

72  
П. 75

НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ім. ШЕВЧЕНКА  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ ОСЕРЕДОК



# ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НТШ

Число



1(1)-2008



**SHEVCHENKO SCIENTIFIC SOCIETY  
DEPARTMENT OF IVANO-FRANKIVSK**

**НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ім. ШЕВЧЕНКА  
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ ОСЕРЕДОК**

**PRECARPATHIAN BULLETIN  
OF THE SHEVCHENKO  
SCIENTIFIC SOCIETY**

**ПРИКАРПАТСЬКИЙ  
ВІСНИК НТШ**

**Number**

**Число**

**1(1)-2008**

**1(1)-2008**

**НБ ІІІУС**



743426

Ivano-Frankivsk  
2008

Івано-Франківськ  
2008

# ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НТШ

Головний редактор – д. т. н. В.М.Мойсишин

**Число**  
**1(1)·2008**

У випусках серії “Число” публікуються наукові матеріали за напрямками:  
Математика та механіка  
Фізика і хімія твердого тіла  
Нафтогазова справа  
Інформаційні технології  
Економіка та організація виробництва

**Редактори:** д.т.н. В.С.Бойко; д.т.н., чл.-кор. НАНУ Є.І.Крижанівський; д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ А.А.Мартинюк (Київ); д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ Б.К.Остафійчук; д.х.н. Д.М.Фреїк.

**Відповідальні секретарі:** к.ф.-м.н. М.М.Осипчук; к.е.н. Т.М.Оришин; О.Л.Соколов.

## Редакційна колегія:

к.ф.-м.н. С.С.Гулька, к.ф.-м.н. С.І.Гургула, д.ф.-м.н. А.Ю.Лучка (Київ), д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ М.О.Перестюк (Київ), д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ Б.Й.Пташник (Львів), д.ф.-м.н. О.М.Станжицький (Київ), д.ф.-м.н. С.І.Трофимчук (Галька, Чилі);

д.ф.-м.н. Д.І.Боднар (Тернопіль), д.ф.-м.н. А.В.Загороднюк, д.ф.-м.н. О.В.Лопушанський (Львів), д.ф.-м.н. А.М.Плічко (Кіровоград), к.ф.-м.н. Я.І.Савчук, д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ Ю.С.Самойленко (Київ);

д.ф.-м.н. О.Д.Артемович, д.ф.-м.н. Т.О.Банах (Львів), д.ф.-м.н. Р.І.Григорчук (Техас, США), д.ф.-м.н. Ю.В.Дрозд (Київ), д.ф.-м.н. М.М.Зарічний (Львів), д.ф.-м.н. В.К.Маслюченко (Чернівці), к.ф.-м.н. О.Р.Никифорчин, д.т.н. Ю.Є.Обжерін (Севастополь), д.ф.-м.н. А.П.Петравчук (Київ), д.ф.-м.н. А.Н.Хомченко (Херсон), д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ В.В.Шарко (Київ);

д.ф.-м.н. Ю.В.Козаченко (Київ), д.ф.-м.н. Б.І.Копитко (Львів), д.ф.-м.н. М.М.Леоненко (Кардіф, Великобританія), д.ф.-м.н. В.І.Масол (Київ), д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ М.О.Портенко (Київ);

д.т.н. В.І.Векерик, д.т.н. І.В.Кузьо (Львів), д.т.н. М.В.Лисканич, д.ф.-м.н. Н.В.Нікітіна (Київ), д.ф.-м.н. Г.Т. Сулим (Львів), к.ф.-м.н. І.В.Цідило.

д.ф.-м.н. М.О.Галушак, д.ф.-м.н. Г.А.Ільчик (Львів), д.ф.-м.н. І.А.Климишин, д.ф.-м.н. Ю.А.Куницький (Київ), д.т.н. П.І.Мельник, д.ф.-м.н. М.А.Рувінський, д.ф.-м.н., чл.-кор. НАНУ І.В.Стасюк (Львів), д.ф.-м.н. З.В.Стасюк (Львів), д.ф.-м.н. В.О.Шендеровський (Київ);

д.х.н. О.І.Аксiментьева (Львів), д.х.н. Б.М.Гуцуляк, д.х.н. В.В.Лобанов (Київ), д.х.н. І.Ф.Миронюк, д.т.н. Г.О.Сіренко, д.х.н. В.М.Томашик (Київ), д.х.н. О.В.Шийчук;

д.т.н. Р.М.Говдяк (Київ), д.т.н. В.Я.Грудз, д.т.н. О.Т.Драганчук (Київ), д.т.н. О.М.Карпаш, д.т.н. Б.В.Копей, д.т.н. Ю.Д.Петрина, д.т.н. М.Д.Середюк, д.т.н. Д.Ф.Тимків, д.т.н. Л.С.Шлапак;

д.т.н. Б.І.Адасовський, д.т.н. М.І.Горбійчук, д.т.н. Л.М.Заміховський, д.т.н. В.П.Калявін (Санкт-Петербург, Росія), д.т.н. І.С.Кісіль, д.т.н. В.С.Костишин, д.т.н. Л.С.Петришин, д.т.н. Г.Н.Семенцов, д.т.н. С.Ф.Теленик (Київ), д.т.н. В.М.Юрчишин;

д.е.н. І.Ф.Балажук, д.е.н. І.С.Блажук, д.е.н. М.О.Данилюк, д.е.н. О.О.Лапко (Київ), д.е.н. М.Д.Романюк, д.е.н. В.І.Савич, д.е.н. І.Г.Ткачук.

НАУКОВА БІБЛІОТЕКА

Інв. №

43426

# ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НАУКОВОГО ТОВАРИСТВА ім. ШЕВЧЕНКА 1(1)·2008

Науковий журнал  
Видається у чотирьох  
серіях

**ЧИСЛО, СЛОВО,  
ДУМКА, ПУЛЬС**  
(по одному випуску  
кожної серії щороку)

Заснований 2008 року  
Реєстраційне свідоцтво  
КВ № 14628-3599  
від 10 жовтня 2008 р.  
видане Міністерством  
юстиції України

## ЗАСНОВНИКИ:

Івано-Франківський  
осередок Наукового  
товариства ім. Шевченка

Прикарпатський  
національний університет  
імені Василя Стефаника

Івано-Франківський  
національний технічний  
університет нафти і газу

Івано-Франківський  
національний медичний  
університет

## ЗМІСТ

### МАТЕМАТИКА ТА МЕХАНІКА

**С.І.Гургула, І.Й.Перкатюк**  
Про другий метод Ляпунова в системах  
з імпульсною дією .....9

**С.С.Гулька**  
Усреднювання в нелінійних інтегро-  
диференціальних системах із подвійною  
імпульсною дією ..... 16

**Р.А.Заторський**  
Скалярний добуток вектора на  
парадетермінант трикутної матриці та  
його застосування .....22

**М.М.Осипчук**  
Дифузійні процеси та деякі способи їх  
побудови й застосування .....31

**Я.І.Савчук**  
Мероморфні функції скінченного  
порядку із заданою множиною  
валіронівських дефектних значень .....37

**В.М.Мойсишин**  
Динамічна стійкість низу бурильної  
колони без проміжних та з проміжними  
елементами в компоновці .....43

