Е., Даниленко И. А., Токій В. В. и др.** Нанопорошки на основе диоксида циркония: получение, исследование, применение // Наносистемы, наноматериалы, нанотехнології –2004.–т. **2**.–вип. 2.–Академперіодика (Київ).–С. 609–632.
4. **Андрієвський Р. А., Рагуля А. В.** Наноструктурные материалы.–Академия, 2005, 187 с.
5. **Думанський А. В.** Учение о коллоидах.–М., 1948, 415 с.
6. **Savosta M. M., Krivoruchko V. N., Danilenko I. A., Tarenkov V. Yu., Konstantinova T. E., Borodin A. V., Varyukhin V. N.** Nuclear spin dynamics and magnetic structure of nanosized particles of  $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$  // Phys. Rev B.–2004.–**69**.–p. 024413.
7. **Konstantinova T., Danilenko I., Dobrikov A., Volkova G., Tokiy V., Gorban S.** TEM, ESR and XRD studies of thermally induced formation of nanocrystalline zirconia // Advances in Science and Technology / ed. Vincenzini P.–Techna Srl (ISBN 88-86538-32-4).–2003.–**30**.–P. 187–194.
8. **Konstantinova T. E., Danilenko I. A., Pilipenko N. P., Volkova G.** Nanomaterials for SOFC electrolytes and anodes on the base of zirconia // Electrochem. Soc. Proc.–2003.–v. **2003-07**.–P. 153–159.
9. **Tokiy N., Konstantinova T., Savina D., Tokiy V.** Computational modeling of electron properties of 26 d-elements in nanolayer Y-doped tetragonal zirconia // Advances in Science and Technology / ed. Vincenzini P.–Techna Srl (ISBN 88-86538-38-3).–2003.–**36**.–P. 121–128.
10. **Tokiy N. V., Konstantinova T. E., Tokiy V. V., Savina D. L.** Influence of oxygen vacancies and 26 d-impurity on electronic and transport properties of zirconia // Electrochem. Soc. Proc.–2003.–v. **2003-07**.–P. 181–186.
11. **Tokiy N. V., Konstantinova T. Ye., Savina D. L., Tokiy V. V.** Modeling of degyhydration and dehydrogenation in pure and Ba-, Ca-, Sr- or Y-modified Zirconia nanolayer // Hydrogen Materials Science and Chemistry of Carbon Nanomaterials / eds. Veziroglu T. N. et al.–Kluwer Academic Publishers, Netherlands.–2004.–P. 291–298.
12. **Cheikh A., Madani A., Touari A. et al.** Ionic Conductivity of Zirconia Based Ceramics from Single Crystals to Nanostructured Polycrystals // J. Europ. Ceram. Soc.–2001.–v. **21**.– P. 1837–1841.

## **ОПЫТ СОЗДАНИЯ И ПРИМЕНЕНИЯ МЕТАЛЛО-ТРИТИЕВЫХ СТРУКТУР**

**И. Н. Вишневский, Н. Ф. Коломиец, А. В. Коваленко**

*Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев*

*Надійшла до редакції 04.04.05*

---

**Резюме:** В работе представлены общие сведения о научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах по созданию и применению металло-тритиевых структур, выполненных в Институте ядерных исследований (ИЯИ) НАН Украины. Приведены результаты этих работ, выполнявшихся в соответствии с инновационным проектом по программе "Научно-технические инновационные проекты НАН Украины" (п.19). В результате соответствующих работ был создан радиоизотопный нейтрализатор статического электричества на основе трития, который предназначен для устранения вредного действия электростатических зарядов, возникающих при переработке сильно электризуемых материалов. Применение нейтрализаторов позволяет устранить нарушения технологического процесса (залипание материалов, их распушивание, засветку фотоматериалов и т. п.) и повысить безопасность труда (исключение связанной с искрообразованием возможности пожаров и взрывов, снижение до безопасного уровня величины электростатических полей и т. п.).

**Ключевые слова:** тритий, металл, электростатика, нейтрализатор.

### **I. М. Вишневський, М. Ф. Коломієць, О. В. Коваленко. ДОСВІД СТВОРЕННЯ Й ЗАСТОСУВАННЯ МЕТАЛО-ТРИТІЄВЫХ СТРУКТУР**

**Резюме:** У роботі наведені загальні відомості про науково-дослідні й дослідно-конструкторські роботи по створенню й застосуванню метало-тритієвих структур, виконані в Інституті ядерних досліджень (ІЯД) НАН України. Представлені результати цих робіт, виконуваних у відповідності з інноваційним проектом за програмою "Науково-технічні інноваційні проекти НАН України" (п.19). У результаті відповідних робіт був створений радіоізотопний нейтралізатор статичної електрики на основі тритію, призначений для усунення шкідливої дії електростатичних зарядів, які виникають при переробці матеріалів, що сильно електризуються. Застосування нейтралізаторів дає змогу уникнути порушень технологічного процесу (злипання матеріалів, їх розпушування, засвітлення фотоматеріалів і т.ін.) і підвищити безпеку праці (запобігання пов'язаної з искроутворенням можливості пожеж і вибухів, зниження до безпечного рівня величини електростатичних полів і т. ін.).

**Ключові слова:** тритій, метал, електростатика, нейтралізатор.

### **I. M. Vyshnevskiy, N. F. Kolomiets, A. V. Kovalenko. METAL TRITIUM STRUCTURES APPLICATIONS AND THE CREATION EXPERIENCE.**

**Abstract:** General information on scientific and research, experimental and design work concerning the creation and application of metal tritium structures, performed at the Institute for Nuclear Research of NASU is given. The results of these works completed in accordance with the innovation projects referring the program Scientific Technical Innovation Projects at the National Academy of Sciences in Ukraine (item 19). The radioisotope neutralization of static electricity based on tritium is designed for the elimination of the electrostatic charges disutility manifestation, emerged under the highly electrifiable material processing. The application of the neutralizers allow to exclude the interruption of the technological process (material sealing, its crushing, light-striking of the photo materials) and also to increase the industrial safety (excluding spark formation, fires, explosions, decrease to the safety level the value of the electrostatic fields).

**Keywords:** tritium, metal, static electricity, neutralization.

Тритий является удобным изотопом водорода не только для получения термоядерной ДТ-реакции в ускорителях заряженных частиц или в термоядерных реакторах, но и в тех случаях, когда необходимо получить стабильные во времени низкоэнергетические потоки электронов и рентгеновых излучений. Это обусловлено тем, что тритий имеет высокую удельную активность, а в соединении с некоторыми металлами (например, с титаном в тритиде титана) его концентрация на три порядка выше, чем в газообразном состоянии. Гидриды (тритиды) многих металлов являются твердыми устойчивыми соединениями в диапазоне температур вплоть до 400 °С. Кроме того, тритий является чистым бета-излучателем, причем благодаря низкой проникающей способности бета-частиц трития (максимум 6 мм в воздухе, а в среднем – 0,9 мм) отпадает необходимость применять различные защитные экраны, что является неоспоримым преимуществом.

В Институте ядерных исследований НАН Украины был проведен цикл научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, обобщенных в монографии [1], направленных на создание и применение на практике металло-трیتیевых структур.

Металло-трیتیєвая структура представляет собой тонкую пленку гидридообразующего металла (например, скандия, титана, циркония, эрбия и т. п.), насыщенную тритием (активный слой). Пленка нанесена на конструкционную подложку, из материала, инертного к водороду (медь, молибден, железо, алюминий и т. п.)

Активный слой наносится на подложку в вакууме при давлении не более  $5 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст. методом электронно-лучевого или термоионного испарения металла [2]. Образованную таким образом пленку гидридообразующего металла насыщают тритием методом прямого гидрирования при давлении 50–250 мм рт. ст. и соответствующей температуре

гидридообразования в диапазоне 400–650 °С, получая при этом тонкую пленку тритида металла нестехиометрического состава (не более 90 % стехиометрии). При более высокой степени насыщения пленки тритием возможно разрушение и осыпание активного слоя.

Технологические установки для насыщения пленки тритием представляют собой усовершенствованный аппарат Сивертса [3]. Эти установки оснащены устройствами для очистки газовых выбросов от трития, принцип действия которых основан на каталитическом окислении трития и последующей сорбции его окиси на цеолите. Циркуляционные насосы позволяют многократно прокачивать газовую смесь через устройства очистки, что увеличивает эффективность последних. Исследования показали, что количество выбрасываемого в окружающую среду трития удалось уменьшить на два порядка [4].

В окружающей среде вблизи места производства трития значение его концентрации значительно меньше допустимого уровня, при этом концентрация уменьшается с увеличением расстояния от тритиевой лаборатории [5].

Нами обнаружено, что десорбция трития из металло-трیتیєвых структур определяется, в основном, коррозионными процессами на их поверхности, поэтому для уменьшения ее скорости предложено наносить защитное покрытие активного слоя [1]. Наилучшие результаты получены при использовании защитных покрытий из монооксида кремния, причем это покрытие толщиной 700–1000 Å снижает скорость десорбции у свежих изготовленных (например, титановых) образцов до величины  $10^{-12}$  Ки·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>, а со временем скорость десорбции еще уменьшается. Последнее обстоятельство послужило предпосылкой для создания источников бета-излучения на основе трития, которые в обычных производственных условиях можно применять в различных ионизационных приборах [6].

Источники бета-излучения на основе трития типа БИТр-М (ТУ У 05540132.015-97) представляют собой подложку из молибдена, нержавеющей стали или кварца, на которую нанесен слой титана, насыщенного тритием до атомарного отношения  $1,8 \pm 0,05$ , и защитного покрытия из монооксида кремния толщиной  $700-1000 \text{ \AA}$ . Титановое покрытие на единицу площади не превышает в источниках  $0,25 \text{ мг}\cdot\text{см}^{-2}$ . При этом его толщина соответствует пробегу бета-электронов трития со средней энергией, и является оптимальной.

Защитное SiO покрытие наносят методом термической сублимации из твердой фазы в одном технологическом цикле с нанесением титана. А насыщение титана проводят описанным выше методом через слой монооксида кремния. При этом тритий свободно проникает через защитное покрытие. Вместе с тем оно является своеобразным барьером для более крупных молекул воздуха и поэтому существенно снижает возможность коррозии на поверхности слоя тритида титана. После операции насыщения источники подвергаются тщательной дезактивации с использованием моющих препаратов для удаления нефиксированной загрязненности их тритием.

Полученные таким образом источники имеют ионизационный ток, создаваемый бета-излучением трития, не менее  $1,36 \cdot 10^{-8} \text{ А}\cdot\text{см}^{-2}$ , скорость десорбции трития не более  $5,6 \cdot 10^{-13} \text{ Ки}\cdot\text{см}^{-2}\cdot\text{с}^{-1}$ , поверхностную загрязненность тритием не более  $5 \cdot 10^{-8} \text{ Ки}\cdot\text{см}^{-2}$ . Они допущены органами саннадзора для применения.

В рамках инновационного проекта "Разработка и производство радиационных установок и технологий (пастеризаторов, стерилизаторов, изотопных нейтрализаторов, анализаторов, озонаторов) для промышленных и медицинских нужд" по программе "Научно-технические инновационные проекты

НАН Украины" в Институте ядерных исследований НАН Украины были выполнены научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы под общим названием "Разработка и внедрение радиоизотопных нейтрализаторов статического электричества для производства полимерных и других диэлектрических материалов". В результате этих работ были созданы нейтрализаторы статического электричества на основе трития, которые можно практически неограниченно применять для устранения вредного действия электростатических зарядов, возникающих при переработке сильно электризующихся материалов. Применение нейтрализаторов позволяет устранить нарушения технологического процесса (залипание материалов, их распушивание, засветку фотоматериалов и т. п.) и повысить безопасность труда (исключение связанной с искрообразованием возможности пожаров и взрывов, снижение до безопасного уровня величины электростатических полей и т. п.).

Нейтрализатор НТСЭ представляет собой пенал, в который помещены платы с укрепленными на них источниками бета-излучения на основе трития типа БИТр-М (ТУ У 05540132.015-97). Пенал закрыт предохранительной сеткой. Длина нейтрализатора должна соответствовать ширине перерабатываемого материала.

Принцип действия нейтрализаторов заключается в ионизации воздуха бета-электронами, излучаемыми источниками. А ионы воздуха взаимодействуют далее с зарядами наэлектризованного материала противоположной полярности. Ионизационный ток, создаваемый БИТр-М, составляет  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ А}/\text{см}^2$ .

Нейтрализатор устанавливают в непосредственной близости от электризующегося материала (1-3 см), а ионизационный ток поддерживается за счет поля электростатического заряда.

В тритиевой лаборатории ИЯИ НАНУ возможна разработка нейтрализаторов, удовлетворяющих специальным требованиям заказчика.

Срок службы нейтрализаторов – не менее 8 лет.

В заключение следует отметить, что в ИЯИ НАН Украины имеется возможность существенно расширить ассортимент приборов для различных функциональных применений, создаваемых на основе трития, Концентрация соответствующего технологического и научного оборудования и высокая квалификация специалистов дает возможность усовершенствования технологии и качества изделий на основе трития.

#### **ЛИТЕРАТУРА**

1. Ключников А.А., Коломиец Н.Ф., Минчук Г.Я., Червинский В.Н. Принципы построения и применения металло-тритиевых структур // К.: Наукова думка, 1992, 215 с.
2. Sayenko V.A., Kolomiets N.F., Mashtalir N.N. On new type of the vacuum arc in anode vapours with a non-spent cathode. XVI Int. Conf on Phenomena in Ionized Gases Contributed Papers, Editors: N.Botticher, H.Wenk, E.Shulz-Gulote, Dusseldorf, 1983, №2, p.262–263.
3. Sieverts A., Z.Metallk., 1929, v.21, p. 37–44.
4. Voitenko V.A., Kolomiets N.F., Rogosin V.N. An Experience of use of the Installation for the cleaning of Gas effluents from tritium. Intern. Conf. on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation Contributed Papers, Editors: D.Alexandre, R.Baker, R.Kohout, J.Marek, Praha, 1993, v.1, p. 383–385.
5. Koval G.N., Kuzmina A.I., Kolomiets N.F. The results of observations of the tritium concentration in water fractions in the disposition regions of tritium laboratories // Fus. Techn., vol. 28, num. 3, part 1, 1995. p. 899–904.
6. Kolomiets N.F. Manufacture and use of metal-tritium products // Fus. Techn., vol. 28, num. 3, part 2, 1995. p. 1605–1608.

# **РЕСУРСОЗБЕРІГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА НАНОКРИСТАЛІЧНИХ ПРЕЦИЗІЙНИХ МАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ ЯК СКЛАДОВА ІННОВАЦІЙНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНОЇ ГАЛУЗЕЙ ПРОМИСЛОВОСТІ УКРАЇНИ**

**А. П. Шпак, В. В. Маслов, В. К. Носенко**

*Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України, Київ*

*Надійшла до редакції 25.04.05*

---

**Резюме:** Описані результати виконання Інститутом металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАНУ інноваційного проекту по розробці технології одержання магнітом'яких нанокристалічних стрічкових сплавів на основі заліза шляхом надшвидкого охолодження розплаву, а також виготовлення з них магнітопроводів з високою температурно-часовою стабільністю магнітних властивостей. Наведені приклади впровадження розроблених нанокристалічних магнітопроводів в таких галузях промисловості країни, як енергетика, електротехніка, приладобудування та розглянуті перспективи їх широкомасштабного застосування.

**Ключові слова:** інновація, нанокристалічні сплави, магнітопроводи, магнітні властивості, ресурсозберігаюча технологія, енергетика, електротехніка, приладобудування.

**А. П. Шпак, В. В. Маслов, В. К. Носенко. РЕСУРСОСОХРАНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПРЕЦИЗИОННЫХ МАГНИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ КАК СОСТАВНАЯ ИННОВАЦИОННОГО РАЗВИТИЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ ОТРАСЛЕЙ УКРАИНЫ.**

**Резюме:** Описаны результаты выполнения Институтом металлофизики им. Г. В. Курдюмова НАНУ инновационного проекта по разработке технологии получения магнитомягких нанокристаллических ленточных сплавов на основе железа путем сверхбыстрого охлаждения расплава, а также изготовления из них магнітопроводов с высокой температурно-временной стабильностью магнітних свойств. Приведены примеры внедрения разработанных нанокристаллических магнітопроводов в таких отраслях промышленности страны, как энергетика, електротехніка, приборостроение и рассмотрены перспективы их широкомасштабного применения.

**Ключевые слова:** инновация, нанокристаллические сплавы, магнітопроводи, магнітні свойства, ресурсосохраняющая технология, энергетика, електротехніка, приборостроение.

**A. P. Shpak, V. V. Maslov, V. K. Nosenko. RESOURCE-SAVING PRODUCTION TECHNOLOGIES OF NANOCRYSTALLINE PRECISION MAGNETIC MATERIALS AS COMPONENT OF INNOVATION DEVELOPMENT OF POWER AND ELECTRIC ENGINEERING BRANCHES OF INDUSTRY OF UKRAINE.**

**Abstract:** Results of execution in the G. V. Kurdyumov Institute for Metal Physics of the innovation project on development and processing of the soft magnetic nanocrystalline ribbon iron based alloys by rapid melt quenching as well as of the technology for making the magnetic cores with high time and temperature

stability of the magnetic properties are considered. The examples are listed and the prospects are described for the broad application of the developed nanocrystalline magnetic cores in such branches of industry of Ukraine as power engineering, electrical engineering, device-making.