**В.П.Нісонський, В.М.Шопа, І.І.Герєга**  
Математичне моделювання  
віброударних агрегатів із ланцюгово-  
розгалуженим способом з'єднання  
твердих тіл .....56

**С.О.Камаєва**  
Дослідження стаціонарного поля  
в антипризмі .....64

АДРЕСА РЕДАКЦІЇ

76025  
м. Івано-Франківськ,  
вул. Шевченка, 79  
Івано-Франківський  
осередок Наукового  
товариства ім. Шевченка  
тел. (380-3422) 4-21-23  
e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

Відповідальність за  
достовірність наведених  
у статтях даних несуть  
автори публікацій

Передрук – тільки  
з дозволу редакції

Друкується за ухвалою  
Президії Івано-Франків-  
ського осередку Науко-  
вого товариства  
ім. Шевченка

© Івано-Франківський  
осередок НТШ, 2008,

© Видавництво “Плай”  
ЦІТ Прикарпатського  
національного універ-  
ситету імені Василя  
Стефаніка, 2008

**Д.М.Фреїк**  
Напівпровідникові наноматеріали,  
нанотехнології та наноелектроніка.....74

**М.О.Галушак**  
Механізми дефектоутворення  
у напівпровідникових плівках  
халькогенідів свинцю й  
олова.....112

**Б.К.Остафійчук, В.Д.Федорів,  
І.П.Яремій, С.І.Яремій**  
Процеси старіння приповерхневих  
шарів монокристалів ГГГ, модифікова-  
них імплантацією іонів  $He^+$  .....141

**С.П.Новосядлий, В.М.Бережанський**  
Джерела іонів для формування  
шаруватих структур ВІС .....151

**М.А.Рувінський, Б.М.Рувінський**  
Спін-орбітальна взаємодія і квантовий  
напівпровідниковий дріт у магнітному  
полі .....159

**І.Т.Когут**  
Локальні КНІ-структури –  
перспективний матеріал для  
інтегрованих мікросистем-на-  
кристалі.....164

**В.І.Голота**  
Моделювання електронної оптики  
автоемісійних мікрокатодів.....173

**С.П.Новосядлий, О.Б.Фрик**  
Електрофізичне діагностування  
надійності субмікронних структур  
великих інтегральних схем за ефектами  
нелінійності їх характеристик.....182

**А.Р.Варцаб'юк**  
Аналіз оптичних втрат у полікремнієвих хвилеводах .....191

НАФТОГАЗОВА СПРАВА

**Р.С.Яремійчук**  
Шлях прискорення розробки нафтогазових родовищ  
українського шельфу Чорного і акваторії Азовського морів ..... 197

**Я.С.Коцкулич**  
Стан якості первинного розкриття продуктивних пластів  
з аномально низькими тисками .....203

**Р.М.Кондрат, О.Р.Кондрат**  
Нові технології інтенсифікації видобування природного газу  
та газового конденсату з родовищ .....212

**В.С.Бойко, Р.В.Бойко**  
Проблеми та ефективність упровадження горизонтальних  
свердловин у газо- і нафтовидобувній галузі .....221

**В.Я.Грудз**  
Стан і проблеми розвитку газотранспортної системи України .....235

**Л.М.Заміховський, Л.О.Штаєр**  
Виявлення місць витoku вуглеводнів із трубопроводів .....239

**Д.Ф.Тимків, Р.Г.Онацко, Д.Д.Матієшин**  
Аналіз математичних моделей регулювання режиму роботи  
складних газотранспортних систем .....247

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

**Л.М.Заміховський, Р.М.Матвієнко**  
Створення комп'ютеризованої системи контролю і тренажу  
операторів газоперекачувальних агрегатів .....259

**Л.М.Заміховський, В.П.Якубовський**  
Аналіз вимог до програмного забезпечення систем тестування  
рівня знань студентів .....268

## ЕКОНОМІКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА

**М.О.Данилюк, Л.Р.Семотюк**  
Аналіз ринку полімерів та напрями посилення активності його учасників ..... 275

**Т.М.Орищин, О.М.Орищин**  
Соціально-економічні та правові проблеми запровадження страхової медицини в Україні в контексті зарубіжного досвіду .....285

**М.О.Данилюк, О.Р.Волошинюк**  
Про нематеріальну мотивацію працівників компаній в умовах кризи .....297

**І.В.Перезова**  
Використання показника чисельності осіб без визначеного місця проживання серед працездатного населення країни під час визначення ефективності використання робочої сили .....305

## РЕЦЕНЗІЇ, ІНФОРМАЦІЯ

**В.М.Мойсишин**  
Про доробок Миколи Курпеля .....310

**Р.С.Яремійчук**  
Мої книги .....315

**Відомості про авторів** .....333

# Математика та механіка

УДК 517.925.3

## ПРО ДРУГИЙ МЕТОД ЛЯПУНОВА В СИСТЕМАХ З ІМПУЛЬСНОЮ ДІЄЮ

**С.І. Гургула<sup>1</sup>, І.Й. Перкатюк<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. (03422) 42123,

e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
тел. (0342) 596016,

e-mail: [stat@pu.if.ua](mailto:stat@pu.if.ua)

Досліджено питання стійкості розв'язків систем диференціальних рівнянь з імпульсною дією у фіксовані моменти часу. Одержано критерії стійкості, асимптотичної стійкості та нестійкості розв'язків таких систем.

**Ключові слова:** система диференціальних рівнянь, імпульсна дія, функція Ляпунова, стійкість за Ляпуновим.

Розглядається система диференціальних рівнянь з імпульсною дією у фіксовані моменти часу

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x), \quad t \neq t_i, \quad (1)$$

$$\Delta x|_{t=t_i} \equiv x(t_i + 0) - x(t_i) = I_i(x),$$

де  $t$  – час,  $t \geq t_0$ ,  $x = (x_1, x_2 \dots x_n) \in R^n$ ,  $f = (f_1, f_2 \dots f_n) \in R^n$ ,

$I_i \in R^n$ ,  $i = 1, 2 \dots$ . Така система є математичною моделлю процесів, які описуються звичайними диференціальними рівняннями і у своїй еволюції піддаються дії короткочасних сил. При математичному описі такого роду процесів тривалістю дії збурюючих сил нехтують, вважаючи, що вони носять характер миттєвих “імпульсів” (“поштовхів”, “ударів”). У результаті приходять до системи вигляду (1), розв'язки якої мають розриви першого роду в моменти часу  $t_i$ , при цьому розв'язки

вважаються неперервними зліва. Стрибки розв'язків у моменти часу  $t_i$  характеризуються функціями  $I_i(x)$ .