**Keywords:** innovation, nanocrystalline alloys, magnetic cores, magnetic properties, resource-saving technology, power engineering, electrical engineering, device-making.

### 1. ПРО ДЕЯКІ ПРОБЛЕМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ УКРАЇНИ

Галузь електроенергетики України – це високорозвинений комплекс по виробництву, розподілу та збуту електричної енергії. Сумарна встановлена потужність електростанцій України складає близько 60 000 000 кВт. Основна частка (близько 60 %) в структурі виробничих потужностей припадає на теплові електростанції (ТЕС) і близько 30 % – на гідроелектростанції (ГЕС). В останні 15 років основне зростання генеруючих потужностей в енергосистемі України забезпечувалось за рахунок атомної енергетики, що призвело до згорання розвитку теплоенергетики та власної паливної бази. Були істотно скорочені обсяги фінансування та ресурсного забезпечення реконструкції електростанцій. Довготривала експлуатація ТЕС і ГЕС без достатнього поповнення основних виробничих фондів призвели до значного зносу основного та допоміжного обладнання.

Передача та розподіл виробленої електроенергії здійснюється через розгалужену мережу ліній електропередач усіх рівнів напруги. Висока централізація виробництва електроенергії на великих електростанціях визначила розвиток в Україні потужних міжсистемних зв'язків та мереж з напругою від 330 до 750 кВ, довжина яких складає близько 20 000 км. На сьогодні в Україні експлуатується більше одного 1 000 000 км ліній електропередач всіх класів напруги (80 % з них складають розподільчі з напругою від 0,4 до 10 кВ) та близько 195 000 мегаватних трансформаторних потужностей (підстанцій). Значна части-

на мереж та трансформаторів фізично та морально застаріла. Подальший розвиток електромереж передбачає створення нових конструкцій, більш надійних та екологічно безпечних, та забезпечення умов проведення ремонтних робіт під напругою. Модернізації та оновлення потребують електрообладнання, системи автоматики і безпеки (зокрема, обладнання для релейного захисту у високовольтних (ВВ) мережах) та ведення обліку електроспоживання. Для забезпечення національної енергетичної безпеки розробка нових технологій, виготовлення сучасних матеріалів та електротехнічного обладнання повинні проводитися в Україні.

Енергоємність валового національного продукту України на 30–40 % вища, ніж в промислово розвинених країнах; а енергоємність галузей, пов'язаних з виробництвом матеріалів, порівняно з цими ж країнами вища в 2–3 рази. Значною мірою це пов'язано з великим обсягом енергозатратних виробництв у важкій промисловості та низьким ККД споживання енергії в технологічних процесах.

Значних зусиль потребує налагодження системи моніторингу та обліку споживання електроенергії, особливо в найбільш затратних галузях промисловості та побутовій сфері. Технічна досконалість систем комплексної автоматизації електроенергетичних об'єктів – розподільчих пристроїв електростанцій, високовольтних підстанцій енергосистем і споживачів електроенергії є одним із вирішальних чинників ефективного та надійного функціонування електроенергетичної галузі України [1].

В останні роки комерційний облік електроенергії з використанням вимірювальних трансформаторів струму (ТС) в розподільчих мережах енергосистем напругою 0,4 кВ та у споживачів проводився на основі використання однофазних двообмоточних ТС класу 0,5 та індукційних триелементних електрорічильників класу 2,0. В результаті використання застарілих матеріалів в осердях ТС та старої конструкції індукційних лічильників в процесі експлуатації їх похибка зростає до 10–15 % (від'ємна похибка індукційного лічильника збільшується на 1–1,5 % щорічно). Такий енергооблік за умов спаду та значних коливань навантаження споживачів вирізняється великою похибкою, що призводить до недообліку електроенергії та росту комерційних втрат. За різними оцінками, їх частка становить 25–30 % усіх комерційних втрат. Виходом із цієї ситуації є відмова від виробництва всіх без винятку індукційних лічильників другого класу, заміна їх на електронні, а також заміна ТС класу 1,0 та 0,5 на вимірювальні трансформатори класу 0,5S; 0,2 або 0,2S, які використовуються в західних країнах і забезпечують значно менші похибки в широкому діапазоні вимірювання первинного струму.

У сучасних електронних лічильників повна споживана потужність мережею струму не перевищує 0,1–0,5 Вт, що в 4–10 разів менше, ніж у індукційних [2]. Тому заміна індукційних лічильників електронними у всіх випадках покращує режим роботи вимірювальних ТС. З переходом до використання в комерційному обліку електронних (мікропроцесорних) лічильників знижуються вимоги до номінального навантаження ТС: його можна обмежити величиною 5 Вт (у ТС для обліку з індукційними лічильниками воно складає 10–20 Вт та більше), що в кінцевому результаті зменшує технічні втрати електроенергії на приладний облік. Нескладні розрахунки [2] свідчать, що при встановленні в

енергосистемі 100 000 сучасних ТС економія потужності на кожному лише в 10 Вт дасть сумарну економію електроенергії в 1 МВт, а річна економія електроенергії складе 8760 МВт·год і в грошовому еквіваленті становитиме \$350 000 при реальній її вартості \$0,04 за 1 кВт·год.

З огляду на стан проблеми Закон України про енергозбереження передбачає, зокрема, якнайшвидше вирішення проблем створення та впровадження нових енергозберігаючих технологій та виготовлення сучасних новітніх матеріалів електротехнічного та електронного призначення для потреб вітчизняної енергетики та приладобудування відповідного профілю.

Безперечно, вирішення всіх проблем перебудови галузі електроенергетики України можливе лише за умови використання найсучасніших наукових розробок інноваційного характеру, до яких можна віднести і високопродуктивну технологію отримання матеріалів з унікальними магнітними, механічними та хімічними властивостями шляхом надшвидкого охолодження розплаву (НШОР). Впровадження цієї технології в промисловість держава фінансово підтримала в минулому році.

## **2. НШОР – ЯКІСНО НОВА ТЕХНОЛОГІЯ У СУЧАСНОМУ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВІ**

### **2.1. Технологія НШОР як засіб отримання металевих сплавів з особливими структурними станами та фізико-хімічними властивостями**

Методи гартування з рідкого стану (надшвидкого охолодження розплавів із швидкостями  $10^5$ – $10^7$  К/с) стали найбільш перспективними методами отримання матеріалів з особливими властивостями. Технології, що

базуються на цих методах, дають змогу в екстремально нерівноважних умовах твердіння реалізувати особливі (аж до аморфного) структурні і фазові стани, які забезпечують таким швидкозагартованим сплавам унікальне поєднання високих характеристик міцності, а також електричних, магнітних, корозійних та інших властивостей, що неможливо при використанні традиційних металургійних технологій.

Пріоритет у цій новій галузі, яка активно розвивається впродовж двох останніх десятиріч і напрочуд вдало об'єднує фундаментальні дослідження в області фізики конденсованого стану з ефективними матеріалознавчими і технологічними розробками, належить українським і американським вченим. Тут не можна не згадати професора І. С. Мірошниченка, який у 50-х рр. минулого століття одним з перших у світі розпочав діяльність по створенню методик надшвидкого охолодження розплавів (НШОР) та отриманню з наступним всебічним систематичним дослідженням швидкозагартованих матеріалів, випередивши на цілий рік публікацією в 1959 р. (ж-л "Заводська лабораторія") публікацію американського професора П. Дувеза ("J. Appl. Phys." [3, 4]). Завдяки цим піонерським роботам швидкозагартовані аморфні та мікрокристалічні сплави (трохи пізніше до них приєдналися і нанокристалічні) виділились в новий самостійний клас матеріалів, а монографія І. С. Мірошниченка "Гартування з рідкого стану" [5] і тепер не втратила своєї значимості для вчених і фахівців в цій області досліджень і розробок.

У випадку кристалічних сплавів використання методів НШОР призводить до істотного зниження хімічної сегрегації; зменшення розмірів зерен у продуктах гартування до величини менше 1 мкм вже у вихідному литому стані (одержати такий розмір і сьогодні є досить серйозною проблемою для існуючих технологій литва та подальших операцій пе-

реробки); істотного збільшення меж взаємної розчинності компонентів сплавів; появи нових метастабільних фаз; значних морфологічних змін у структурі тощо. Перераховані ефекти в сукупності надають інструментальним і конструкційним сталям різного призначення, жароміцним нікелевим суперсплавам, припоям, висококремністим електротехнічним сталям і сплавам (часто крихким при отриманні їх за традиційними технологіями), а також іншим мікрокристалічним матеріалам властивостей, продиктованих вимогами сучасної техніки і технології [6].

Щодо аморфних металевих сплавів (АМС), то їх утворення є результатом екстремально нерівноважного твердіння розплаву з формуванням, незалежно від концентрації компонентів, однофазної системи з відсутністю трансляційної симетрії в розташуванні атомів і з високим ступенем структурної однорідності. В АМС відсутні такі характерні для кристалічних сплавів дефекти, як вакансії і дислокації, межі зерен, двійники і дефекти упаковки, а також різного роду сегрегації, ліквіація і інші джерела фазової та структурної неоднорідності. Саме це надає аморфним сплавам унікального поєднання фізико-хімічних та механічних властивостей.

У лабораторній та виробничій практиці використовуються найрізноманітніші методи НШОР, які дозволяють одержувати швидкозагартовані сплави у вигляді стрічок, фольги, тонкого листа, проволоки, мікродропу, гранул, порошків, покриттів і ін. (досить докладний огляд цих методів зроблений нами в [7]). Найпоширенішим серед них завдяки високій продуктивності є так званий метод спінінгування розплаву [8, 9], коли розплавлений у тиглі метал під надлишковим тиском ежектується через сопло певної форми на зовнішню поверхню диска-охолоджувача, що обертається з лінійною швидкістю до 40 м/с. При цьому утворюється стрічка, як це показано на рис. 1. Товщина її для

більшості аморфних сплавів не перевищує 50–60 мкм, а ширина може бути більшою 1 м при належному технічному рівні гартувального устаткування.

**2.2. Стан досліджень та розробок у галузі створення нових матеріалів та їх отримання з використанням технології НШОР**

Систематичні дослідження та розробки, пов'язані із використанням швидкісної заправки з рідкого стану для одержання аморфних, нано- та мікрокристалічних сплавів в Інституті металофізики НАН України було розпочато за ініціативи академіка В. В. Немошкаленка більш як 20 років тому. Створена за цей час експериментально-технологічна база по одержанню швидкозагартованих сплавів методом спінінгування розплаву сьогодні не має аналогів у країні. Проведені в Інституті розробки та всебічні дослідження дали можливість встановити взаємозв'язок між умовами одержання швидкозагартованих стрічок сплавів різного типу та їх якістю (однорідність стрічок по товщині, стан поверхонь та бокових кромки, шорсткість тощо), яка зумовлює особливості структурного стану стрічок та безпосередньо пов'язана з

рівнем і відтворюваністю їх фізико-хімічних властивостей. Були виявлені нові закономірності та механізми утворення і росту кристалів у аморфних сплавах, завдяки чому було знайдено нові шляхи впливу керованого легування на рівень їх термічної стійкості та фізико-хімічних властивостей. Віднайдені при цьому технічні та технологічні рішення захищені авторськими свідоцтвами (на час СРСР) та патентами України.

В останні роки в Інституті активного розвитку набув якісно новий напрямок в матеріалознавстві сучасних прецизійних матеріалів – магнітом'яких нанокристалічних сплавів на основі заліза (до 80 %) типу Finemet (базова система FeSiBCuNb, [10]). Унікальні магнітні властивості цих сплавів зумовлені співвідношенням (~ 1 : 3) аморфної та нанокристалічної фаз  $\alpha$ -Fe(Si), що формується при частковій контрольованій кристалізації вихідних аморфних стрічок зі сплавів певного хімічного складу. Зазначимо, що наразі нанокристалічні сплави з розмірами зерен 10–20 нм можна одержувати і безпосередньо з розплаву, а це дає підстави вважати технологію НШОР основною складовою групи нанотехнологій в металургійній галузі, зокрема мікрометалургії. В порівнянні з кристалічними магнітом'якими преци-

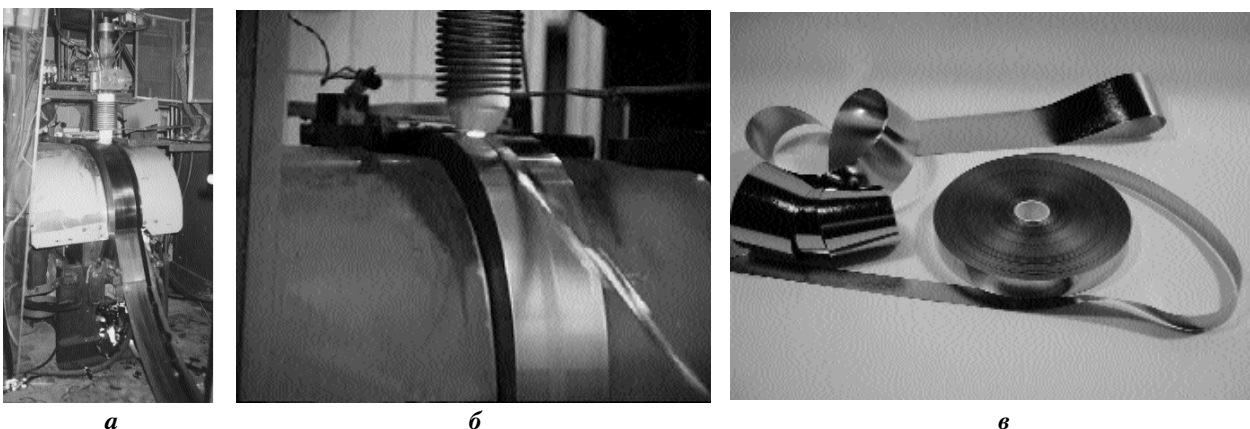


Рис. 1. Загальний вигляд установки для гартування розплаву (а), процес одержання (б) та вигляд (в) аморфної стрічки

зійними сплавами, які використовуються в електро- та радіотехніці, електроніці, приладобудуванні (а це провідні для України галузі сучасної техніки та технології) і (за винятком деяких марок феритів) традиційно імпортуються в Україну, нанокристалічні сплави типу Finemet вдало поєднують більш високий рівень властивостей з меншою вартістю.

Готовність Інституту до подальшої активної участі в розробці цього якісно нового і важливого для країни напрямку в сучасному матеріалознавстві з метою створення нових конкурентноздатних нанокристалічних сплавів та до пошуку додаткових резервів підвищення їх властивостей значною мірою зумовили такі фактори, як наявність кваліфікованих кадрів у галузі досліджень та розробки аморфних сплавів, а також необхідної експериментально-технологічної бази з НШОР. Її складовими є плавильне устаткування різної потужності для приготування вихідних сплавів, термічне обладнання для проведення термообробок аморфних стрічок у широкому температурному діапазоні, а також необхідне гартувальне устаткування. На рис. 2 показана автоматизована гартувальна установка закритого типу з комп'ютерною реєстрацією основних параметрів гартування (швидкість обертання диска, зміна тиску ежектування в процесі виливу розплаву та зміна його температури тощо) та наявністю зворотного зв'язку, що дає можливість підтримувати ці параметри в ході швидкоплинного процесу на заданому програмою рівні і тим самим одержувати зразки для досліджень в ретельно контрольованих умовах. Важливо, що це обладнання продуктивністю до 0,5 кг/цикл (разовий вилив) дає можливість одержувати в захисній атмосфері (гелій, аргон, вуглекислий газ) якісні аморфні та нанокристалічні стрічки сплавів, що містять активні компоненти. Крім того, гартувальне обладнання з продуктивністю до 3 кг/цикл (процес здій-

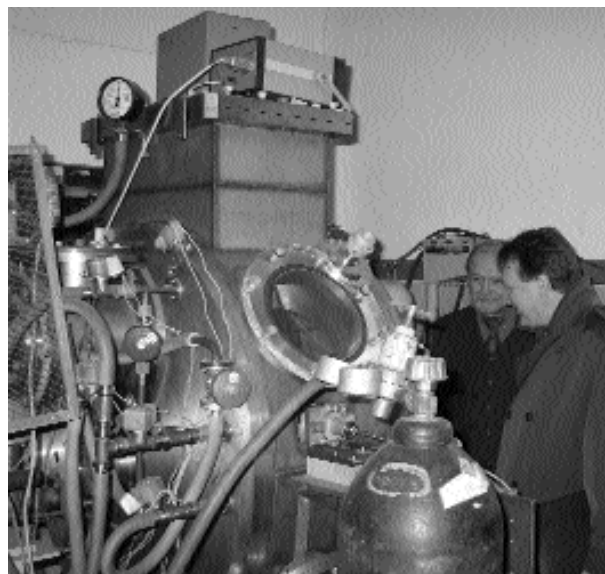


Рис. 2. Виконавчий директор УНТЦ Ів Кармель оглядає автоматизовану установку НШОР для гартування розплаву в захисній атмосфері (2004 р.)