Одним із важливих питань у ході дослідження систем диференціальних рівнянь з імпульсною дією є питання стійкості розв'язків. Зауважимо, що дослідження стійкості довільного розв'язку системи вигляду (1), як і у випадку системи безімпульсної дії, можна звести до дослідження стійкості нульового розв'язку деякої іншої системи з імпульсною дією. Тому надалі вважатимемо, що функція  $f(t, x)$  визначена в області

$$Z = \{t \geq t_0, x \in \bar{J}_h\},$$

де  $\bar{J}_h = \{x \in R^n, \|x\| \leq h, h > 0\}$  і задовільняє в ній умови, що забезпечують існування розв'язків системи, функції  $I_i(x)$  визначені і неперервні в  $\bar{J}_h$  та  $f(t, 0) \equiv 0$  при  $t \geq t_0$ ,  $I_i(0) = 0$ ,  $i = 1, 2, \dots$ , і на стійкість досліджується тривіальний розв'язок системи (1), який при наведених припущеннях у неї існує. Послідовність моментів часу  $\{t_i\}$  вважається строго зростаючою й такою, що  $t_i \rightarrow \infty$  при  $i \rightarrow \infty$ .

Основним методом дослідження питання стійкості розв'язків систем диференціальних рівнянь є другий, або прямий метод Ляпунова, який дає змогу вирішувати дане питання, не розв'язуючи системи. Зауважимо, що ми користуватимемось означенням стійкості за Ляпуновим. Функція Ляпунова  $V(t, x)$  всюди вважається визначеною в області  $Z$ , скалярною і неперервно диференційованою по всіх своїх аргументах.

Очевидно, характер стійкості тривіального розв'язку системи (1) значною мірою визначається характером стійкості тривіального розв'язку відповідної системи безімпульсної дії:

$$\frac{dx}{dt} = f(t, x). \quad (2)$$

Для системи (2) питання стійкості вирішується шляхом вивчення поведінки функції Ляпунова  $V(t, x)$  уздовж розв'язків системи. Для цього розглядається похідна за часом функції  $V(t, x)$ , взята в силу системи

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\partial V}{\partial t} + \sum_{j=1}^n \frac{\partial V}{\partial x_j} \cdot f_j \equiv \frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad} V, f \rangle.$$

Але для вирішення питання стійкості тривіального розв'язку системи (1) розгляду лише  $V$  і  $\frac{dV}{dt}$  недостатньо. Легко навести приклади, коли розв'язок  $x \equiv 0$  системи (2) стійкий чи асимптотично стійкий, а розв'язок  $x \equiv 0$  системи (1) нестійкий, або навпаки. Поряд із  $V$  і  $\frac{dV}{dt}$ , які характеризують поведінку розв'язків на проміжках неперервності, необхідно також розглядати функції

$$V(t_i, x + I_i(x)),$$

які характеризують стрибки розв'язків у моменти часу  $t_i$ . Крім того, важливою характеристикою, яка впливає на стійкість тривіального розв'язку, є довжина проміжків неперервності розв'язків.

Відомо, що практично придатні критерії стійкості, асимптотичної стійкості чи нестійкості можна одержати, якщо використовувати незалежні від  $i$  оцінки наведених вище величин; самі ж критерії повинні мати вигляд нерівностей, які пов'язують між собою ці оцінки. Надалі оціночне (зверху чи знизу) для  $\frac{dV}{dt}$  використовується функція від  $V$ , для  $V(t_i, x + I_i(x))$  – функція від  $V(t_i, x)$ , а для довжини проміжків неперервності – константи. Зауважимо, що функції  $\varphi(s)$  і  $\psi(s)$ , які фігуруватимуть у перших двох оцінках, вважаються неперервними й такими, що  $\varphi(0) = \psi(0) = 0$  і  $\varphi(s) > 0$ ,  $\psi(s) > 0$  при  $s > 0$ .

Справедливі такі твердження.

**Теорема 1.** Нехай для системи (1) існує додатно визначена функція Ляпунова  $V(t, x)$  така, що в області  $Z$  виконуються нерівності

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad} V, f \rangle \leq -\varphi(V), \quad (3)$$

$$V(t_i, x + I_i(x)) \leq \psi(V(t_i, x)), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (4)$$

а також існує  $\theta_1 > 0$ , таке, що для всіх  $i = 1, 2, \dots$

$$t_i - t_{i-1} \geq \theta_1. \quad (5)$$

Тоді, якщо при деякому  $a_0 > 0$  для всіх  $a \in (0, a_0]$  виконується нерівність

$$\int_a^{\psi(a)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \theta_1, \quad (6)$$

то розв'язок  $x \equiv 0$  системи стійкий. Причому він буде асимптотично стійким, якщо нерівність (6) виконується в більш сильній формі:

$$\int_a^{\psi(a)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \theta_1 - \gamma, \quad \gamma > 0. \quad (7)$$

При доведенні цієї й наступних теорем розглядається функція  $v(t) = V(t, x(t))$ , де  $x(t)$  – розв'язок системи. У силу (3)  $v'(t) \leq -\varphi(v(t))$ ,  $t \neq t_i$ . Звідси  $\frac{v'(t)}{\varphi(v(t))} \leq -1$ . Інтегруючи в межах  $[t, t_{i+1}]$ ,

маємо  $\int_t^{t_{i+1}} \frac{v'(t) dt}{\varphi(v(t))} \leq -(t_{i+1} - t)$ . Після заміни  $v(t) = s$ , отримаємо

$\int_{v(t_{i+1})}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq t_{i+1} - t_i$ . Із цієї нерівності й нерівності (6) з урахуванням не-

рівностей (4) і (5) легко одержати  $\int_{v(t_{i+1}+0)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq 0$ . Це означає, що

$v(t_{i+1}+0) \leq v(t_i+0)$ ,  $i = 0, 1, 2 \dots$ . Якщо врахувати, що  $v(t)$  спадає на проміжках неперервності, то очевидно, що  $v(t) \leq v(t_0)$  при  $t \geq t_0$ . Це означає, що розв'язок  $x \equiv 0$  системи стійкий. Якщо підсилити нерівність (6) (нерівність (7)), то легко довести, що  $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$ . Це означає, що тривіальний розв'язок системи асимптотично стійкий.

Зауважимо, що в силу (3) тривіальний розв'язок відповідної системи безімпульсної дії (2) асимптотично стійкий. Як свідчать нерівності (4), (5) і (6), щоб він залишився стійким і в системі (1), імпульси повинні бути не занадто сильними й не занадто частими.

**Теорема 2.** Нехай для системи (1) існує додатно визначена функція Ляпунова  $V(t, x)$  така, що в області  $Z$  виконуються нерівності

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad} V, f \rangle \leq \varphi(V), \quad (8)$$

$$V(t_i, x + I_i(x)) \leq \psi(V(t_i, x)), \quad i = 1, 2 \dots, \quad (9)$$

а також існує  $\theta_2 > 0$ , таке, що для всіх  $i = 1, 2 \dots$

$$t_i - t_{i-1} \leq \theta_2. \quad (10)$$

Тоді, якщо при деякому  $a_0 > 0$  для всіх  $a \in (0, a_0]$  виконується нерівність

$$\int_{\varphi(a)}^a \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \theta_2, \quad (11)$$

то розв'язок  $x \equiv 0$  системи стійкий. Причому він буде асимптотично стійким, якщо замість нерівності (11) виконується нерівність

$$\int_{\varphi(a)}^a \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \theta_2 + \gamma, \quad \gamma > 0. \quad (12)$$

Як видно з нерівності (8), тривіальний розв'язок системи (2) міг би бути і нестійким. Для того щоб у системі (1) він був стійким, як показують нерівності (9), (10) і (11), імпульси повинні бути досить частими й досить сильними.

Перейдемо до теорем про нестійкість. Перша з них відповідає випадку, коли тривіальний розв'язок системи (2) міг би бути стійким чи навіть асимптотично стійким; друга – випадку, коли він нестійкий. Функція Ляпунова, яка фігурує в цих теоремах, має такі властивості:

а) область додатності  $V(t, x)$   $D = \{(t, x) \in Z, V(t, x) > 0\}$  при всякому  $t \geq t_0$  має ненульовий відкритий переріз гіперплощиною  $t = \text{const}$ , який дотикається до початку координат;

б) в області  $D$   $V(t, x)$  обмежена; позначимо  $a_0 = \sup_{(t, x) \in D} V(t, x)$ .

**Теорема 3.** Нехай для системи (1) існує функція Ляпунова  $V(t, x)$ , яка володіє властивостями а) і б) і така, що в області  $D$  виконуються нерівності

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad} V, f \rangle \geq -\varphi(V), \quad (13)$$

$$V(t_i, x + I_i(x)) \geq \psi(V(t_i, x)), \quad i = 1, 2 \dots, \quad (14)$$

а також має місце умова (10). Тоді, якщо функції  $\varphi(s)$  і  $\psi(s)$  такі, що при деякому  $\gamma > 0$  для всіх  $a \in (0, a_0]$

$$\int_a^{\psi(a)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \theta_2 + \gamma, \quad (15)$$

то тривіальний розв'язок системи буде нестійким.

Довести цю теорему можна таким чином. Згідно із властивістю а) функції Ляпунова для як завгодно малого  $\delta > 0$  знайдеться  $x_0$ , таке, що  $0 < \|x_0\| < \delta$  і  $V(t_0, x_0) > 0$ . Покажемо, що розв'язок  $x(t)$  із початковою умовою  $x(t_0) = x_0$  з часом вийде за межі кулі  $\bar{J}_h$ . Якщо припустити супротивне, то легко довести, що  $(t, x(t)) \in D$  при  $t \geq t_0$ . Звідси випливає, що функція  $v(t) = V(t, x(t))$  буде обмеженою. Як і при доведенні теореми 1, з нерівності (13) з урахуванням (10) одержуємо  $\int_{v(t_{i+1}+0)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \theta_2$ ,  $i = 0, 1, 2 \dots$  Із цієї нерівності й нерівності (15), ура-

ховуючи (14), маємо  $\int_{v(t_i+0)}^{v(t_{i+1}+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \gamma$ ,  $i = 0, 1, 2 \dots$  Це означає, що

послідовність  $\{v(t_i+0)\}$  є зростаючою, а також обмеженою (скажімо, числом  $a_0$ ). Отже, вона буде збіжною. Позначивши  $c = \min_{v(t_0) \leq s \leq a_0} \varphi(s) > 0$ ,

з останньої нерівності легко одержуємо для всіх  $i$   $v(t_{i+1}+0) - v(t_i+0) \geq \gamma c = \text{const}$ , що суперечить збіжності послідовності  $\{v(t_i+0)\}$ .

Як свідчать нерівності (10), (14) і (15), імпульсні збурення в цьому випадку повинні бути досить частими і досить сильними.

**Теорема 4.** Нехай для системи (1) існує функція Ляпунова  $V(t, x)$ , наділена властивостями а) і б) і така, що в області  $D$  виконуються нерівності

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad} V, f \rangle \geq \varphi(V), \quad (16)$$

$$V(t_i, x + I_i(x)) \geq \psi(V(t_i, x)), \quad i = 1, 2 \dots, \quad (17)$$



а також має місце умова (5). Тоді, якщо функції  $\varphi(s)$  і  $\psi(s)$  такі, що при деякому  $\gamma > 0$  для всіх  $a \in (0, a_0]$

$$\int_{\varphi(a)}^a \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \theta_1 - \gamma, \quad (18)$$

то розв'язок  $x \equiv 0$  системи буде нестійким.

Зауважимо, що при цьому, як видно з нерівностей (5), (17) і (18), імпульси повинні бути не дуже частими і не дуже сильними.

Введемо до розгляду функцію  $i(t)$ ,  $t \geq t_0$ , що визначає кількість імпульсних збурень на проміжку  $[t_0, t]$ , тобто  $i(t) = i$ , якщо  $t_i < t \leq t_{i+1}$ . Тоді функція

$$\frac{i(t)}{t-t_0} \quad (19)$$

означатиме відносну частоту імпульсних збурень, а обернена до неї величина може слугувати оцінкою для середньої довжини проміжку неперервності розв'язків системи. Властивості функції (19) відіграють важливу роль при дослідженні питання стійкості нульового розв'язку системи (1).

Зокрема, якщо функція (19) така, що при деякому  $T_0 > t_0$  для всіх  $t > T_0$  виконується умова

$$\frac{i(t)}{t-t_0} \leq p, \quad p = \text{const}, \quad (20)$$

то теореми 1 і 4 залишаються справедливими, якщо в нерівностях (6), (7) і (18) замінити  $\mathcal{A}_1$  на  $\frac{1}{p}$  (зрозуміло, що при цьому умова (5) буде зайвою).

Якщо ж функція (19) така, що при деякому  $T_0 > t_1$  для всіх  $t > T_0$  виконується нерівність

$$\frac{i(t)}{t-t_0} \geq p > 0, \quad p = \text{const}, \quad (21)$$

то залишаються справедливими теореми 2 і 3, якщо в нерівності (11), (12) і (15) підставити  $\frac{1}{p}$  замість  $\theta_2$ ; нерівність (10) при цьому не використовуватиметься.

Зауважимо, що твердження про асимптотичну стійкість і нестійкість тривіального розв'язку системи (1) залишаються в силі, якщо

$$p = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{i(t)}{t-t_0}.$$

1. Демидович Б. П. Лекции по математической теории устойчивости / Б. П. Демидович. – М. : Наука, 1967. – 472 с.
2. Самойленко А. М. Об устойчивости решений систем с импульсным воздействием / А. М. Самойленко, Н. А. Перестюк // Дифференциальные уравнения. – 1981. – Т. 17, № 11. – С. 1995–2001.
3. Гургула С. І. Про стійкість розв'язків імпульсних систем / С. І. Гургула, Н. А. Перестюк // Вісник Київського університету. Математика і механіка. – 1981. – Вип. 23. – С. 33–40.
4. Гургула С. І. Про стійкість в системах диференціальних рівнянь з імпульсною дією / С. І. Гургула, Р. І. Собкович // Наукові вісті Інституту менеджменту та економіки “Галицька академія”. – 2007. – № 2 (12). – С. 29–33.