снюється на повітрі, рис. 1, а) дає змогу виготовляти не тільки зразки для досліджень, але й дослідні та дослідно-промислові партії аморфних і нанокристалічних стрічок.

На протязі кількох років в Інституті проводились фундаментальні дослідження взаємозв'язку рівня магнітних властивостей з умовами одержання та особливостями атомної будови вихідних аморфних стрічок сплавів типу Finemet і наноструктурними станами, які формуються в них залежно від хімічного складу в різних умовах термообробки. За результатами проведених досліджень та розробок в Інституті було створено більше 20-и нових економнолегованих вископроникних нанокристалічних сплавів на основі заліза, склад яких був оптимізований за співвідношенням як основних компонентів, так і легуючих домішок. Наявність домішок дає можливість здійснювати контрольований вплив на формування потрібних нанокристалічних станів та кількість нанокристалічної фази в аморфній матриці.

Магнітні властивості (індукція насичення, початкова та максимальна магнітна проникність, коерцитивна сила, загальні втрати в осерді в інтервалі частот до 500 кГц) тороїдальних магнітопроводів різної геометрії, виготовлених з цих сплавів, після оптимальних термообробок є більш високими порівняно з відповідними показниками для відомих сплавів цього класу, а також для низки феритів та пермалоїв промислових марок. Геометрія тороїдальних магнітопроводів визначалася існуючими стандартами: внутрішній діаметр/зовнішній діаметр – висота, мм. Добре зарекомендували себе нанокристалічні сплави  $(\text{FeSiB})_{96,6}(\text{CuNb})_{3,4} - (\text{MM}-1\text{H})$  та  $(\text{FeSiB})_{96}(\text{CuNb})_4 - (\text{MM}-11\text{H})$ .

З урахуванням перспективи промислового виробництва розроблених нанокристалічних сплавів принципово важливою є розробка технології їх приготування не тільки з чистих компонентів, але й з вітчизняної нерафінованої сировини (феробор, феронікель, кремній-сирець, технічне залізо). Проведене коригування оптимальних режимів термообробки сплавів з технічно чистих компонентів забезпечило їм рівень магнітних властивостей не гірший в порівнянні з властивостями сплавів з чистих компонентів однакового хімічного складу. Крім того, значна увага приділялася відпрацюванню технології нанесення на нанокристалічні стрічки електроізоляційних покриттів та виготовлення з них монолітних стрічкових магнітопроводів різних габаритів та геометрій у відповідності з номенклатурою виробів, які виготовляються підприємствами України.

Значною мірою вирішенню конструкторських та технологічних проблем сприяє діяльність малого підприємства ТОВ "МЕЛТА", створеного при Інституті за ініціативи авторів статті, а також академіків В. В. Немошкаленка та В. Г. Барьяхтара, що в різні часи були директорами ІМФ НАНУ і всіляко підтримували розвиток досліджень

аморфних та нанокристалічних сплавів. Безперечно, створення МП було зумовлене тими обставинами, що склалися в країні на початку 90-х років минулого століття і потребували нових форм діяльності науковців для практичної реалізації наукових розробок. Відійшли в небуття такі на свій час цікаві і, безперечно, перспективні форми інтегрування науки у виробництво, як міжгалузеві науково-технічні комплекси (МНТК) на базі таких потужних інститутів Академії, як ІЕЗ ім. Є. О. Патона, ІПМ ім. І. М. Францевича та ін. На жаль, майже повністю була зруйнована і система ДКТБ з дослідними виробництвами, які для багатьох академічних інститутів також були містком між наукою та виробництвом. Але попри розчарування та матеріальні труднощі, які спричинили значний відтік науковців та спеціалістів з установ Академії, залишилися в Інституті справжні ентузіасти, які продовжували провадити наукові дослідження.

Створення такого підприємства на базі хоч і не дуже потужної на той час експериментально-технологічної бази, а також отримані уже позитивні результати створення нових аморфних сплавів та розробки оптимальних технологічних режимів їх одержання давало надію за умови наявності промислового підприємства-замовника розраховувати на матеріальну (хай і невелику) підтримку наукових та інженерно-технічних працівників, що сприяло, без сумніву, збереженню кадрового потенціалу Інституту. Крім того, такі замовлення давали кошти для придбання сировини на виготовлення сплавів та, що найважливіше, на проведення подальших науково-технічних розробок при витратах, значно менших порівняно з установами державної форми власності. Важливим при визначенні основної спрямованості діяльності МП було те, що як на Заході, так і в Росії було вже підтверджено перспективність розробок у галузі матеріалознавства швидкозагартованих

сплавів. Так, у 1990 р. міністрами відомої "дев'ятки" був завізований проект союдної програми "Суперсплав-технологія" по виготовленню та широкомасштабному впровадженню швидкозагартованих аморфних і мікрокристалічних матеріалів на підприємствах міністерств оборонного комплексу у зв'язку з їх конверсією та переорієнтацією на виготовлення високоякісних товарів народного вжитку. Згідно з цим проектом, який внаслідок відомих причин так і не був реалізований, виробництво аморфних сплавів передбачалося вивести в 2005 р. на рівень 60 000 т/рік, у т. ч. аморфних магнітом'яких сплавів для магнітопроводів різноманітного призначення на рівень 20 000 т/рік. Зауважимо, що обсяг виробництва таких матеріалів у 1991 р. лише в США становив більше 100 000 т/рік, в Росії – близько 15 т/рік (в минулому році він становив близько 55 т.) Що ж стосується України, то в ній і на сьогодні відсутнє виробництво навіть простої ізотропної та анізотропної трансформаторних сталей. Для виготовлення різних типів трансформаторів, дроселів та інших елементів силової електроніки така сталь імпортується із Росії. Звідти імпортуються і прецизійні магнітом'які сплави – пермалої та супермалої, що використовуються в Україні для виготовлення електромагнітних екранів, ВЧ-дроселів, магнітних підсилювачів тощо.

За останні 12 років МП ТОВ "МЕЛТА" у відповідності з визначеними основними напрямками діяльності Інституту виконало значний об'єм робіт по створенню нового та модернізації існуючого технологічного обладнання для надшвидкого гартування розплаву, одержанню дослідних та дослідно-промислових партій різних типів прецизійних аморфних та нанокристалічних сплавів, розробці технологій виготовлення з них монолітних стрічкових магнітопроводів різних типів і габаритів з урахуванням вимог до їх масового виробництва, а також різних типів

трансформаторів, дроселів тощо. Зокрема була проведена апробація цих виробів на підприємствах України, що сприяло успішній промисловій реалізації (комерціалізації) розробок ІМФ НАНУ. Так, в останні роки дослідні партії магнітопроводів були з успіхом використані в складі вимірювальних трансформаторів струму серійних електронних одно- та трифазних лічильників електроенергії типу СЕО-1 та СЕТ-11ПА на приладному заводі "Електрон" та Південному радіозаводі (м. Жовті Води), у блоках живлення промислового обладнання для електрофореzu потужністю до 15 кВт на АТ "Форез" (м. Київ), у складі високовольтних (30–60 кВ) височастотних імпульсних трансформаторів вітчизняних рентгенівських (флюорографічних) апаратів у ТОВ "Меді-рент" (м. Київ) тощо. Нові економічні магнітом'які аморфні та нанокристалічні сплави дають можливість знизити масу перетворюючих пристроїв в 1,5–4 рази з одночасним зниженням кількості міді в їх обмотках до 40 % порівняно з феритами, пермалоями та високоякісною трансформаторною сталлю.

Таким чином, до виконання інноваційного проекту в 2004 р., основною метою якого було визначення та відпрацювання в умовах промислового виробництва технологічних параметрів одержання високоякісних стрічок з розроблених нанокристалічних сплавів, а також виготовлення з них тороїдальних стрічкових магнітопроводів з зовнішнім електроізоляційним покриттям, які б мали високу стабільність магнітних властивостей в діапазоні температур використання –60 – +130 °С, Інститут приступив цілком підготовленим, спираючись на наявні матеріалознавчі та технологічні нароби, а також накопичений уже досвід МП ТОВ "МЕЛТА" по впровадженню одержаних результатів у виробництво. У виконанні проекту взяли участь Інститут фізики та Інститут електродинаміки НАНУ, Національний університет

"Львівська політехніка", а також підприємства приватної та колективної форми власності, зокрема, МП ТОВ "МЕЛТА". Саме на нього було покладено завдання впровадження результатів проекту у виробництво на підприємствах України.

### **3. ТЕХНОЛОГІЯ ВИРОБНИЦТВА ВИСОКОСТАБІЛЬНИХ НАНОКРИСТАЛІЧНИХ МАГНІТОПРОВІДІВ ЯК СВОЄЧАСНА ІННОВАЦІЯ ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНТЕНСИВНОГО РОЗВИТКУ ЕНЕРГЕТИКИ ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ КРАЇНИ**

#### **3.1. Характеристика основних результатів виконання інноваційного проекту**

##### **3.1.1. Модернізація гартувального обладнання**

До базових етапів проекту слід віднести модернізацію технологічного устаткування для виробництва нанокристалічних стрічкових сплавів. Кошторисом проекту було передбачене придбання сучасного високошвидкісного пірометра фірми "IMPAC" Infratherm ISQ5 (\$5 000) і налагодження цифрової комп'ютерної системи реєстрації вимірюваного сигналу (температури), що й було реалізовано. Завдяки виготовленій системі позиціонування пірометра відносно поверхні гартувального диска стало можливим вимірювання температури розплаву безпосередньо в процесі отримання аморфної стрічки, а це, в свою чергу, дало можливість враховувати та своєчасно компенсувати можливі зміни гідродинамічних характеристик розплаву при зниженні температури на протязі процесу розливки. Крім того, було виготовлено систему позиціонування аналогічного пірометра (модель IP140) для відслідковування для відслідковування такого важливого технологічного параметра, як

зміна температури поверхні гартувального диска в процесі виліву.

Технічний рівень гартувальної установки якісно підвищився за рахунок її комплектації оригінальною прецизійною електронно-оптичною системою візуалізації та безконтактного вимірювання відстані між об'єктами, створеною спеціалістами НУ "Львівська політехніка". Зокрема ця система дала змогу вимірювати величину тонкого зазору між зрізом ливарного сопла і поверхнею гартувального диска з точністю не менше  $\pm 10$  мкм. Це стало можливим завдяки тому, що у відхиляючій системі електронно-променевої трубки, яка входить до складу скануючої оптичної системи, було використано осердя із розробленого в Інституті аморфного сплаву. Підтримання величини зазору постійною забезпечувала електромеханічна система з використанням сучасних високоточних двигунів (фірми "Ленце") з приводами керування змінного струму.

Здійснені заходи дозволили суттєво розширити технологічні можливості одержання високоякісних аморфних стрічок в контрольованих умовах. Останню розробку можна розглядати як початковий етап створення в стислі строки низки експортноспроможних систем безконтактного контролю швидкоплинних автоматизованих процесів, зокрема в галузі нанотехнологій.

##### **3.1.2. Виготовлення торіодальних стрічкових магнітопроводів**

У рамках проекту було виготовлене та придбане обладнання для намотування стрічкових магнітопроводів з нанокристалічних сплавів. В процесі виконання цього етапу значна увага приділялася особливостям технології виготовлення (намотування) магнітопроводів з високими показниками температурної стабільності магнітних характеристик на високих (10 кГц – 3 МГц) частотах в

умовах масового виробництва. Зокрема, придбаний автоматизований станок для намотування магнітопроводів "Модуль-30" виробництва ЗАТ "Мстатор" (Росія) (рис. 3) після проведеної модернізації дав можливість здійснювати намотування стрічкових магнітопроводів типових розмірів в діапазоні  $3 \div 20 \times 6 \div 32 / 1 \div 10$  (рис. 3.), в т. ч. мінімальних розмірів ( $3 \times 6 / 3$ ;  $3,5 \times 8,5 / 1,2$ ;  $6 \times 9,5 / 3$ ) для телекомунікаційних систем.

Розроблена технологія намотування та термообробки тороїдальних (кільцевих) осердь орієнтована на використання аморфних та нанокристалічних стрічок із сплавів з високими показниками температурної стабільності магнітних характеристик на високих (10 кГц – 3 МГц) частотах.

### 3.1.3. Технологія нанесення електроізоляційного покриття

Для успішного використання аморфних та нанокристалічних магнітом'яких матеріалів у магнітопроводах дроселів та трансформаторів на частотах 20–200 кГц велике значення має забезпечення надійної міжвиткової ізоляції. Якісна ізоляція повинна мати високу теплопровідність для полегшення відводу тепла, бути достатньо тонкою, щоб не погіршити коефіцієнт заповнення і в той же час без пробою витримувати значний електричний потенціал.

Забезпечення мінімальних витрат електроенергії на перемагнічування, особливо для невеликих нанокристалічних осердь, що призначені для роботи на частотах 100–200 кГц, стало можливим при проживленні їх лаком "chromofix" (ТУ6-15-67.47-77). Після полімеризації замонолічене (зафіксоване) осердя має надійну міжвиткову ізоляцію та одночасно є захищеним від вологи. Останнє особливо важливо при використанні сплавів на основі заліза. Розроблений спосіб замонолічування магнітопроводу дозволяє використовувати



Рис. 3. Автоматизований станок для намотування магнітопроводів "Модуль-30"

його без додаткової ізоляції (каркасу).

Для створення міжвиткової ізоляції у відпалених осердях із нанокристалічних сплавів випробовувались також кремнійорганічні (КО) лаки вітчизняного виробництва. Найкращим з них є лак КО 815, який забезпечував мінімальну втрату (особливо у випадку сплаву ММ-11Н) магнітної проникності після полімеризації, а також її довготривалу та температурну стабільність.

Використання стрічкових магнітопроводів тороїдальної та, особливо, видовженої прямокутної форми у вимірювальних приладах та блоках живлення для авіакосмічної техніки також потребує їх фіксації (замонолічування). Перевантаження, що виникають при старті космічного апарату та на початковій стадії польоту, вимагають підвищеної міцності стрічкових осердь.

У процесі виконання роботи остаточну монолітизацію відпалених осердь із ФМ-сплавів здійснювали у розбірних циліндричних та прямокутних формах. В якості компа-

унд для замонолічування відпалених осердь використовували полімерну композицію КФ-1, розроблену спеціалістами ВО "Карат" (м. Львів), або більш міцний та термостійкий матеріал, розроблений ТОВ "МЕЛТА" (м. Київ). Відмінними рисами цих матеріалів у порівнянні з іншими випробуваними компаундами є високі показники теплопровідності, міцності та ізоляційної здатності. Розроблена технологія замонолічування дала можливість виготовлювати високоміцні стрічкові магнітопроводи необхідної геометрії (рис. 4), надійно захищені від вологи та електричних пробів між осердям та обмоткою, що особливо важливо при їх використанні у високовольтних (ВВ) трансформаторах та дроселях.

Для забезпечення високого ступеня температурної та довготривалої стійкості нанокристалічних стрічкових магнітопроводів розроблено продуктивну технологію всебічного нанесення на них електроізоляційних полімерних високотемпературних покриттів з використанням порошкових термотвердіючих полімерів. Покриття з порошкових термотвердіючих полімерів – відносно новий напрямок у розвитку лакофарбової техніки. Фізико-механічні та інші властивості полі-

мерних покриттів значно вищі, ніж лакофарбових, а технологія їх нанесення набагато простіша. Але головними факторами, що наперед визначили перевагу цих покриттів для створення зовнішньої ізоляції магнітопроводів, є фактична відсутність у них розчинників та практична безвідходність технології нанесення покриття. Якщо при отриманні покриття за традиційною мокрою технологією (з використанням фарб, лаків чи епоксидних компаундів) газовиділення (випаровування розчинників) складає 30–70 %, то при використанні порошкових полімерів воно не перевищує 1 %. Це істотно зменшує усадку покриття при полімеризації та, відповідно, знижує рівень стискаючих напружень, що, як правило, погіршують магнітні характеристики нанокристалічних магнітопроводів.

Виготовлене та придбане за кошти проекту обладнання для нанесення всебічного полімерного високотемпературного покриття та його полімеризації дало змогу розробити продуктивну технологію почергового нанесення трибостатичним методом тонких шарів розроблених порошкових композицій із матеріалів на епоксидній, поліефірній та змішаній основах на відносно великі партії

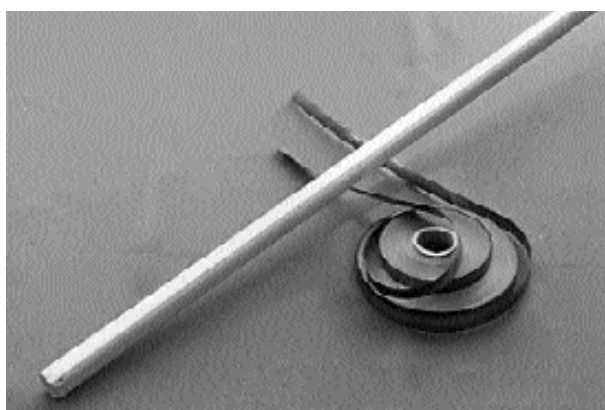


Рис. 4. Зразки монолітних тороїдальних стрічкових нанокристалічних осердь різного розміру, в т. ч. прямокутне стрічкове осердя 14×14/750

нанокристалічних осердь (в т. ч. мініатюрних для телекомунікаційних систем), розміщених на щільній неіржавіючій сітці (каркасі) з швидкою полімеризацією кожного шару. Процес нанесення шарів покриття на обидва боки осердь (перевертання осердь здійснюється після кожного етапу полімеризації) відбувається до досягнення необхідної товщини покриття на кожному з осердь. На рис. 5 показані дослідно-промислові партії тороїдальних магнітопроводів із всебічним полімерним покриттям. Створення високопродуктивної лінії дало можливість отримати дослідні та дослідно-промислові партії нанокристалічних магнітопроводів з міцним електроізоляційним покриттям.

#### **3.1.4. Обладнання для досліджень магнітних властивостей магнітопроводів та їх температурної і часової стабільності**

Згідно з технічним завданням проекту була розроблена та виготовлена за участі спеціалістів ПП "НовіТех" автоматизована установка для магнітних вимірювань, складовими якої є малоінерційна безградієнтна піч з регулятором температури до 400 °С для од-

ночасного дослідження магнітної проникності (фактору індуктивності) 2–4 магнітних осердь з ізоляційним полімерним покриттям або капсульованих у пластикові бокси. Запропонована система забезпечувала вимірювання та збереження даних про фактор індуктивності 1–4 осердь у процесі їх нагрівання, охолодження та витримки при встановленій та стабілізованій температурі на протязі до 2 000 годин. Для проведення низькотемпературних досліджень у Інституті фізики НАНУ був виготовлений кріостат з спеціалізованою вимірювальною системою, яка давала можливість вивчати магнітні властивості нанокристалічних магнітопроводів при температурах від кімнатної до температури рідкого азоту.

Експериментальні дані, одержані на створеному устаткуванні, дозволили скоригувати склад нанокристалічних сплавів та технологію термообробки виготовлених з них магнітних осердь. Це, в свою чергу, дало змогу забезпечити постійність магнітної проникності осердь при тих значеннях температури, коли проникність в осердях із традиційних кристалічних матеріалів, таких, як пермалой чи ферити, безповоротно деградує.



Рис. 5. Дослідно-промислові партії тороїдальних магнітопроводів із всебічним полімерним покриттям

**3.1.5. Магнітні властивості нанокристалічних осердь та їх термочасова стабільність**

Атестація часової стабільності магнітної проникності нанокристалічних тороїдальних стрічкових осердь (магнітопроводів), капсульованих у пластикові бокси, а також із зовнішнім електроізоляційним покриттям при низьких (до  $-60^{\circ}\text{C}$ ) та підвищених ( $100\text{--}130^{\circ}\text{C}$ ) температурах є необхідною передумовою надійної та стабільної роботи електронних компонентів систем управління, передачі інформації (телекомунікаційних систем), контролю та вимірювань в умовах пониження і підвищених температур.

У процесі виконання проекту вивчалася температурна та часова стабільності таких магнітних характеристик нанокристалічних магнітопроводів, як магнітна проникність, індукція насичення та енерговитрати в осердях. На рис. 6 наведені температурні залежності початкової магнітної проникності для декількох зразків. Із порівняння властивостей нанокристалічних осердь з властивостями Mn-Zn-фериту (рис. 7) випливає безперечна перевага розроблених магнітом'яких матеріалів. Слід відзначити, що температур-

на та часова стабільності магнітних властивостей нанокристалічних сплавів значно вища, ніж аморфних сплавів, в тому числі і на основі Co.

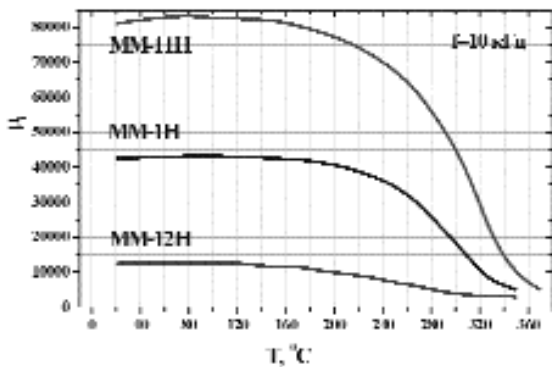
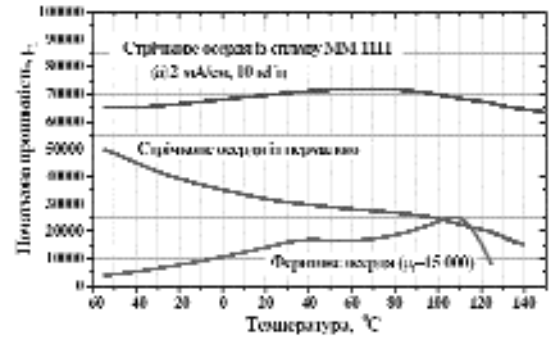
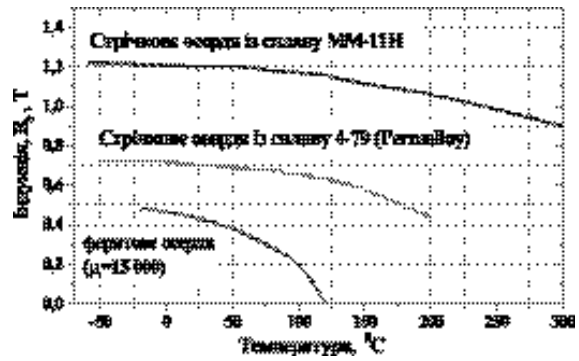


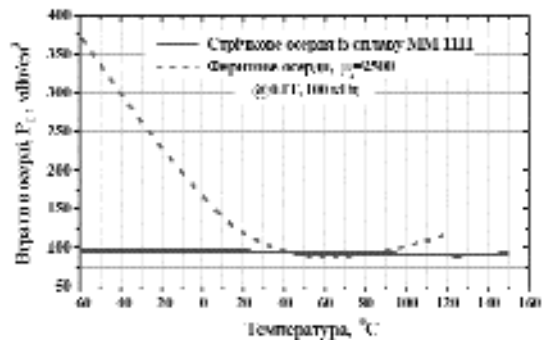
Рис. 6. Температурні залежності  $\mu_i$  нанокристалічних осердь (12/20-10) із сплавів MM-1H, MM-11H та MM-12H. Швидкість нагрівання близько 5 К/хв



а



б



в

Рис. 7. Температурна стабільність початкової проникності  $\mu_i$  (а), індукції насичення  $B_s$  (б) та втрат в осердях  $P_c$  (в), виготовленого з нанокристалічного сплаву MM-11H

Проведені дослідження показали практичну відсутність втрат на перемагнічування в нанокристалічних осердях у процесі їх витримки до 30 год при температурі 150 °С, що свідчить про характерну для них високу часову стабільність і має велике значення, оскільки при роботі силових трансформаторів завжди відбувається їх розігрівання, і втрати при цьому зазвичай зростають.

Магнітні властивості нанокристалічних осердь в малих полях, які визначаються початковою проникністю також характеризуються високою часовою стабільністю в діапазоні кліматичних (–40 ÷ +50 °С) температур. У процесі вивчення характеру змін властивостей нанокристалічних осердь при підвищених та криотемпературах були визначені найбільш температурностабільні сплави та, відповідно, виготовлені з них магнітопроводи, експлуатаційні характеристики яких наведені в табл. 1. Забезпечення високої стабільності магнітних характеристик нанокристалічних сплавів у діапазоні температур –60 ÷ +150 °С та максимальної часової стабільності магнітної проникності при температурах 100–130 °С стало можливим у результаті оптимізації їх хімічного складу, ретельного дотримання умов проведення кристалізаційних відпалів, оптимального добору складу та методів виготовлення зовнішніх електроізоляційних покриттів.

**Таблиця 1.** Експлуатаційні характеристики розроблених економнолегованих нанокристалічних магнітопроводів

Характеристика	
Індукція насичення, Т	1,15 – 1,20
Відносна початкова магнітна проникність (на частоті 1 кГц)	30 000 – 120 000
Відносна максимальна магнітна проникність (на частоті 1 кГц)	150 000 – 600 000
Температура Кюрі, T <sub>C</sub> , °С	560 – 600
Магнітострикція насичення, ppm	0,5 – 1,5
Втрати в осерді на частоті 100 кГц, при B=0,3Т, Вт/кг	100 – 120
Діапазон робочих температур, °С	–60 – +130
Максимальна температура використання, °С	150

Таким чином, нанокристалічні сплави з огляду на їх суттєво вищу порівняно з традиційними прецизійними сплавами температурну та часову стабільності гістерезисних магнітних властивостей до температур ~150 °С слід розглядати як магнітом'які матеріали з великими перспективами практичного використання в сучасній енергетиці, електротехніці та високоточному приладобудуванні.

### **3.2. Апробація та промислове впровадження нанокристалічних магнітопроводів у пристроях та приладах енергетики та електротехніки**

Випробування та встановлення експлуатаційних характеристик готових магнітопроводів проводилося спільно зі спеціалістами підприємств-споживачів у відповідності з існуючими стандартами та метрологічними вимогами до серійних виробів підприємств приладобудівного, радіо- та електротехнічного профілю, а також до їх нових і близьких до промислової реалізації перспективних розробок. На протязі другого півріччя 2004 р. було виготовлено та поставлено на вітчизняні підприємства більше 3 000 магнітопроводів із нанокристалічних сплавів. Крім того, були виготовлені дослідні та дослідно-промислові партії вимірювальних ТС різного призначення з нанокристалічними магнітопроводами із сплавів ММ-1Н та ММ-11Н (рис. 8).

#### **3.2.1. Вимірювальні трансформатори струму одно- та трифазних електронних лічильників електроенергії**

Нанокристалічні стрічкові магнітопроводи МТ02510С-01-0021 розміром 20/25-10 з цих сплавів були використані замість імпортованих (російських) кільцевих осердь у серійних виробках ВАТ "Енерготерм" (м. Вінниця), зок-

рема, у вимірювальних трансформаторах струму однофазних електронних лічильників безпосереднього (прямого) включення типу ЛМ-1Т, призначених для обліку електроенергії споживання на комунальних та промислових об'єктах. Поставлені ТОВ "МЕЛТА" промислові партії магнітопроводів, що характеризуються високою магнітною проникністю ( $\mu_i = 30000-80000$ ) та індукцією насичення 1,2 Т, цілком задовольняють вимогам виробництва та дозволяють випускати лічильники ЛМ-1Т першого класу точності відповідно до діючого ГОСТу. Зважаючи на високі експлуатаційні властивості нанокристалічних магнітопроводів і довготривалу стабільність їх характеристик, підприємство встановило середній термін служби лічильників протягом 24 років при експлуатації його в температурному діапазоні  $-20 \div +55$  °С.

Зацікавленість ВАТ "ЕНЕРГОТЕРМ" та інших приладобудівних і енергетичних компаній нанокристалічними високостабільними магнітопроводами зумовлена переходом провідних у цих галузях підприємств до випуску нових конкурентоспроможних модифікацій мікропроцесорних лічильників відповідно до ГОСТ 30207-94. Виробники лічильників передбачають як високу точ-

ність вимірювань, так і необхідне забезпечення незалежності величини вихідного сигналу (в т. ч. трансформатора струму) від наявності постійної складової в мережі струму, що вимірюється. Створення таких нових вимірювальних ТС можливе на цей час на базі виготовлених ТОВ "МЕЛТА" дослідних партій розрізних (20/25-10 із сплаву ММ-1Н) та відпалених у поперечному магнітному полі (14/17,5-6,5 із сплаву ММ-11Н) нанокристалічних магнітопроводів, стійких до підмагнічування постійним струмом. Успішне завершення розробки дасть можливість замінити трансформатори струму фірми "VAC" (ФРН), які на цей час імпортуються підприємством, на вітчизняні.

### **3.2.2. Промислові трансформатори струму**

Важливою проблемою сучасної електроенергетики є надійність промислових ТС та як можна більш тривалий термін їх експлуатації без втрати властивостей. Основним призначенням таких ТС є, зазвичай, створення пропорційного сильному первинному струму більш слабкого, який є зручнішим для вимірів або може бути використаним для управління різними мережами. Найбільшого

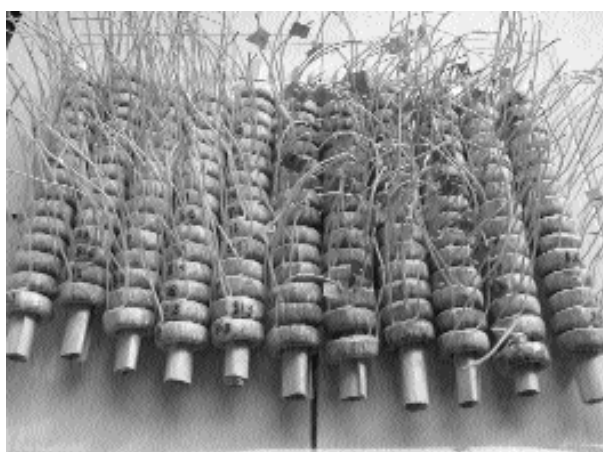


Рис. 8. Дослідні та дослідно-промислові партії вимірювальних трансформаторів струму різного призначення

поширення в енергетиці отримали трансформатори для перетворення струму від 100–1000 А в більш придатний для вимірювання – 1,0–5,0 А. Водночас енергетики відзначають, що при періодичних перевірках ТС з магнітопроводами із електротехнічної сталі через погіршення метрологічних характеристик в результаті так званого магнітного старіння відбраковується, залежно від умов експлуатації, від 20 до 80 % ТС. В той же час нанокристалічні сплави за своїми магнітними властивостями не поступаються навіть перед супермаломом та мають близьку до нуля магнітострикцію, значно вищу початкову та максимальну магнітні проникності (табл. 1) порівняно з магнітною проникністю трансформаторної сталі, для якої ці значення становлять 400 та 8 000 відповідно. Крім того, цим сплавам властиві надзвичайно вузька петля гістерезису (коерцитивна сила становить  $H_c < 2,5$  А/м, тоді як для електротехнічних сталей вона дорівнює 65–100 А/м), високий питомий електричний опір (1,2 мкОм·см, що в 2–2,5 вище, ніж у сталі) та, відповідно, суттєво менші втрати на вихрові струми, що не перевищують 4–5 Вт/кг на частоті 20 кГц. Важливо, що нанокристалічні магнітопроводи здатні зберігати рівень властивостей при визначених існуючим стандартом температурах та вологості більше 100 років, що засвідчує екстраполяція результатів досліджень температурної та часової стабільностей їх магнітних характеристик, проведених у процесі виконання проекту. Завдяки такому рівню властивостей тороїдальні осердя із нанокристалічних ММ-1Н- та ММ-11Н-сплавів спроможні забезпечити трансформаторам змінного (до 1 000 Гц) струму класу точності на рівні 0,2–0,5S, що не поступається сучасним західним стандартам. У процесі виконання проекту в Інституті були виготовлені з урахуванням умов експлуатації та необхідної точності дослідні та дослідно-промислові партії монолітних осердь великого розміру

(45/75-35, 60/90-50, 80/120-35 і 90/130-35) для промислових (станційних) знижуючих (100/5-1500/5 А) трансформаторів струму напругою 6 та 10 кВ класу точності 0,2S. Вони були передані ВАТ "Енергопостачальна компанія "ХМЕЛЬНИЦЬКОБЛЕНЕРГО" для вирішення проблеми організації високоточного комерційного обліку споживаної електроенергії. За висновком енергетиків, рівень характеристик нанокристалічних магнітопроводів в поєднанні з їх високою стабільністю дає можливість використовувати їх у виробництві навіть лабораторних та еталонних трансформаторів струму класу точності вище за 0,02. Крім того, проведені експлуатаційні випробування нових ТС з нанокристалічними магнітопроводами засвідчили їх стійкість до підмагнічування постійною складовою струму, яке в умовах експлуатації може бути фактором розкрадання електроенергії. Наявність цієї складової збільшує від'ємну похибку вимірюючого ТС (зокрема, для їх старих моделей) у 2–2,5 рази при навантаженні споживання менше 50 % від номінального. Важливими також є результати проведених у ВАТ "ХМЕЛЬНИЦЬКОБЛЕНЕРГО" випробувань ТС з нанокристалічними осердями в динамічних режимах, моделюючих реальні процеси комутації навантажень та коротких замикань з кратністю струмів 10–25  $I_{ном}$ . Будь-яких змін робочих параметрів цих ТС при навантаженнях не відбулося.