#### ABOUT THE SECOND LIAPOUNOV'S METHOD IN SYSTEMS WITH IMPULSIVE ACTION

S.I. Gurgula<sup>1</sup>, I.Y. Percatyc<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine,  
ph. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>PreCarpathian National University by Vasil Stefanic  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine,  
ph. (0342) 596016, e-mail: [stat@pu.if.ua](mailto:stat@pu.if.ua)

*The question of firmness of decisions of the systems of differential equalizations is explored with impulsive action in the fixed moments of time. The criteria of firmness, asymptotic firmness and instability of decisions of such systems are got.*

**Key words:** system of differential equalizations, impulsive action, Liapunov's function, firmness by Liapunov.

## УСЕРЕДНЮВАННЯ В НЕЛІНІЙНИХ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ІЗ ПОДВІЙНОЮ ІМПУЛЬСНОЮ ДІЄЮ

**С.С. Гулька**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)*

*Застосовується метод усереднювання Крилова–Боголюбова–Митропольського до систем інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією.*

**Ключові слова:** система інтегро-диференціальних рівнянь, подвійна імпульсна дія, усереднювання, похибка.

Об'єктом наших досліджень будуть системи інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією. Необхідність вивчення таких систем рівнянь зумовлена численними задачами з фізики, техніки, біології, що описують реальні процеси, які піддаються й піддавались у процесі своєї еволюції короткотривалим збуренням. Системи інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією уможливають дослідження математичної моделі, враховуючи вплив передісторії, тобто того, що відбувалось із процесом до певного проміжку часу (так звану передісторію), і ті збурення, що впливали на процес до цього періоду.

Дослідження таких систем опирається на класично розроблену теорію систем диференціальних рівнянь з імпульсною дією, запропоновану А.М. Самойленко і М.О. Перестюком [1–4].

У даній роботі до систем інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією застосовується метод усереднювання Крилова–Боголюбова–Митропольського [5–6]. Суть цього методу полягає в тому, що системі інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною дією ставиться у відповідність інша усереднена система інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією і вказується на знаходження умов, за яких різниця між розв'язками точної та відповідної усередненої системи за достатньо малих значень параметра  $\varepsilon$  стає як завгодно малою на як завгодно великому, проте скінченому інтервалі часу. Встановлюється відповідність між різними властивостями розв'язків точних та усереднених систем.

Розглянемо систему інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon F \left( t, x(t), \int_0^t K(t, s, x(s)) ds + \sum_{s_0 < s_j < t} Y_j(x(s_j - 0)) \right), \quad (1)$$

$$t \neq t_i;$$

$$\text{де } Y_j(x(s_j - 0)) \equiv K(t, s_j + 0, x(s_j + 0)) - K(t, s_j - 0, x(s_j - 0)), \quad (2)$$

$$\Delta x|_{t=t_i} = x(t_i + 0) - x(t_i - 0) = \varepsilon I_i(x) \equiv \varepsilon I_i(x(t_i - 0)); \quad (3)$$

$x, F, I_i$  – точки  $n$ -вимірного евклідового простору;  $K, Y_j$  – точки  $m$ -вимірного евклідового простору;  $\varepsilon$  – малий параметр;  $t$  – час.

Побудуємо для системи (1) – (3) відповідну усереднену систему:

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon F_0 \left( y(t), \int_0^t K_0(y(s)) ds + Y_j^{(0)}(y(s_j - 0)) \right), \quad (4)$$

$$t \neq t_i;$$

$$Y_j^{(0)}(y(s_j - 0)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{s_0 < s_j < t} Y_j(y(s_j - 0)); \quad (5)$$

$$F_0 \left( y(t), \int_0^t K_0(y(s)) ds + Y_0(y, -0) \right) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t F \left( t, y(t), \int_0^t K(t, s, y(s)) ds + Y_0(y, -0) \right); \quad (6)$$

$$F_0(y(s)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t K(t, s, y(t)) ds, \quad (7)$$

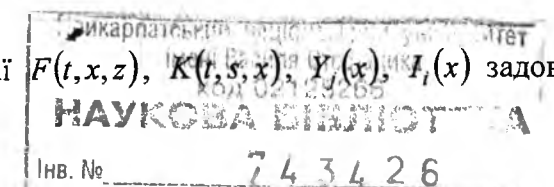
$$s \neq s_j;$$

$$I_j^0(y(t_i - 0)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{t_i} I_i(y(t_i - 0)). \quad (8)$$

Наведемо теорему, суть якої полягає в тому, що за досить загальних умов різницю  $|x(t) - y(t)|$  можна зробити як завгодно малою за достатньо малого  $\varepsilon > 0$  на як завгодно великому інтервалі часу  $0 < t < T$ . До того ж, оскільки  $y(t)$  залежить від  $t$  через  $\varepsilon t$ , то необхідно, щоб протягом указанного інтервалу часу функція  $y(t)$  могла встигнути відійти від свого початкового значення, тобто щоб цей інтервал був достатньо довгим із точки зору змінювання  $y(t)$ , за  $T$  треба взяти величину порядку  $\frac{L}{\varepsilon}$ , де  $L$  можна зробити як завгодно великим за достатньо малого  $\varepsilon$ .

Сформулюємо й наведемо доведення основної теореми Крилова–Боголюбова–Митропольського про малість похибки різниці  $|x(t) - y(t)|$  у першому наближенні.

**Теорема.** Нехай функції  $F(t, x, z), K(t, s, x), Y_j(x), I_i(x)$  задовольняють умови:



а) для деяких областей  $D_1$  і  $D_2$  можна вказати такі додатні сталі  $M_1, M_2, M_3, M_4$  та  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4, \lambda_5$ , що за всіх дійсних значень  $t \geq 0, t_i \geq 0, s_0 < s < t, s_0 < s_j < t$  для будь-яких  $x, z, x', z'$  із цих областей виконано нерівності

$$|F(t, x, z)| \leq M_1, \quad |K(t, x, z)| \leq M_2, \quad |Y_j(x)| \leq M_3, \quad |I_i(x)| \leq M_4, \quad (9)$$

$$|F(t, x, z) - F(t, x', z')| \leq \lambda_1|x - x'| + \lambda_2|z - z'|, \\ |K(t, s, x) - K(t, s, x')| \leq \lambda_3|x - x'|; \quad (10)$$

б) в областях  $D_1$  і  $D_2$  існують рівномірні щодо  $x, z$  границі

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t F(t, x, z) dt = F_0(x, z), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t K(t, s, x) ds = K_0(x),$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{t_i} I_i(x_i - 0) = I_j^0(x_j - 0), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{s_0 < s_j < t} Y_j(x_j - 0) = Y_j^{(0)}(x_j - 0). \quad (11)$$