### **3.2.3. Трансформатори струму витоку нових пристроїв захисного відключення (ПЗВ)**

Здатність нанокристалічних магнітопроводів забезпечувати високу точність вимірювання малих (до 10–30 мА) струмів дозволила застосовувати їх у датчиках (трансформаторах) струму витоку пристроїв захисного відключення (ПЗВ), що використовуються в енергетиці, промислового виробництва та в

побутовій техніці. Виготовлена в рамках проекту дослідно-промислової партії таких трансформаторів з магнітопроводами 15/20-6,5 із сплаву ММ-11Н (рис. 8) передана в ЗАТ "Тираспольський електроапаратний завод" (Молдова) для використання в складі диференціальних пристроїв захисту з чутливістю 30 мА. Завдяки високій (більше 40 000) початковій магнітній проникності нанокристалічних магнітопроводів та більш низьким порівняно з пермалоем втратам на перемагнічування, виготовлені трансформатори забезпечили високу чутливість ПЗВ до струму витоку, зменшення їх габаритів та, відповідно, зниження вартості. Повністю успішними були проведені в НДІЕА (м. Ставрополь, Росія) кваліфікаційні та сертифікаційні випробування нових ПЗВ-АВДТ66-29 з трансформаторами ТСВ-220-1/10 ... 100 (ТУ У 21466665.009-04) виробництва ТОВ "МЕЛТА". Вже в березні 2005 р. завод перейшов на серійне виробництво ПЗВ, програма якого розрахована на виготовлення до кінця року 50 000 ПЗВ; трансформатори струму вартістю \$1,3 з нанокристалічними магнітопроводами для їх комплектації здійснюватиме ТОВ "МЕЛТА". Крім того, найближчим часом ЗАТ "Тираспольський електроапаратний завод" розпочинає виготовлення ПЗВ з чутливістю 10 мА на базі трансформаторів з нанокристалічними магнітопроводами ТСВ-220-1/10 ... 100.

#### **3.2.4. Стержневі стрічкові магнітопроводи для індукційних магнітометрів**

Для Львівського центру (ЛЦ) Інституту космічних досліджень (ІКД) НАНУ та НАНУ розроблено технологію виготовлення прямокутних стержневих нанокристалічних магнітопроводів з високою механічною міцністю та стабільністю магнітної проникності в температурному інтервалі  $-50 \div +150$  °С. Було виготовлено та передано до ЛЦ ІКД дослід-

но-промислової партію монолітних стержневих магнітопроводів (рис. 4) розмірами  $10 \times 10 \times 750$  та  $12,5 \times 12,5 \times 1000$  для комплектації створюваних в ЛЦ надчутливих індукційних магнітометрів, призначенням яких є вимірювання малих змін магнітного поля при проведенні космічних та геофізичних досліджень. Отримані значення чутливості індукційних зондів з нанокристалічними магнітопроводами на 15–17 % перевищують чутливість зондів, в яких використовуються найкращі стрічкові пермалої, і саме тому ці нові магнітометри знайшли попит в Японії, Німеччині, Італії та ін.

#### **3.2.5. Нанокристалічні магнітопроводи в узгоджувачих вихідних широкополосних трансформаторах**

Виготовлену дослідну партію (50 шт.) узгоджувачих вихідних широкополосних трансформаторів різноманітних систем звукозапису з магнітопроводами 20/32-10 і 25/40-15 із нанокристалічного сплаву ММ-1Н було передано в АТ "Національна радіокомпанія" (м. Київ). Використання трансформаторів з нанокристалічними осерддями замість феритових (чи з трансформаторної сталі) в різноманітних системах звукозапису та відтворення забезпечило завдяки їх великому запасу потужності високу якість сигналів у широкому (від 10 Гц до 30 кГц) частотному діапазоні. Більш ефективними порівняно з магнітопроводами із традиційних магнітом'яких сплавів виявилися магнітопроводи з розмірами 4/8-4,5 з всебічним полімерним ізоляційним покриттям із нанокристалічного сплаву ММ-1Н в узгоджувачих широкополосних малогабаритних імпульсних трансформаторах телекомунікаційних систем (ВО "Завод ім. Петровського", м. Київ), а також магнітопроводи з розмірами 3/6-3 в узгоджувачих імпульсних мікротрансформаторах міні-АТС (завод ім. Т. Шевченка, м. Харків).

**3.2.6. Монолітні нанокристалічні магнітопроводи в вихідних силових трансформаторах імпульсних джерел живлення**

Здійснене в процесі виконання проекту доопрацювання технології виготовлення великогабаритних (90/125-75) монолітних нанокристалічних магнітопроводів масою до 2,5 кг зі стабільними до температур 130 °С властивостями із сплаву ММ-11Н дало можливість виготовити та поставити на Державне підприємство "Дніпропетровський науково-виробничий комплекс "Електровозбудування" дослідно-промислому партію магнітопроводів з метою виготовлення потужних вихідних трансформаторів для надійних та ефективних імпульсних джерел живлення та комплектації ними вітчизняних електропроводів. Магнітні, електричні та механічні властивості цих магнітопроводів виявилися на рівні кращих імпортованих аналогів, зокрема магнітопроводів виробництва фірми СІМЕНС, та майже втричі вищими за відповідні властивості феритних магнітопроводів. Силові трансформатори з нанокристалічними магнітопроводами використані в серійному виробництві електропроводів.

**4. НАСТУПНИЙ ЕТАП ПРОМИСЛОВОЇ РЕАЛІЗАЦІЇ СТВОРЕНИХ ІННОВАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Європейський вибір розвитку економіки України зумовлює необхідність переходу до інноваційної моделі. У розвинених країнах світу посилюються тенденції щодо прискорення темпів розробки та практичної реалізації нових високопродуктивних технологій, спрямованих в першу чергу на ресурсо- та енергозбереження як фактори стійких темпів економічного зростання, розробку та освоєння промислового виробництва абсо-

лютно нових видів матеріалів і обладнання. У цьому зв'язку зазначимо, що в академічному середовищі термін "комерціалізація науки" (точніше, її результатів) поки що не став звичним. А на Заході при обговоренні тих чи інших напрямків фундаментальних досліджень в університетах чи дослідницьких центрах цілком природними є питання щодо можливого "application" майбутніх результатів цих досліджень. Безперечно, що пильна увага до цього боку діяльності науковців є віянням часу і відображує ті об'єктивні зміни, що відбуваються сьогодні в суспільстві та в різних сферах людської діяльності, включаючи наукову.

Приклади використання результатів наукових розробок нашого Інституту на рівні промислового виробництва в підприємствах енергетичної, електротехнічної та, частково, приладобудівної галузей наведені не тільки для того, щоб проілюструвати ті вагомі переваги, які дає технологія надшвидкого гартування розплавів в одержанні найсучасніших і економічних магнітних матеріалів. Важливим є те, що можливості цієї технології завдяки її багатофункціональності є значно ширшими. Наприклад, вона дозволяє одержувати унікальні аморфні та мікрокристалічні стрічкові припої на основі міді, які замінюють золото-, та срібломісткі припойні матеріали, а також високотемпературні припої на Fe-Cr-Si-B-, Ni-Mn-, Ni-Mn-W-Co-основах для пайки конструкцій із спеціальних (в т. ч. вуглецевих) сталей, стільникових конструкцій з неіржавіючих та жароміцних сплавів, вузлів та деталей газових турбін, тощо.

Своє завдання автори вбачають і в тому, щоб звернути увагу керівників провідних галузей промисловості країни на існування реальних можливостей виводу розгалуженої промисловості України на якісно новий рівень за рахунок інновацій, в основі яких знаходились би набуті вже результати різнопланових фундаментальних досліджень та розробок, які проводяться установами На-

## **Інноваційні проекти Національної академії наук України**

ціональної Академії наук. Вирішити пов'язані з цим проблеми лише власними силами науковці, безперечно, не в змозі, особливо, коли йдеться про широкомасштабне впровадження наукових розробок у виробництво. Так, наприклад, певною проблемою є те, що Інститут разом з МП сьогодні не в змозі задовольнити існуючі запити підприємств України щодо нових аморфних і нанокристалічних матеріалів, а також виробів з них (більшість з яких, до речі, мають подвійне призначення). Виробництво аморфної стрічки в поточному році не перевищить ~2 тон через недостатню потужність гартувального обладнання. І все ж таки це дасть можливість до кінця року знизити імпорتنі поставки магнітопроводів в Україну та здійснити їх експорт (див. табл. 2).

Водночас попит вітчизняних підприємств на такі матеріали та відповідні вироби, чи напівфабрикати (магнітопроводи) з них суттєво зростає. Крім того, на ці вироби уже є попит у країнах Західної Європи, в Росії, Китаї, Сінгапурі, Молдові та ін. На розроблені нашими фахівцями технології виготовлення мініатюрних магнітопроводів для засобів телекомунікації звернули увагу деякі провідні фірми США, зокрема, Beta Transformer Technology Corporation.

Усе вищесказане робить вельми актуальним завдання крупнотонажного виробництва аморфних, нано- і мікрокристалічних сплавів та стрічкових магнітопроводів із них на основі технології надшвидкого охолодження розплаву. Успішне вирішення цієї проблеми прискорило б поступ України до енергетичної незалежності. Розгортання такого виробництва на металургійних гігантах країни напевно чи можна вважати виправданим, зважаючи на великі капітальні вкладання, зумовлені технічним переоснащенням та досить тривалим терміном їх окупності. На нашу думку, за відповідних умов до промислової реалізації такої великомасштабної інновації

**Таблиця 2. Експортні та імпортозамінні можливості створюваної науково-технічної продукції (план 2005 р.)**

Назва продукції	Країна	Обсяги експорту або заміна імпорту
Нанокристалічні та аморфні магнітопроводи різного призначення	Росія	заміна імпорту: ≥ 150 000 шт/рік
Нанокристалічні магнітопроводи з високою термочасовою стабільністю магнітних характеристик	Молдова, Росія	експорт: ≥ 50 000 шт/рік

найбільш підготовленим є саме МП ТОВ "МЕЛТА" завдяки його тісному зв'язку з Інститутом, набутому вже досвіду та кваліфікованим кадрам, які є в Україні тільки у нас.

Першочерговою із зазначених умов є створення продуктивного гартувального обладнання потужністю 20–50 кг за цикл розливки (її вартість становитиме близько \$700 000). Необхідною умовою є також створення відповідної "інфраструктури". Вона має складатися з плавильної установки для виплавки вихідних сплавів (вартістю \$250 000); пристосування для намотування одержаної стрічки; машини для її подовжнього розрізування (довжина стрічок при значній масі вихідного сплаву може сягати кілометрів); станків для намотування магнітних осердь різних розмірів; спеціальних печей для термічної та термомагнітної обробки сотень і тисяч осердь; пристрою для упаковки кожного осердя в пластикові бокси і нанесення всебічного ізоляційного полімерного покриття; лінії для розрізування магнітопроводів або формування в них немагнітного зазору та шліфовки їх торцевих частин; стенду для експресного контролю (перевірки і відбраковування) магнітних властивостей термооброблених та упакованих осердь, а також складських приміщень для зберігання сировини і готової продукції. Повна вартість такого проекту становитиме не менше \$1 500 000, термін реалізації – біля 2,5 років з поетапним введенням основних засобів і випуском перших промислових партій продукції через 1,5 роки.

Що стосується робочих приміщень для розміщення такого технологічного комплексу (1 000 кв.м), то (як можливий варіант) вони могли б орендуватися на території технологічного корпусу ІМФ НАНУ.

Проведений маркетинг дає підстави вважати, що найбільшим попитом як на внутрішньому, так і на європейському і світовому ринках користуватимуться магнітопроводи для вимірювальних ТС в електронних лічильниках електроенергії і мініатюрні магнітопроводи для телекомунікаційних трансформаторів. Середня конкурентна ціна магнітопроводу масою до 15 г складе \$1,0 (такою ж може бути ціна магнітопроводу масою 0,5 г), тобто об'єм реалізації від продажу близько 1 400 000 магнітопроводів масою 15 г, виготовлених з 20–22 тон аморфної стрічки, становитиме близько \$1 400 000. При виробництві нанокристалічних магнітопроводів масою 2–3 г по ціні \$0,8–0,9, або готових вимірювальних ТС з магнітопроводами масою близько 30 г (~ 700 000 шт/рік) по ціні не менше \$3–3,5 за трансформатор, окупність проекту складатиме близько 3 років.

Виконання інноваційного проекту, пов'язаного з розширенням об'ємів та номенклатури магнітопроводів, можливе лише за умови супроводу його відповідними інвестиціями (наприклад, це міг би бути безвідсотковий банківський кредит, чому могла б посприяти держава). Тим самим був би задоволений попит вітчизняних підприємств на ефективні магнітом'які матеріали, що звільнило б підприємців від примх та високої вартості імпорту. При цьому відкрилися б нові можливості створення найсучасніших приладів, обладнання та устаткування для енергетики, електроніки, електро- і радіотехнічних галузей промисловості.

На закінчення хочеться висловити надію, що приклад ІМФ НАНУ, як і інших інститутів Академії, які в стислі терміни впровадили низку важливих для країни розробок за

результатами виконання інноваційних проектів у 2004 р., сприятиме тому, що підупала останніми роками увага влади до проблем академічної науки та науковців зросте. Є надія, що держава звернеться до великих і ще багато в чому не використаних можливостей практичної віддачі науки. Це єдино вірний та ефективний шлях інтенсивного розвитку економіки, на який уже давно і впевнено стали розвинені країни, а наздоганяти, як відомо, завжди важко...

### ЛІТЕРАТУРА

1. **Танкевич Є. М.** Первинні вимірювальні канали систем комплексної автоматизації електроенергетичних об'єктів // Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук / ІЕД НАНУ, Київ, 2004, 37с.
2. **Гуртовцев А. Л., Бордаев В. В., Чижонко В. И.** Низковольтные однофазные измерительные трансформаторы тока // Электрические сети и системы. –2004.–№ 3.–С. 44–53.
3. **Мирошніченко І. С., Салли І. В.** Установка для кристаллизации сплавов с большой скоростью охлаждения // Заводская лаборатория.–1959.–т. 25.–№ 11.–С. 1398–1399.
4. **Duwez P., Willens R. H., Klement W.** Continuous series of metastable solid solutions in silver-copper alloys // J. Appl Phys.–1960.–v. 31.–№ 6.–Р. 1136–1139.
5. **Мирошніченко І. С.** Закалка из жидкого состояния.–М.: Металлургия, 1982, 167 с.
6. **Ефимов Ю. В., Варлимонт Г., Мухин Г. Г. и др.** Метастабильные и неравновесные сплавы.–М.: Металлургия, 1988, 383 с.
7. **Маслов В. В., Падерно Д. Ю.** Получение аморфных металлических сплавов // В кн. Аморфные металлические сплавы.–К.: Наук. думка, 1987, С. 52–86.
8. Pat. 3862658 USA/ Extended retention of melt-spun ribbon on quenching wheel // J.R.Bedell.–Publ. 28.01.75.
9. **Liebermann H. H., Graham C. D.** Production of amorphous alloy ribbons and effects of apparatus parameters on ribbon dimensions // IEEE Trans. Magn.–1976.–MAG-12.–№ 6.–Р. 921–923.
10. **Yoshizawa Y., Oguma S., Yamauchi K.** New Fe-based soft magnetic alloys composed of ultrafine graine structure // J.Appl. Phys.–1988.–v. 64. № 10.–Р. 6044–6046.

## **СТВОРЕННЯ ВІТЧИЗНЯНОГО ВИРОБНИЦТВА РІЖУЧОГО ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ ДОРОЖНЬО-ФРЕЗЕРНИХ МАШИН**

**М. В. Новіков, В. А. Лукаш, Л. М. Вировець\***

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, Київ*

*Надійшла до редакції 08.04.05*

---

**Резюме:** У статті наведені підсумки впровадження у виробництво результатів науково-технічного інноваційного проекту, затвердженого Постановою Президії НАН України від 24.06.04 р. № 176. Показана реальна можливість реалізації фундаментальних досліджень Інституту надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля в конкретній галузі виробництва. Розроблений авторами інструмент для дорожніх машин вітчизняного і закордонного виробництва дає змогу відмовитись від закупівлі імпортного дорогого інструменту і заощадити значні кошти.

**Ключові слова:** дорожнє покриття, різець, фрезерування, сталь, твердий сплав, державка, вставка.

**М. В. Новиков, В. А. Лукаш, Л. М. Вировець. СОЗДАНИЕ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ПРОИЗВОДСТВА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ДОРОЖНО-ФРЕЗЕРНЫХ МАШИН.**

**Резюме:** В статье приведены итоги внедрения в производство результатов научно-технического инновационного проекта, утвержденного Постановлением Президиума НАН Украины от 24.06.04 г. № 176. Показана реальная возможность реализации фундаментальных исследований Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля в конкретной отрасли производства. Разработанный авторами инструмент для дорожных машин отечественного и зарубежного производства позволяет отказаться от закупок дорогостоящего импортного инструмента и сэкономить значительные средства.

**Ключевые слова:** дорожное покрытие, резец, фрезерование, сталь, твердый сплав, державка, вставка.

**N. V. Novikov, V. A. Lukash, L. N. Virovets. DEVELOPMENT OF THE DOMESTIC PRODUCTION OF CUTTING TOOLS FOR ROAD-MILLING MACHINES.**

**Abstract:** The results are reported of implementation of scientific outcome resulted from the scientific and technical innovation project authorized by the Order NAS of Ukraine from 24.06.04 № 176 are given. The realization of basic researches of Bakul Institute of superhard materials by him(it) really shown in concrete branch of manufacture. The effective tool, developed by the author, for road machines foreign and fatherland and of manufacture allows to refuse purchases of the expensive tool and to save significant means.

**Keywords:** road covering, cutter, milling, steel, hard alloy, holder, insert.

---

\*В роботі приймав участь провідний інженер О. В. Мельничук

Вирішення сучасних проблем матеріалознавства відбувається в трьох напрямках. Продовжується пошук нових елементів та вивчення глибинного фізико-хімічного стану речовин, що складають класичну основу. Розвиток експериментальної техніки спричиняє поглиблення фундаментальних досліджень структурного стану особливо різних сполук, композитів та тонкоплівкових структур. Цей напрямок отримав загальну назву як "наноструктурні дослідження". Вони ведуть до створення новітніх технологій формування конче потрібних технічних елементів електроніки, біомеханіки, медтехніки тощо.

Потребують також актуального вирішення технічні проблеми створення сучасних машин, механізмів, технологічного обладнання для галузей економіки широкомасштабного значення. В Україні до таких галузей можна віднести будівництво, породоруйнування, обробку природного каменю, металообробку в машинобудуванні.

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля входить до групи комплексних науково-дослідницьких установ, які вирішують принципові питання сучасного матеріалознавства. Учені інституту працюють над створенням нових матеріалів з використанням екстремально високих технологічних параметрів – надвисоких тисків та надвисоких температур. Вивчається на нанорівні природа надтвердого стану матеріалів у поєднанні з надпровідністю, надтеплопровідністю, винятковими антифрикційними, антикорозійними, напівпровідниковими властивостями. Є в інституті досягнення світового рівня. Але ми у нашій публікації зупинимось на вирішенні завдань, вкрай необхідних для сьогочасних економічних потреб України.

Прискорена автомобілізація України вимагає активного розвитку шляхової мережі країни, поліпшення і ремонту існуючих доріг з твердим покриттям. Щорічно в Україні підлягає ремонту близько 40 тис. км доріг з

твердим покриттям. Однією з найбільш трудомістких операцій при цьому є видалення пошкодженого чи деформованого верхнього шару дорожнього покриття з метою укладання на його місце нового.

На жаль, здійснюється це в Україні не вітчизняною технікою, а за допомогою дорожньо-фрезерних машин виробництва відомих іноземних фірм "Wirtgen", "Bobkett", "Katarpillar". В Києві для цих цілей використовується дві великі барабанні фрези і 14 малих машин "Bobkett". На підприємствах Укравтодору кількість дорожньої техніки вказаних фірм становить 160 одиниць, із них 30 великих фрез фірми "Wirtgen". Останнім часом подібні машини ("КРОКУС") почало випускати і одне з вітчизняних підприємств (Городоцький механічний завод). На даний час підприємства обласних Укравтодорів уже мають 12 таких дорожніх машин і в подальшому виробництво їх буде збільшуватись.

Як породоруйнівний інструмент на вказаних машинах, в тому числі і вітчизняних, використовуються дорожні різці з вольфрам-кобальтових твердих сплавів, подібні до вітчизняних різців обертового типу, що застосовуються в гірничій промисловості. Лідером у створенні і виготовленні дорожніх різців є фірма "ВЕТЕК" (Німеччина). Основним постачальником цього інструменту в Україні відповідно до ексклюзивної угоди з виробником є також німецька фірма "Wirtgen", яка є одним із найбільших у світі виробником дорожньо-фрезерних машин.

Ще донедавно усі користувачі дорожньої техніки повинні були звертатися до послуг зарубіжних постачальників, тому правомірно постало питання, а чи не може вітчизняне виробництво та наш науково-технічний потенціал конкурувати з відомими виробниками, адже імпортований інструмент дорогий, а потреба в ньому досить значна.

Минулого року, зважаючи на багаторічний успішний досвід у створенні та ви-

готовленні породоруйнівного інструменту для гірничої галузі, Інститут надтвердих матеріалів НАН України взявся за вирішення проблеми розробки інструменту для дорожньо-фрезерних машин. Президія НАН України видала Постанову за №176 від 24.06.2004 р. про виконання науково-технічного проекту "Розробка та налагодження виробництва інструменту для будівництва та ремонту автошляхів України".

З аналізу роботи дорожніх різців випливає, що основною причиною виходу їх з ладу є абразивне зношування твердого сплаву. Абразивне зношування інструменту відбувається при руйнуванні наповнювача асфальтобетону, який в основному представлений такими міцними породами, як граніт, діабаз, піщаник і т. ін. Тому при виборі матеріалу для оснащення дорожніх різців важливо було оптимізувати на сучасному технологічному рівні структурні особливості твердосплавного виробу, забезпечити зносостійкість поширених марок твердого сплаву саме при взаємодії його з такими наповнювачами.

Для проведення досліджень зносостійкості була використана спеціальна методика і лабораторний стенд, в основу якого закладена так звана "перевернута схема", коли дослідний зразок інструментального матеріалу залишається нерухомим, а обертається породний kern. Це дає змогу не тільки постійно контролювати зношування зразка твердого сплаву, а і температуру його нагрівання, що є важливим при виборі оптимальних режимів роботи інструмента.

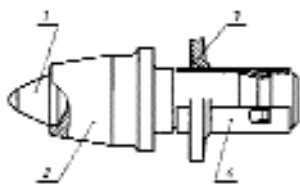
При порівнянні зносостійкості різних марок твердого сплаву, які застосовуються для руйнування гірських порід, виявилось, що найбільш придатним для ефективного руйнування асфальтобетонного масиву є сплав вольфрамо-кобальтової групи, який складається з твердих надміцних включень зерен карбіду вольфраму, пов'язаних матрицею пластичного кобальту в межах 6–10 %

від загального об'єму.

Досвід використання гірничого породоруйнівного інструменту підказав, що не можна обмежуватись одним складом та структурою різців для всіх випадків застосування. Адже ефективність застосування залежить завжди від стану за часом, типу та реальної міцності асфальтобетонного покриття. Чим міцніший асфальтобетон фрезерується, тим більше навантаження формується на інструменті, тим більші значення складових зусиль різання і подачі повинні сприйматися твердосплавною вставкою. Складова зусилля різання, яка діє на інструмент соосно чи під невеликим кутом до його осі, веде до зростання в твердосплавній вставці напружень стискування. Ці напруження не становлять небезпеки для міцності інструмента до рівня 250–350 кг/мм<sup>2</sup> в залежності від марки твердого сплаву. Формується ж ця складова переважно за рахунок зусилля подачі. Водночас, зусилля різання впливає переважно на величину згинального моменту, що створює у вставці розтягуючі напруження, до яких твердий сплав значно чутливіший. Величина згинального моменту на вставці залежить не тільки від зусилля різання, а й від розміру вильоту самої вставки. Звідси й витікає необхідність при розробці конструкції та форм інструменту для високоміцних асфальтобетонів використовувати вставки твердого сплаву зі зменшеним вильотом.

З урахуванням результатів механічних розрахунків, добору структури матеріалу, комплексних даних лабораторних досліджень та особливостей амортизації інструментів різного походження були запропоновані три типоряди дорожніх різців, оснащених твердосплавними вставками різних форм і розмірів. Вони призначаються, відповідно, для руйнування асфальтобетонів високої, середньої і нижче середньої міцностей.

З великої кількості існуючих у світовій практиці конструктивних рішень ріжучого



**Рис. 1.** Дорожній різець у зібраному вигляді

інструменту для дорожньо-фрезерних машин найбільш вдалим, за результатами наших аналізів, є конструкція різця у вигляді складової одиниці з трьох елементів: власне різця, що складається із твердосплавної вставки 1 і сталюї державки 2, захисного кільця 3 і розрізної пружинної втулки 4 (рис. 1). Пружинна втулка служить елементом опори ковзання різця–різцетримач. Нормальна робота цієї підшипникової пари можлива лише за умови, що до неї не будуть потрапляти залишки матеріалу від руйнування, інакше різець перестане обертатися і катастрофічно швидко вийде з ладу. Захист підшипника ковзання від забруднення здійснюється спеціальним захисним кільцем. Воно ж сприймає на себе зусилля подачі і різання.

Державки дорожніх різців у процесі роботи зазнають великих силових навантажень від зусиль різання, що носять динамічний характер, ударів внаслідок переривчатого типу різання та дії згинального моменту. Тому ця частина ріжучого інструменту повинна мати високу міцність і достатню ударну в'язкість серцевини.

Практика застосування інструменту в гірничій промисловості свідчить, що найчастіше для виготовлення породоруйнівного інструменту використовують сталі типу 30ХГСА, 35ХГСА і 45ХН2МФА. Найкращою з них за сукупністю властивостей є сталь 35ХГСА, здатна до ізотермічного гартування. Воно проводиться шляхом охолодження нагрітих до температури 870–890 °С деталей в розплаві солей гідроокисів натрію і калію

при температурі близько 300 °С. Можливість вести гартування при такій високій температурі особливо важлива тому, що при різкому охолодженні (навіть в підігрітому мастилі) у твердому сплаві виникають мікротріщини – зародки майбутніх поломок.

Дослідним шляхом був уточнений режим термічної обробки дорожніх різців. Для гартування використовувалося тепло від нагрівання при паянні твердосплавної вставки в державку. Після паяння різець охолоджувався декілька секунд на повітрі і занурювався в селітрову ванну, температура розплаву солей в якій контролювалася і підтримувалася автоматично. Підданий термообробці різець отримував комплекс таких важливих властивостей, як висока міцність і твердість державки в зоні гартування при в'язкій серцевині, що має велике значення для підвищення стійкості сталюї державки проти абразивного зношування, а також стійкості її при динамічному навантаженні в процесі різання.

Відомо, що процес структурних перетворень при гартуванні сталей протікає з утворенням такої складової, як мартенсит, і супроводжується збільшенням об'єму матеріалу. Це фізичне явище призводить до певного збільшення розмірів пазів в державках, виконаних під твердосплавні вставки, і тим самим сприяє зменшенню залишкових технологічних напружень від паяння.

Підсумовуючи вищевикладене про вибір сталі для дорожніх різців, слід зазначити, що застосування середньолегованих сталей 35ХГСА і 45ХН2МФА дає можливість досягти приблизно однакових експлуатаційних результатів. Але остання марка сталі через наявність у своєму складі нікелю є значно дорожчою. Тому рекомендованою маркою сталі для виготовлення дорожніх різців став хромансил 35ХГСА.

Виготовлення захисного кільця і пружинної втулки дорожнього різця здійснюєть-

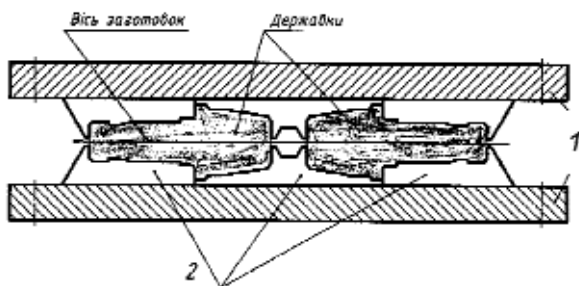


Рис. 2. Схема поперечно-клинової прокатки

ся за допомогою методів холодного штампування. З цією метою були спроектовані і виготовлені окремі штампи: три однострумкових для виробництва втулок і один вирубний – для виготовлення кілець.

З метою суттєвого зниження вартості різців було запропоновано виготовляти державки методом клинової прокатки, якому властивий високий коефіцієнт використання

металу і який має перспективу повної автоматизації. В процесі надання заготовкам потрібної форми у них здійснюється поздовжня переорієнтація зовнішніх волокон і наклеп верхнього шару металу. Виготовлені по цій технології державки здатні без пошкоджень витримувати значно більші навантаження на відміну від тих, що виготовляються методом механічної обробки на токарних верстатах. При прокатці заготовка, вирізана з круглого прутка діаметром, рівним максимальному діаметру державки, деформується двома плоскими плитами 1, на яких розміщується клиновий інструмент 2, за допомогою якого і забезпечуються необхідні форма та розміри державки. На рис. 2 показана схема виготовлення одночасно двох державок методом поперечно-клинової прокатки.

Зазвичай дорожні різці поставляються замовникові у відповідній тарі повністю підготовленими для установки на фрезерний ба-

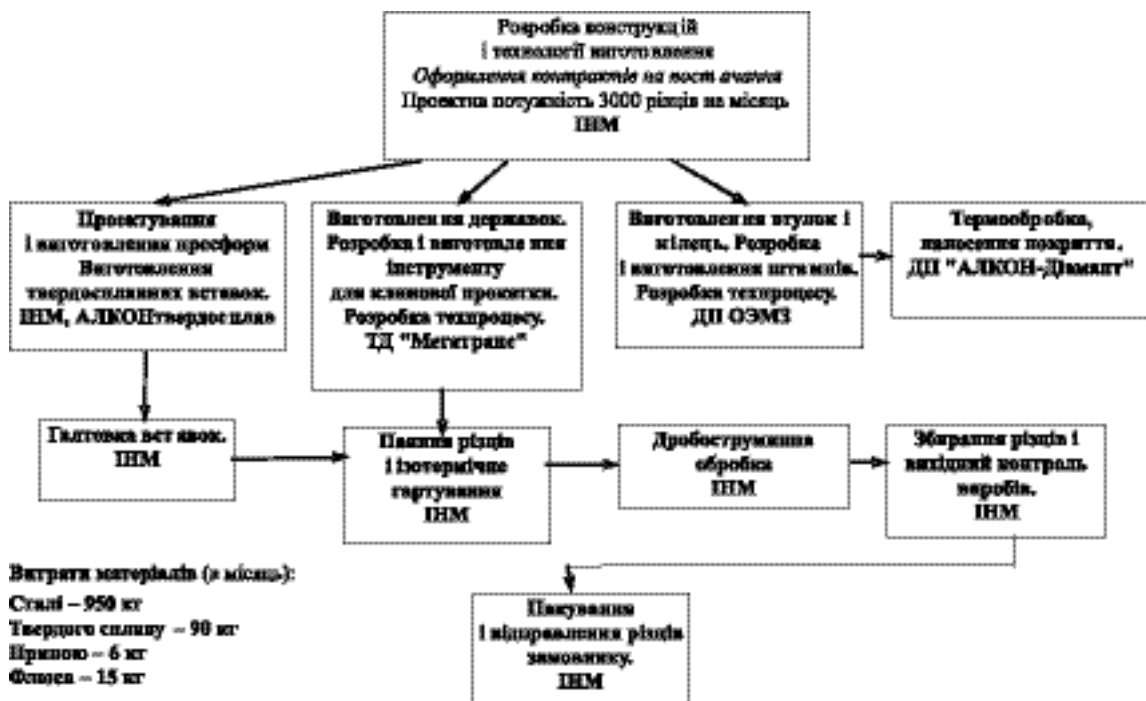


Рис. 3. Загальна (технологічна) схема організації серійного виробництва дорожніх різців

рабан, тобто у зібраному вигляді. Встановлення пружинної втулки на хвостовик різця не становить труднощів, проте надягання на втулку захисного кільця потребує спеціальної оснастки. Для механізації цього процесу розроблений оригінальний пристрій, основу конструкції якого складає здвоєний чотириланковий коромисло-шатунний механізм, виконаний симетрично відносно центральної осі, на якій встановлюється різець з уже надягнутою пружинною втулкою. Механізм приводиться в рух ножним приводом і не потребує значних зусиль для роботи.

Як показано вище, дорожній різець складається із декількох окремих деталей. При цьому кожна з них потребує своїх матеріалів, обладнання і технологій для виготовлення, що в свою чергу вимагає розробки багатьох технологічних переходів та відповідних нормативних документів, необхідних для організації масового виробництва різців. Основними технологіями виготовлення різців є процес паяння тврдосплавної вставки та ізо-термічного гартування (одночасно з використанням тепла від паяння) державки різця, виготовлення і термічної обробки пружинної втулки і захисного кільця, дробоструминної

обробки всіх деталей після термообробки, а також їх лужного оксидування. Заключний документ, необхідний для постановки різців на масове виробництво, це розроблені технічні умови (ТУ У 28.5-054 17377-132-2004). Загальна (технологічна) схема організації серійного виробництва дорожніх різців наведена на рис. 3.

Таким чином, можна констатувати, що Інститут надтвердих матеріалів НАНУ в короткий термін успішно вирішив усі етапи завдання впровадження наукових результатів у практику серійного виготовлення інструментів, потрібних для дорожньо-фрезерних машин. Починаючи з другого кварталу 2005 року створене вітчизняне серійне виробництво дорожніх різців по замовленням може задовольнити всі потреби користувачів в Україні. Економічний ефект від широкого їх застосування та скорочення закупки значно дорожчих імпортованих різців буде безперечним.

Автори висловлюють подяку керівництву комунальної корпорації "Київавтодор" та підприємства КАТП 273901 за плідну співпрацю і допомогу при впровадженні результатів проекту.