Тоді будь-яким як завгодно малим заданим  $\rho, \eta$  та як завгодно великому  $L$  можна поставити у відповідність таке додатне  $\varepsilon_0$ , що при  $y = y(t)$  – розв'язок рівняння

$$\frac{dy}{dt} = \varepsilon F_0 \left( y(t), \int_0^t K_0(y(s)) ds + Y_j^{(0)}(y(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i;$$

$$\Delta x|_{t=t_i} = I_i^0(y(t_i - 0))$$

означений на інтервалі  $0 < t < \infty$  і лежить в області  $D_1$  разом зі своїм  $\rho$ -околом, а для

$0 < \varepsilon < \varepsilon_0$  в інтервалі  $0 < t < \frac{L}{\varepsilon}$  справедлива нерівність

$$|x(t) - y(t)| < \eta, \quad (12)$$

в якій  $x(t)$  – розв'язок системи

$$\frac{dx}{dt} = \varepsilon F \left( t, x(t), \int_0^t K(t, s, x(s)) ds + \sum_{s_0 < s_j < t} Y_j(x(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i;$$

$$\Delta x|_{t=t_i} = \varepsilon I_i(x(t_i - 0)),$$

що дорівнює  $y(0)$  при  $t = 0$ .

**Доведення.** Фіксуємо деяке додатне число  $a$  та будемо функцію

$$\Delta_a(x) = \begin{cases} A_a \left\{ 1 - \frac{|x|^2}{a^2} \right\}, & |x| \leq a, \\ 0, & |x| > a, \end{cases} \quad (13)$$

в якій додатну величину  $A_a$  визначає співвідношення  $\int_{E_n} \Delta_a(x) dx = 1$ , де

інтегрування поширюється на весь простір  $E_n$ , що розглядається;  $dx$  позначає нескінченно малий елемент звичайного  $n$ -вимірного евклідового об'єму. Очевидно, введена функція  $\Delta_a(x)$  є обмеженою разом зі своїми частинними похідними до другого порядку включно.

Оскільки ця функція та її похідні тотожно дорівнюють нулеві при  $|x| > a$ , неважко пересвідчитися, що інтеграл

$$I_a = \int_{E_n} \left| \frac{\partial \Delta_a(x)}{\partial x} \right| dx \quad (14)$$

скінчений за будь-якого додатного  $a$ .

Зваживши на це, розглянемо функцію

$$U(t, x) = \int_{D_1} \Delta_a(x - x') \left\{ \int_0^t \left[ F \left( t, x'(t), \int_{s_0}^t K(t, s, x'(s)) ds + \sum_{s_0 < s_j < t} Y_j(x'(s_j - 0)) \right) - F_0 \left( x(t), \int_{s_0}^t K_0(x'(s)) ds + Y_j^0(x(s_j - 0)) \right) \right] dt \right\} dx'. \quad (15)$$

З огляду на умову “б” можна побудувати таку монотонну спадну функцію  $f(t)$ , прямуючи до нуля при  $t \rightarrow \infty$ , що в усій області  $D_1$

$$\left| \frac{1}{t} \int_0^t [F(t, x(t), z(t)) - F_0(x(t), z(t))] \right| \leq f(t). \quad (16)$$

Тому маємо

$$|U(t, x)| \leq t f(t) \int_{D_1} \Delta_a(x - x') dx' \leq t f(t) \int_{E_n} \Delta_a(x - x') dx',$$

тобто

$$|U(t, x)| \leq t f(t). \quad (17)$$

Відтак, можна записати

$$\left| \frac{\partial U(t, x)}{\partial x} \right| \leq t f(t) \int_{D_1} \left| \frac{\partial \Delta_a(x - x')}{\partial x} \right| dx \leq t f(t) \int_{E_n} \left| \frac{\partial \Delta_a(x)}{\partial x} \right| dx,$$

або згідно з виразом (14) –

$$\left| \frac{\partial U(t, x)}{\partial x} \right| \leq t f(t) I_a. \quad (18)$$

З іншого боку, з умови “а” випливає, що виконуються нерівності (9), (10) і тому

$$|F(t, x'(t), z'(t)) - F_0(x, z) - F(t, x(t), z(t)) + F_0(x, z)| \leq 2\lambda_1|x' - x| + 2\lambda_2|z - z'|. \quad (19)$$

Як бачимо з виразу (15),

$$\frac{\partial U(t, x)}{\partial t} = \int_{D_1} \Delta_a(x - x') \{F(t, x(t), x(t)) - F_0(x'(t), z'(t))\} dx'.$$

Звідси, врахувавши (19), пересвідчимось, що в області  $D_1$  справедлива нерівність

$$\left| \frac{\partial U(t, x)}{\partial t} - \{F(t, x(t), z(t)) - F_0(x, z)\} \times \int_{D_1} \Delta_a(x - x') dx' \right| \leq 2(\lambda_1 + \lambda_2)a. \quad (20)$$

Проте, згідно з означенням функції  $\Delta_a(x)$  для будь-якої точки  $x$ , що разом зі своїм  $a$ -околом належить до області  $D_1$ , маємо

$$\int_{D_1} \Delta_a(x - x') dx = \int_{|x-x'| < a} \Delta_a(x - x') dx' = 1.$$

Отже, зі співвідношення (20) для таких точок одержуємо

$$\left| \frac{\partial U(t, x)}{\partial t} - F(t, x(t), z(t)) - F_0(x(t), z(t)) \right| \leq 2(\lambda_1 + \lambda_2)a. \quad (21)$$

Фіксуємо тепер число  $a$  так, щоб

$$a < \rho, \quad a < \frac{\eta^*}{8\lambda L e^{\lambda L}}, \quad (22)$$

де  $\eta^* = \min(n, \rho)$ , і вводимо функції

$$F(\varepsilon) = \sup_{|r| < L} r f\left(\frac{r}{\varepsilon}\right), \quad \Phi(t) = \frac{1}{t^2} \int_0^t t f(t) dt. \quad (23)$$

Очевидно, маємо  $F(\varepsilon) \rightarrow 0$ ,  $\varepsilon \rightarrow 0$ ,  $\Phi(t) \rightarrow 0$ ,  $t \rightarrow \infty$ .

Тому можемо знайти як завгодно мале додатне  $\varepsilon_0$ , таке, щоб для будь-якого додатного  $\varepsilon$ , не більшого за  $\varepsilon_0$ , мали місце нерівності

$$F(\varepsilon) < a, \quad F(\varepsilon) < \frac{\eta^*}{2}, \quad \Phi\left(\frac{L}{\varepsilon}\right) \leq \frac{\eta^*}{4L^2 e^{\lambda L} (\lambda + I_a M)}. \quad (24)$$

Зробивши такий вибір величин  $\varepsilon_0$  та  $a$ , розглянемо вираз

$$\bar{x} = \bar{x}(t) = y(t) + \varepsilon U(t, y(t)), \quad (25)$$

де  $y(t)$  – розв'язок рівняння (4)–(5), що належить разом зі своїм  $\rho$ -околом області  $D_1$ .