## Інформаційний розділ

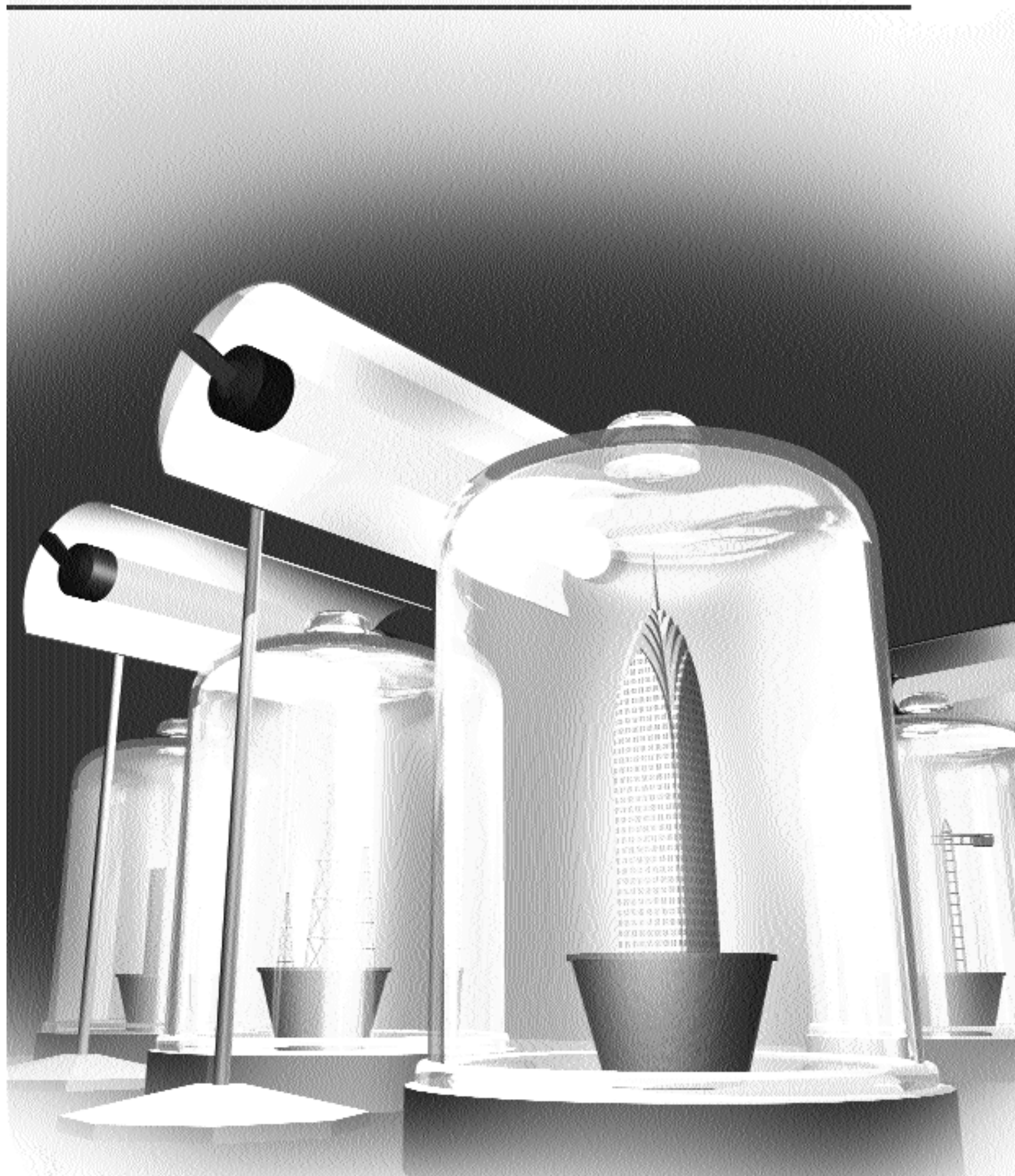
### ПЕРЕЛІК

*наукових конференцій, симпозіумів, семінарів, виставок  
Національної академії наук України на жовтень–грудень 2005 року*

Назва заходу	Місце проведення	Термін проведення	Організатор
Виставка-семинар "Земляки... 2005"	м. Київ	жовтень	Міжнародний науково-інформаційний центр інформаційних технологій та систем
Грецька конференція "Проблеми природокористування, сталого розвитку та територіальні безпеки регіонів"	м. Дрезден/Германія	жовтень	Інститут проблем природокористування та екології
Українська конференція молодих вчених "Сучасні проблеми матеріалознавства"		жовтень	Інститут матеріалознавства
Міжнародна наукова конференція „Інтелектуальні інформаційні технології у бібліотечній справі“	м. Київ	жовтень	Національна бібліотека України ім. В.І. Вернадського
Науково-практична конференція "Проблеми розвитку та функціонування землі в Україні"	м. Київ	жовтень	Інститут земно-інформаційних досліджень
Міжнародна наукова конференція, присвячена 40-річчю заснування Державного наукового центру		жовтень-листопад	Державний науковий центр НАН і МОН України
Виставка-семинар "Семли. Семликий рік... 2005"	м. Київ	листопад	Інститут газу
Міжнародна науково-технічна конференція "Діагностика, міграція, ресурси машин та конструкцій"	м. Київ	листопад	Інститут проблем міцності ім. Г.С.Писаренка
Вісників-семинар «Обработка металлов»	м. Київ	листопад	Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Писаренка
Теоретичні читання	м. Київ	1-2 грудня	Інститут кіберетики ім. Г.Г. Шем'яка
Ювілейна наукова конференція, присвячена 100-річчю з дня народження академіка А.К. Вельголь	м. Харків	23 грудня	ІНІІ «Харківський фізико-технічний інститут»

# СВІТ ІННОВАЦІЙ

---



### ІННОВАЦІЇ У ЄВРОПІ

Підтримка інноваційних досліджень – один із найважливіших напрямків наукової політики Європейського Союзу. Ще у 1995 р. було ухвалено документ "Зелена книга інновацій", в якому визначено зміст терміну "інновації" як синоніму "успішного створення, сприйняття та застосування нового в економічній та соціальній сферах", що сприяє вирішенню нагальних проблем на рівні особистості і суспільства в цілому [1, 2]. Прикладом можуть служити розробка вакцин для запобігання хворобам, полегшення комунікацій через мобільний зв'язок чи відеоконференції, підвищення надійності транспорту шляхом створення аеробусів, покращання умов праці при використанні відповідних технічних засобів тощо. Окрім того, інновації створюють підґрунтя для змін в інфраструктурі промислових підприємств, управлінні, організації праці та у вимогах до фахового рівня працівників.

У той же час термін "інновації" певною мірою неоднозначний і у конкретних випадках потребує додаткового уточнення, оскільки може стосуватися як "процесу" втілення ідеї у важливий продукт чи послугу, нове чи удосконалене виробництво і т. п., так і "результату" цього процесу – нового чи поліпшеного продукту, обладнання чи послуг, що мають попит на ринку. Протилежними за змістом до слова "інновації" є слова "архаїзм та рутини", тому для впровадження інновацій дуже часто необхідно долати перепони і сильний опір, у зв'язку з чим визначального значення набуває розвиток загальної культури суспільства.

Обговорення вказаного документа мало на меті встановлення факторів, від яких залежать інновації в Європі, та формулювання

пропозицій, спрямованих на збільшення інноваційних можливостей країн Європейського Союзу. При цьому наголошувалося, що оскільки інновації стають рушійною силою економічної конкурентноздатності, то їхнє успішне впровадження потребує міждержавного узгодження та глобального вирішення. На підставі результатів проведених дебатів у 1996 р. прийнято Перший план дій щодо інновацій в Європі [3]. У ньому визначено низку завдань з метою координування діяльності Єврокомісії і держав – членів ЄС у трьох основних напрямках:

- прискорення впровадження інноваційної культури через підвищення ролі освіти та обмін кращим практичним досвідом, сприяння мобільності вчених і інженерів, організацію постійних інформаційних форумів на тему "навчання та інновації";
- встановлення сприятливого середовища для легалізації та фінансування інновацій, зокрема, підвищення ефективності патентної системи, допомога підприємцям і вченим у захисті інтелектуальної власності, залучення коштів інвестиційних фондів для підтримки інноваційного підприємництва;
- орієнтування на інновації наукових досліджень, сприяння розробці спільних проектів дослідницьких центрів, університетів та промислових підприємств на місцевому, регіональному та національному рівнях.

Перші підсумки ходу виконання цих завдань розглянуто у Повідомленні Єврокомісії "Інновації для зростання та зайнятості", опублікованому у 1998 р., а робота у даному напрямку стала змістом 5-ої Рамко-

## Оперативна інформація науково-інноваційної сфери

вої Програми Європейського Союзу з наукових досліджень, технологічного розвитку та демонстраційної активності, що виконувалася впродовж 1998–2002 рр. [1].

Наступним кроком Європейського Союзу з метою забезпечення наукового та технологічного прогресу стала розробка концепції Європейського наукового простору, оголошеної на Лісабонському Самміті у 2000 р. [4]. Виникнення цієї ідеї базувалося на глибокому аналізі причин відставання Європи від країн – конкурентів, а саме США та Японії, які полягають у наступному:

- наукові дослідження, що виконуються в країнах – членах ЄС, мають меншу фінансову підтримку, в середньому вона складає 1,9 % ВВП, у той час як у США – 2,8 %, Японії – 3 %. Відповідно значна різниця спостерігається також за кількістю працівників у науковій галузі, а також за приватним інвестуванням в науку;
- при відносно високому рівні виконуваних наукових досліджень, про що засвідчують публікації та цитування, відсутні достатні стимули, необхідні для їх практичного застосування; це явище дістало назву "європейський парадокс".
- національні дослідницькі системи та ресурси роз'єднані та замкнуті, слабо кооперуються на регіональному та загальноєвропейському рівнях.

Для виправлення даної ситуації і кращої організації наукових досліджень концепція Європейського наукового простору пропонує такі заходи:

- створення мережі наявних центрів високої науки в Європі та заснування віртуальних центрів, які могли б використовувати сучасні інтерактивні засоби зв'язку;
- спільне фінансування великих європейських дослідницьких проектів;
- посилення координації виконання національних та загальноєвропейських до-

сліджень для запобігання їх дублюванню та організація тіснішої наукової і технологічної співпраці;

- краще використання засобів виробництва та ресурсів для сприяння інвестуванню в дослідження та інновації;
- впровадження спільних систем наукових та технічних стандартів;
- збільшення наукового ресурсу та надання йому більшої мобільності, а саме: сприяння мобільності вчених у Європі і врахування цього фактора у побудові наукової кар'єри; підвищення ролі та статусу у науці жінок-вчених; стимулювання зацікавленості молоді науковими дослідженнями і кар'єрою вченого;
- використання на місцевому та регіональному рівнях досліджень, що ґрунтуються на кращому досвіді трансферу знань;
- об'єднання наукових товариств, компаній та вчених Західної та Східної Європи;
- підвищення притягальності Європи для дослідників з інших країн світу;
- запровадження спільних соціальних та етичних цінностей в наукових та технологічних питаннях.

Фінансовим інструментом створення реально діючого Європейського наукового простору є 6-та Рамкова Програма ЄС, виконання якої розраховано на 2002–2006 рр. На відміну від попередньої програми тут окремо не виділено інноваційної програми, проте інноваційні аспекти враховуються в усіх її напрямках та спеціальних конкурсах.

Заснування Європейського наукового простору вважається головним компонентом стратегії суттєвого підвищення конкурентноспроможності економіки ЄС до 2010 р., а джерелом її зростання повинні стати інновації, про що наголошується у виданому 2000 р. Повідомленні Єврокомісії "Інновації в економіці, що базується на знаннях" [1]. Ця

публікація включає також перше пілотне видання Європейського інноваційного довідника. Практично одночасно розробляється концепція Європейського інноваційного простору, метою котрого є поєднання таких аспектів:

- створення "внутрішнього ринку" наукових досліджень, тобто сфери переміщення знань і технологій, з метою збільшення кооперації, стимулювання змагальності і досягнення кращого розміщення ресурсів;
- реструктурування європейської дослідницької системи, зокрема покращання координування наукових досліджень в окремих країнах;
- розвиток загальноєвропейської наукової політики, яка стосується не тільки фінансування і виконання наукових досліджень, але враховує і всі інші пов'язані з цими сферами аспекти.

Вважається, що у перспективі Європейський науковий простір матиме такий же статус, як спільний ринок чи єдина валюта зараз. Прогнозується також, що для досягнення бажаної швидкості підвищення конкурентоздатності і сталого росту у майбутньому концепції Європейського наукового простору та Європейського інноваційного простору повинні якщо і не злитися в одну концепцію Європейського наукового та інноваційного простору, то дуже сильно зблизитися.

Навесні 2003 р. Єврокомісія прийняла Повідомлення "Інвестування в дослідження: план дій для Європи", в якому ставиться за мету довести у 2010 р. фінансування науки до 3 % ВВП, при цьому 2/3 суми постачатиме приватний сектор [1]. Визначено також заходи, які необхідно здійснити на національному та/чи європейському рівнях для забезпечення цієї підтримки. Перша група таких заходів включає процеси координації з новими

державами – членами співдружності і заснування "Європейських технологічних платформ", які б об'єднували дослідницькі, промислові організації та користувачів навколо ключових технологій з метою впровадження спільних стратегій їхнього розвитку та використання. Друга група заходів спрямована на підвищення громадської підтримки наукових досліджень та технологічних інновацій, для чого необхідно створювати команди фахівців, здатних доносити значення та переваги розробок до промислових та фінансових структур, сприяти зняттю перешкод для транс – європейського співробітництва і поширення технологій.

Інші дві групи заходів стосуються забезпечення пріоритетності фінансування наукових досліджень та покращання середовища для сприйняття і розуміння наукових і технологічних інновацій, зокрема шляхом впровадження для викладання майбутнім науковцям, інженерам, бізнесменам курсів про інтелектуальну власність та трансфер технологій.

Для просування у напрямку зближення наукового та інноваційного просторів виконується спеціальна програма ЄС "Інноваційні регіони і регіональні стратегії інновацій", яка набуває особливого значення у зв'язку із великим розширенням ЄС після приєднання нових країн. Завданням інноваційних регіонів, які отримали назву "кластери", є об'єднання зусиль вчених, підприємців, банків та чиновників для вирішення характерних для даного регіону, або важливих для його перспективного розвитку проблем. Прикладом може служити утворення таких кластерів у Німеччині, яка здійснює власну програму "Іннорегіо" [5]. На основі конкурсу, оголошеного Федеральним міністерством освіти та наукових досліджень, створено шість "Центрів інноваційної компетентності", кожен з яких до 2009 р. на свій розвиток отримає до 10 млн євро. Серед них

## Оперативна інформація науково-інноваційної сфери

– Технологічний центр в Ільменау, де поряд із Технічним університетом зосереджують науково-дослідні роботи з мікро- та нанотехнологій. У 2004 р. там відкрито Інститут ім. Фраунгофера, який займається цифровими медійними технологіями, комплектуються групи для організації досліджень з нанобіосенсорик та комплексної електроніки, засновуються численні підприємницькі структури. Центр мікроелектроніки створено у Дрездені, біотехнології – у Лейпцігу, демографії – у Ростокі тощо. На допомогу регіональній економіці створюються окремі кластери. Як, наприклад, "Морський альянс" у Померанії – для модернізації суднобудівельної промисловості, "Баутронік" в Тюрінгії – для проектування будівель з комп'ютерним управлінням, "ВіоНуТес" близько Потсдама – для розробки біочіпів, необхідних для медицини та харчової промисловості, "Musicon Valley" – для виготовлення музикальних інструментів.

Інвестування коштів в наукові дослідження, розвиток вищих навчальних закладів, створення науково-інноваційних центрів у регіонах виявилось особливо важливим для Східної Німеччини, де спостерігається старіння та зменшення кількості населення, а в перспективі загрожує повне обезлюднення певних територій. "Ніхто не чекає, що науково-дослідні інститути всього за декілька років виведуть цілі регіони із нинішнього складного становища – вважає голова Німецького дослідницького товариства

Е.-Л. Віннакер, – проте без інтенсивних наукових досліджень у них взагалі немає перспектив". Поліпшення умов навчання та праці, нижча вартість проживання служать стимулом для приїзду студентської молоді та вчених, зокрема із країн Східної Європи, чому сприяє новий "Закон про імміграцію", який орієнтований на відкриття ринку праці для високоосвічених іноземних фахівців і застосовано вважається у Німеччині "соціальною інновацією".

Очевидно, що ідея створення аналогічних центрів активно втілюватиметься і в країнах, які недавно ввійшли до Європейського Союзу. Зокрема, уже в квітні цього року членами Європейської мережі інноваційних регіонів та Малопольським регіоном у Краківі проведено конференцію на тему "Технологічні інновації і регіональне співробітництво у розширеній Європі" [6], до участі в якій запрошено і Україну.