З огляду на нерівності (17) та (22)–(24), в інтервалі

$$0 < t < \frac{L}{\varepsilon} \quad (26)$$

маємо  $|\varepsilon U(t, y)| \leq \varepsilon t f(t) \leq F(\varepsilon) < a < \rho$ . (27)

Отже, в інтервалі (26)  $\bar{x}(t) \in D$ .

Далі  $\frac{d\bar{x}}{dt} - \varepsilon F(t, \bar{x}(t), z(t)) = R$ . (28)

Використовуючи обмеження у вигляді умов Ліпшица, можемо дійти висновку, що

$$|x(t) - y(t)| < \eta \quad \text{і} \quad |x(t) - y(t)| < \rho \quad (29)$$

на інтервалі  $0 < t < \frac{L}{\varepsilon}$ , що й завершує доведення теореми.

1. Мышкис А. Д. Системы с толчками в заданные моменты времени / А. Д. Мышкис, А. М. Самойленко // Математический сборник. – 1974. – Т. 74, № 2.
2. Самойленко А. М. Устойчивость решений дифференциальных уравнений с импульсным воздействием / А. М. Самойленко, Н. А. Перестюк // Дифференциальные уравнения. – 1977. – № 11.
3. Самойленко А. М. Периодические решения слабо нелинейных систем с импульсным воздействием / А. М. Самойленко, Н. А. Перестюк // Дифференциальные уравнения. – 1978. – № 6.
4. Самойленко А. М. Дифференциальные уравнения с импульсным воздействием / А. М. Самойленко, Н. А. Перестюк. – К. : КГУ, 1980. – 80 с.
5. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М. : Физматгиз, 1963.
6. Митропольский Ю. О. Методи нелінійної механіки / Ю. О. Митропольський. – К. : Наукова думка, 2002.

#### MIDDLING IN THE NONLINEAR INTEGRAL-DIFFERENTIAL SYSTEMS WITH DOUBLE IMPULSIVE ACTION

**S.S. Gulka**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine,  
ph. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)*

*The method of middling by Crilov–Bogolyobov–Mitropolsky is applied to the systems of integral-differential equalizations with double impulsive action.*

**Key words:** *system of integral-differential equalizations, double impulsive action, middling, error.*

## СКАЛЯРНИЙ ДОБУТОК ВЕКТОРА НА ПАРАДЕТЕРМІНАНТ ТРИКУТНОЇ МАТРИЦІ ТА ЙОГО ЗАСТОСУВАННЯ

**Р.А. Заторський**

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
76000, Україна, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
e-mail: [romazz@rambler.ru](mailto:romazz@rambler.ru)

Подається означення скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці; розглядається застосування цієї операції до дослідження формальних операцій із формальними степеневими рядами. Автором одержано формули  $n$ -кратного диференціювання складеної функції та узагальнення многочленів розбиттів Белла.

**Ключові слова:** трикутна матриця, парадетермінант, параперманент, скалярний добуток.

Теорія парадетермінантів трикутних матриць [1; 2] усе частіше знаходить практичні застосування в різних галузях математики. Зокрема її апарат виявляється зручним для дослідження многочленів розбиттів, запроваджених Беллом [3]. Проте ряд многочленів розбиттів не може бути описаним із допомогою самих лише парадетермінантів і вимагає введення поняття “скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці”. Ця операція виявляється корисною також при диференціюванні складених функцій, суперпозиції формальних степеневих рядів із нульовим вільним членом, оберненні таких рядів тощо.

### Скалярний добуток вектора на парадетермінант трикутної матриці

Нижче під трикутною матрицею  $A$  ми розумітимемо трикутну таблицю

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix}_n \quad (1)$$

чисел із числового поля  $K$ .

**Означення 1.** Скалярним добутком вектора  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  на парадетермінант трикутної матриці (1) назвемо число

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left\langle \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right\rangle_n = \quad (2)$$

$$= \sum_{r=1}^n b_r \sum_{p_1 + p_2 + \dots + p_r = n} (-1)^{n-r} \prod_{s=1}^r \{a_{p_1 + \dots + p_s, p_1 + \dots + p_{s-1} + 1}\}.$$

Аналогічно визначається скалярний добуток вектора на параперманент трикутної матриці.

**Означення 2.** Скалярним добутком вектора  $(b_1, b_2, \dots, b_n)$  на параперманент трикутної матриці (1) назвемо число

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left[ \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right]_n = \\ = \sum_{r=1}^n b_r \sum_{p_1 + p_2 + \dots + p_r = n} \prod_{s=1}^r \{a_{p_1 + \dots + p_s, p_1 + \dots + p_{s-1} + 1}\}.$$

Таким чином, при множенні вектора на парадетермінант трикутної матриці, його  $r$ -та компонента перемножується на суму всіх тих доданків парадетермінанта чи параперманента, які відповідають розбиттям із  $r$ -компонентами. Відзначимо також, що добуток нуль-вектора, або вектора, всі компоненти якого дорівнюють одиниці, на парадетермінант чи параперманент трикутної матриці, відповідно дорівнює нулеві або парадетермінанту чи параперманенту цієї трикутної матриці. Отже, скалярний добуток вектора на парадетермінант трикутної матриці є деяким його узагальненням.

Наступна теорема істотно полегшує обчислення скалярного добутку вектора на парадетермінант чи параперманент трикутної матриці і є деяким аналогом розвинення парадетермінанта за елементами його останнього рядка чи першого стовпця [1].

**Теорема 1.** Для довільного вектора  $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$  і трикутної матриці (1) справедливі рівності:

(i) Розвинення за елементами останнього рядка:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left\langle \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right\rangle_n = \quad (3) \\ = \sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i \{a_{n, n-i}\} (b_2, \dots, b_{n-i}) \cdot \text{ddet}(R_{n-i-1,1}(A)),$$

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left[ \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right]_n = \quad (4)$$

$$= \sum_{i=0}^{n-1} \{a_{n, n-i}\} (b_2, \dots, b_{n-i}) \cdot \text{pper}(R_{n-i-1,1}(A));$$

(ii) Розвинення за елементами першого стовпця:

$$\begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left\langle \begin{matrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right\rangle_n = \\ = \sum_{i=0}^{n-1} (-1)^i \{a_{i+1,1}\} (b_2, \dots, b_{n-i}) \cdot \text{ddet}(R_{n,i+2}(A)), \\ \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_n \end{pmatrix} \cdot \left[ \begin{matrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right]_n = \\ = \sum_{i=0}^{n-1} \{a_{i+1,1}\} (b_2, \dots, b_{n-i}) \cdot \text{pper}(R_{n,i+2}(A)),$$

тут  $R_{n-i-1,1}(A)$ ,  $R_{n,i+2}(A)$  – роги трикутної матриці [1].

**Доведення.** Доведемо справедливості першої формули з (i). Те, що в правій частині рівності (3) присутні всі доданки парадетермінанта  $\text{ddet}(A)$ , випливає із того, що вона, по суті, є розвиненням цього парадетермінанта за елементами останнього рядка. Тому для доведення цієї рівності залишається довести, що  $m$ -та компонента вектора  $b$  у правій частині цієї рівності є співмножником кожного доданка парадетермінанта  $\text{ddet}(A)$ , який породжений упорядкованим  $m$ -розбиттям натурального числа  $n$  на натуральні доданки.