### ЛІТЕРАТУРА

1. [www.eirma.asso.fr/](http://www.eirma.asso.fr/)
2. [www.cordis.lu/innovation-fp4/grnpap/](http://www.cordis.lu/innovation-fp4/grnpap/)
3. [www.cordis.lu/innovation-fp4/action/](http://www.cordis.lu/innovation-fp4/action/)
4. Towards a European Research Area// Comm. From the Commission to the Council, the European Parliament, the Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.–Brussels, 2000.–41 p.
5. Швергель К. Успехи// Deutschland, 2004.–N 4.–P. 27–29.
6. [www.fp6-nip.kiev.ua](http://www.fp6-nip.kiev.ua)

*Підготувала В. М. Троян*

**ГАСЛО  
"РЕКОМЕНДОВАНО ГРОМАДСЬКОЮ РАДОЮ"  
ПЕРЕТВОРЮЄТЬСЯ НА ДІЇ**

Для проведення публічних громадських обговорень з питань науково-технічної, інноваційної діяльності та інтелектуальної власності, окремих нормативно-правових актів, проведення громадської експертизи проектів рішень органів державної влади створено Громадську раду з питань науково-технічної, інноваційної діяльності та інтелектуальної власності (Рада) при Міністерстві освіти і науки України (МОНУ).

22 квітня 2005 року відбулося установче засідання, на якому ухвалено в цілому положення про Раду, обрано голову, його заступника та секретаря Ради.

До складу Ради увійшли представники наукових, освітянських, творчих та інших громадських організацій України. Головою Ради обрано віце-президента Федерації вчених України, академіка НАН України Кухара Валерія Павловича, секретарем – члена Всеукраїнської асоціації інтелектуальної власності Красовську Аллу Георгіївну.

21 червня поточного року відбулося чергове засідання громадської ради з питань науково-технічної, інноваційної діяльності та інтелектуальної власності. Під час підготовки до нього з'ясувалося, що є широке коло питань, які вимагають обговорення і вирішення саме за допомогою представників наукових установ, освітянських, творчих та інших громадських організацій, не байдужих до долі України, її громадян.

Можливо, вперше таким представницьким складом розглядалися шляхи вирішення проблем у сфері охорони прав інтелектуальної власності, яким було присвячено два питання порядку денного.

Велику зацікавленість у присутніх викликав виступ голови Державного департаменту інтелектуальної власності Миколи Паладія "Про державну систему правової охорони інтелектуальної власності в Україні: досягнення, проблеми та шляхи подальшого розвитку".

Виступаючи зазначили, що Держдепартаментом як урядовим органом державного управління зроблено багато для забезпечення ефективної діяльності державної системи правової охорони інтелектуальної власності. В той же час ще не приділяється належної уваги раціоналізаторській роботі, до створення патентних законів не залучаються автори об'єктів інтелектуальної власності, недостатня допомога надається патентознавцям на підприємствах тощо.

Предметним було обговорення проекту постанови Кабінету Міністрів України "Про затвердження Порядку сплати зборів за дії, пов'язані з охороною прав на об'єкти інтелектуальної власності", коли доповідач Юрій Капіца, кандидат юридичних наук, директор Центру інтелектуальної власності та передачі технологій НАН України, пояснив причини розгляду цього правового документу. Він наголосив на тому, що прийняття постанови, якою передбачено для національного заявника збільшення розміру зборів у шестеро, призведе до припинення підтримки чинності значної кількості охоронних документів, зменшення подачі заявок на видачу охоронних документів на об'єкти інтелектуальної власності та матиме негативні наслідки як для винахідництва в Україні, так і для науково-технологічного розвитку країни.

Юрій Капіца зазначив також, що при затвердженні діючого Порядку сплати зборів за дії, пов'язані з охороною прав на об'єкти інтелектуальної власності (затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2004 р. № 1716) враховувалися вимоги Угоди про торговельні аспекти права інтелектуальної власності Світової організації торгівлі та інших міжнародних договорів, учасником яких є Україна.

Прийнято рішення звернутися до Кабінету Міністрів України з рекомендаціями залишити чинним Порядок сплати зборів, затверджений постановою КМУ від 23 грудня 2004 р. № 1716. Запропоновано надалі, у разі підготовки змін та доповнень до Порядку сплати зборів, залучати до їх розробки та погодження фахівців НАН України, галузевих академій наук, МОНУ, Міністерства охорони здоров'я, Мінпромполітики, Держпідприємництва України, а також представників громадських об'єднань, винахідників, патентних повірених.

Голові Ради Валерію Кухарю доручено надіслати листа до Прем'єр-міністра України Юлії Тимошенко.

Не менш важливими для інтелектуального розвитку суспільства в Україні є проблеми, яких торкнувся у доповіді "Про заходи щодо реалізації положень Болонського процесу у системі вищої освіти України" член Громадської ради, член-кореспондент АПН України Володимир Пархоменко, який представляє Всеукраїнську асоціацію інформаційних служб. Учасники засідання зазначили, що це питання є достатньо складним, дуже важливим і доручили членам Ради М. З. Згуровському та В. Д. Пархоменку підготувати його для розгляду на наступному засіданні, залучивши якомога широкое коло освітян.

Революційними постади питання, підняті членом Ради, членом-кореспондентом НАН України Михайлом Ільченком (Рада проректорів з наукової роботи вищих навчальних закладів України), у доповіді стосовно проекту Указу Президента України "Про автономію вищих навчальних закладів". Деякі пропозиції щодо самостійності та самоокупності вищих навчальних закладів прозвучали уперше. Тому учасники Ради вважають, що прийняття зазначеного проекту Указу Президента України сприятиме подальшій розбудові системи національної вищої освіти, впровадженню нової ідеології в підходах до організації навчальної, наукової, методичної та виховної роботи у вузах, а також надходженню додаткових інвестицій у розвиток освітньої діяльності навчальних закладів.

Голова Громадської ради, академік НАН України Валерій Кухар (Федерація вчених України), запропонував керівництву МОНУ звернутися до уряду з рекомендацією щодо відновлення діяльності технопарків в Україні. Шляхи вирішення цього питання неодноразово обговорювалися громадськістю, зокрема на засіданні "круглого столу", проведеного 14 червня у Міністерстві освіти і науки України під час розгляду "Концепції науково-технічного та інноваційного розвитку".

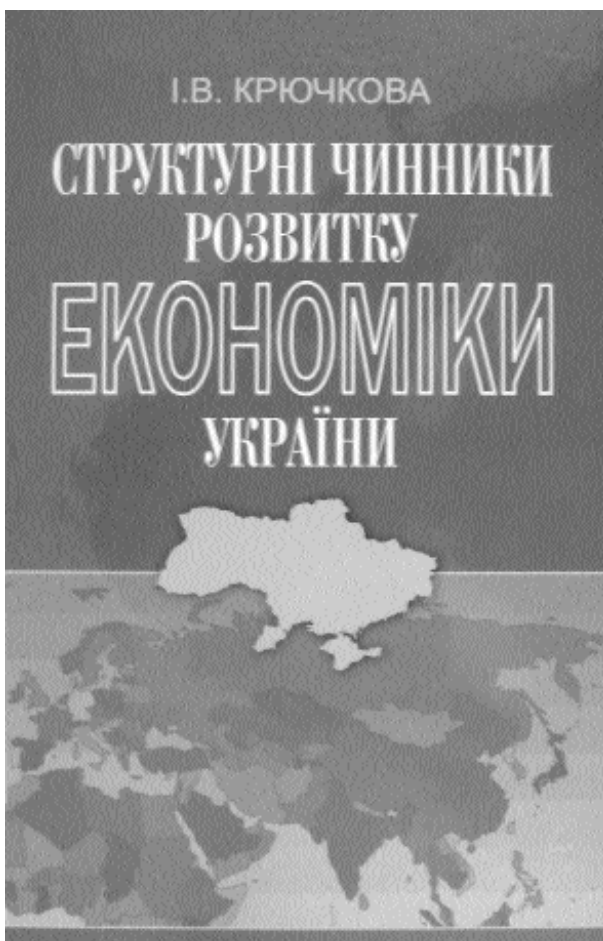
Учасники засідання запропонували розглянути це важливе питання на засіданні РНБО України.

Наприкінці засідання голова Ради Валерій Кухар запросив учасників взяти участь у роботі форуму "Майбутнє науки – майбутнє України", який відбудеться 8 липня 2005 року.

**Володимир Лало,  
Лариса Демидова  
Державне підприємство "Український  
інститут промислової власності"  
(Укрпатент)**

**У 2004 РОЦІ У ВИДАВНИЦТВІ  
“НАУКОВА ДУМКА”**

**ВИЙШЛА З ДРУКУ МОНОГРАФІЯ**



У монографії подаються результати дослідження трансформаційного етапу розвитку економіки України. Розглянуто теорії економічної динаміки та циклічності розвитку з акцентом на ролі структурних чинників трансформаційних перетворень та інституційних складових у забезпеченні підвищення конкурентоспроможності економіки.

Особливу увагу приділено структурним зрушенням, що супроводжують процес трансформації постсоціалістичних економік у ринкові. Досліджено закономірності прояву загального закону структурування - Закону золотого перетину в економічних процесах на макро- та мікро рівні.

Досліджено особливості ринкових перетворень в Україні: розглянуто етапи, чинники та наслідки трансформації; визначено роль цінової конкурентоспроможності в започаткуванні економічного зростання; проаналізовано структурні зміни в зовнішній торгівлі тощо. Окремий розділ присвячено аналізу та методології оцінки тіньового сегмента економіки України на всіх етапах обороту ВВП. За результатами досліджень зроблено висновки та рекомендації щодо підвищення ефективності економічної політики, а саме: гармонізації макропропорцій, підвищення конкурентоспроможності підприємницького середовища та інвестиційної привабливості вітчизняної економіки.

Для фахівців з питань макроекономіки, в тому числі макромоделювання, вчених-економістів, викладачів та студентів економічних вузів.

### ІНФОРМАЦІЯ ДЛЯ АВТОРІВ ЖУРНАЛУ "НАУКА ТА ІННОВАЦІЇ"

В журналі "Наука та інновації" друкуються статті та короткі повідомлення, що містять відомості про наукові дослідження, технічні розробки, перспективні бізнес- та інноваційні проекти, ноу-хау у наступних напрямках:

1. Загальні питання сучасної науково-технічної та інноваційної політики
  - 1.1. Законодавчі та методологічні основи
  - 1.2. Економічні аспекти
  - 1.3. Дискусійна трибуна
2. Наукові основи інноваційної діяльності
  - 2.1. Приладобудування
  - 2.2. Телекомунікації, зв'язок і навігація
  - 2.3. Нанотехнології та функціональні матеріали
  - 2.4. Транспортні і будівельні технології
  - 2.5. Сільськогосподарські і аграрні технології
  - 2.6. Екологічні технології і біотехнології
  - 2.7. Енерго- і ресурсозбереження
3. Світ інновацій
  - 3.1. Ноу-хау і трансфер технологій
  - 3.2. Інноваційні структури
  - 3.3. Мовою цифр
  - 3.4. Оперативна інформація науково-інноваційної сфери

В журналі також друкуються науково-технічні та тематичні рекламні матеріали, повідомлення про конференції, вихід з друку наукових видань за вказаною тематикою, про профільні та спеціалізовані виставки.

**Рукопис статті** подається автором у двох екземплярах українською, російською або англійською мовами.

**До рукопису додається:**

Компакт-диск або дискета з текстовим файлом та файлами рисунків (електронна копія матеріалів може бути направлена до редакції за допомогою електронної пошти).

**Направлення:** офіційний лист, підписаний керівником установи, де виконувалась робота.

**Експертний висновок:** висновок експертної комісії про можливість відкритого публікування представленої роботи.

**Угода** про передачу авторського права на друк статті редакції журналу, для того, щоб сприяти широкому розповсюдженню наукової інформації. Форму угоди можна отримати в редакції журналу.

**Правила оформлення рукопису статті:**

**Титульна сторінка** подається обов'язково українською, російською та англійською мовами:

1. Назва статті, прізвище(а) та ініціали автора(ів).
2. Установа, повна поштова адреса, номер телефону, номер факсу, адреса електронної пошти всіх автора(ів).
3. Резюме: 200 слів максимум.
4. Ключові слова: не більше восьми слів.

**Текст:** повинен друкуватися шрифтом 12 пунктів через два інтервали на білому папері формату А4. Назва статті, а також заголовки підрозділів друкуються прописними буквами та виділяються напівжирним шрифтом.

**Рівняння:** необхідно друкувати у відповідних редакторах. Статті із вписаними від руки рівняннями до друку не приймаються. Необхідно давати визначення величин, які використовуються в тексті вперше.

**Таблиці:** подаються на окремих сторінках. Повинні бути виконані у відповідних табличних редакторах або представлені в текстовому вигляді з використанням текстових роздільників (крапка, кома, кома з крапкою, знак табуляції). Використання символів псевдографіки для оформлення таблиць не припускається.

**Список літератури:** друкується через два інтервали та нумерується послідовно у порядку їх появи в тексті статті. Неприпустимі посилання на неопубліковані та незавершені роботи.

Бібліографічний опис повинен відповідати титульній сторінці видання. Назви статей, а також монографій, збірників, праць нарад, тезисів доповідей, авторефератів дисертацій та препринтів вказуються повністю. Для статей обов'язково вказуються назва статті, назва видання, рік, том, номер, початкова та кінцева сторінки, для монографій – назва, місце видання (місто), видавництво, рік видання, загальна кількість сторінок.

## Інформаційний розділ

**Підписи до рисунків і таблиць:** друкуються в рукопису після літературних посилань через два інтервали.

**Примітки:** припускається використання текстових приміток тільки у випадку необхідності.

**Ілюстрації:** Приймаються до друку тільки високоякісні ілюстрації. Підписи та символи повинні бути надруковані. Не приймаються до друку негативи, слайди. Не рекомендується використання напівтонів – важливо представляти ілюстрації з максимальним чорно-білим контрастом.

**Рисунки:** кожен друкується на окремій сторінці. Повинні мати розмір відповідний формату журналу: не більше 160 мм на 200 мм. Текст на рисунках повинен бути виконаний шрифтом 10 пунктів. На графіках одиниці виміру вказуються через кому (а не в дужках). Усі рисунки (ілюстрації) нумеруються в порядку їх розташування в тексті. Частини рисунків нумеруються літерами: (а), (б), ... . Не припускається внесення номера та підпису до рисунку безпосередньо в рисунок. На зворотній стороні рисунка олівцем пишеться назва статті, автор (автори), номер рисунка. "Верхні" частини рисунків повинні бути позначені стрілкою.

**Фотографії:** повинні бути представлені на глянцевому білому папері. Фотографії, які вже є растрованими (у напівтонах), будуть розглядатися як рисунки.

Загальний об'єм тез – до 2 стор. (кількість ілюстрацій – до 2), загальний об'єм коротких повідомлень – до 5 стор. (кількість ілюстрацій – до 5), загальний об'єм статей – до 20 стор. (кількість ілюстрацій – до 10).

### Вимоги до електронної копії статті:

1. Електронна копія (дискета – 3,5, ZIP-диск, CD або магнітооптичний диск) матеріалу представляється одночасно з наданням твердої копії статті, рисунків та рекламного матеріалу.

2. Для тексту слід використовувати наступні формати – MS Word 6.0 (або новіші версії) (doc).

3. Рисунки приймаються у форматах – EPS, TIFF (кольорова палітра CMYK) з роздільною здатністю 300 dpi. Рисунки, які виконані за допомогою програмних пакетів математичної та статисти-

чної обробки, повинні бути конвертовані у вказані графічні формати.

4. Фотографії та кольорові рекламні матеріали приймаються у форматі TIFF (кольорова палітра CMYK) з роздільною здатністю 300 dpi.

5. Надписи та тексти в графічних файлах повинні бути переведені в криві.

Рекламні матеріали приймаються до друку після підписання Договору про розміщення реклами та сплати рахунка-фактури на її розміщення на сторінках журналу.

Оригінал-макети рекламних матеріалів подаються до редакції роздрукованими у двох екземплярах та на електронному носії (дискета – 3,5, ZIP-диск, CD або магнітооптичний диск). Файли розміром до 1 Mb можуть бути відправлені до редакції за допомогою електронної пошти.

Оригінал-макети приймаються у наступних форматах: Photoshop-5.5-7.0 (TIFF), Corel-7-11 (CDR), Illustrator-8 (EPS) QXPress-4.0 (QXD). Фотоматеріали – у форматі TIFF з роздільною здатністю 300 dpi, кольорова палітра – CMYK. Шрифти – у кривих.

Розміри макетів мають бути узгоджені з рекламним відділом редакції журналу.

Максимальний строк представлення макетів – не пізніше 20 днів до дати подачі номеру журналу до друку.

Відповідальність за достовірність інформації в матеріалах, надрукованих журналом, несе автор або замовник матеріалу.

Відповідальність за рекламну інформацію, надруковану в журналі, несе рекламодавець.

Редакція журналу приймає замовлення на виготовлення рекламного матеріалу та підготовку спеціалізованих публікацій в журналі за домовленістю із замовником.

Редакція також приймає замовлення на випуск рекламної продукції, не пов'язаної з конкретною тематикою номера. Автори, або їх спонсори, повинні оплатити вартість відповідних розробок.

Для отримання необхідної Вам додаткової інформації контакуйте з відповідальним секретарем редакції.