Співмножником кожного доданка правої частини цієї рівності є факторіальний добуток  $\{a_{r1}\}$ ,  $r=1,2,\dots,n$ , відповідний першій компоненті  $m$ -розбиття числа  $n$ . Тому компоненти всіх векторів правої частини рівності зсунуті вліво на одну позицію. Решті  $m-1$  компонент розбиття відповідають ті доданки парадетермінантів рогів  $R_{n-1,1}(A)$ ,  $R_{n-2,1}(A)\dots R_{m,1}(A)$ , кожен з яких є добутком  $m-1$  факторіальних добутків. Але з матриці  $(n-1)$ -го порядку  $R_{n-1,1}(A)$  можна виділити  $c_{m-1}(n-1)$  таких доданків; з матриці  $R_{n-2,1}(A)$  –  $c_{m-1}(n-2)$  таких доданків і т. д. З матриці  $R_{m,1}(A)$  –  $c_{m-1}(m-1)$  таких доданків. Таким чином, використовуючи твердження про те, що для впорядкованих розбиттів натурального числа  $n$  на  $m$  натуральних доданків справедлива рекурсія

$$c(n, m) = \sum_{i=1}^{n-m+1} c(n-i, m-1),$$

робимо висновок, що рівність (3) справедлива. Рівність (4) доводиться аналогічно.

Справедливість рівностей з (ii) також доводиться аналогічно. Зауважимо лише, що для доведення того факту, що  $m$ -та компонента вектора  $b$  у правій частині цих рівностей є співмножником кожного додан-

ка парадетермінанта  $\text{ddet}(A)$  чи параперманента  $\text{pper}(A)$ , який породжений упорядкованим  $m$ -розбиттям натурального числа  $n$ , слід розглядати послідовність рогів

$$R_{n2}(A), R_{n3}(A) \dots R_{n,n+m-1}(A).$$

**Наслідок 1.** Нехай

$$Z(a_1, a_2 \dots a_n) = \begin{pmatrix} a_1 & & & \\ \frac{a_2}{a_1} & a_1 & & \\ a_1 & & \ddots & \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{a_n}{a_{n-1}} & \frac{a_{n-1}}{a_{n-2}} & \dots & a_1 \\ a_{n-1} & a_{n-2} & & \end{pmatrix}_n,$$

тоді для довільного вектора  $b = (b_1, b_2 \dots b_n)$  справедливі тотожності:

$$\begin{aligned} (b_1, b_2 \dots b_n) \cdot \text{ddet}(Z(a_1, a_2 \dots a_n)) &= a_1 \cdot (b_2 \dots b_n) \cdot \text{ddet}(Z(a_1 \dots a_{n-1})) - \\ - a_2 (b_2 \dots b_{n-1}) \text{ddet}(Z(a_1 \dots a_{n-2})) &+ \dots + (-1)^{n-2} a_{n-1} (b_2) \text{ddet}(Z(a_1)) + (-1)^{n-1} a_n b_1, \\ (b_1, b_2 \dots b_n) \cdot \text{pper}(Z(a_1, a_2 \dots a_n)) &= a_1 \cdot (b_2 \dots b_n) \cdot \text{pper}(Z(a_1 \dots a_{n-1})) + \\ + a_2 (b_2 \dots b_{n-1}) \text{pper}(Z(a_1 \dots a_{n-2})) &+ \dots + a_{n-1} (b_2) \text{pper}(Z(a_1)) + a_n b_1. \end{aligned}$$

**Доведення.** Справедливість цього наслідку одразу випливає з теореми 1, бо

$$\{a_{r1}\} = a_r, a$$

$$R_{n,r+1}(Z(a_1 \dots a_n)) = R_{n-r,1}(Z(a_1 \dots a_n)) = Z(a_1 \dots a_{n-r}), r = 1, 2 \dots n-1.$$

Наступне твердження очевидне.

**Твердження 1.** Нехай  $a, b$  – два вектори  $n$ -го порядку,  $A$  і  $B$  – трикутні матриці того ж порядку,  $\alpha$  – деяке число з числового поля  $K$ . Тоді справедливі рівності:

$$\begin{aligned} \alpha \cdot a \cdot \text{ddet}(A) &= (\alpha \cdot a) \cdot \text{ddet}(A), \\ (a + b) \cdot \text{ddet}(A) &= a \cdot \text{ddet}(A) + b \cdot \text{ddet}(A), \\ a \cdot (\text{ddet}(A) + \text{ddet}(B)) &= a \cdot \text{ddet}(A) + a \cdot \text{ddet}(B). \end{aligned}$$

В [1] доведено, що якщо  $A = (a_{ij})_{1 \leq j \leq i \leq n}$  – трикутна матриця (1), то справедлива тотожність

$$\text{pper}(a_{ij})_{1 \leq j \leq i \leq n} = \text{ddet}((-1)^{\delta_{ij}+1} a_{ij})_{1 \leq j \leq i \leq n}. \tag{5}$$

Тотожність (5) у термінах скалярного добутку може бути записана у вигляді

$$\left[ \begin{matrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right]_n = \begin{pmatrix} (-1)^{n-1} \\ (-1)^{n-2} \\ \dots \\ (-1)^0 \end{pmatrix} \cdot \left\langle \begin{matrix} a_{11} & & & \\ a_{21} & a_{22} & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{matrix} \right\rangle_n. \tag{6}$$

Дійсно, згідно з означенням скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці, маємо

$$\begin{pmatrix} (-1)^{n-1} \\ (-1)^{n-2} \\ \dots \\ (-1)^0 \end{pmatrix} \cdot \left\langle \begin{matrix} a_{11} \\ a_{21} & a_{22} \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{matrix} \right\rangle_n = \\ = \sum_{r=1}^n (-1)^{n-r} \cdot \sum_{p_1+\dots+p_r=n} (-1)^{n-r} \prod_{s=1}^r \{a_{p_1+\dots+p_s, p_1+\dots+p_{s-1}+1}\},$$

з якої внаслідок рівності (2) випливає справедливості тотожності (6).

**Застосування скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці**

1. Нехай

$$S_n = x_1^n + x_2^n + \dots + x_n^n,$$

а  $\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n$  – елементарні симетричні многочлени від  $n$  змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$ ,

тоді справедлива формула Варінга [4, с.393]:

$$\frac{S_n}{n} = \sum_{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n} (-1)^{n-(\lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n)} \frac{(\lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n)!}{\lambda_1! \lambda_2! \dots \lambda_n!} \cdot \sigma_1^{\lambda_1} \sigma_2^{\lambda_2} \dots \sigma_n^{\lambda_n},$$

яка з допомогою скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці запишеться у вигляді:

$$\frac{S_n}{n} = \left( \begin{matrix} 1 \\ \frac{1}{2} \\ \vdots \\ \frac{1}{n} \end{matrix} \right) \cdot \left\langle \begin{matrix} \sigma_1 \\ \frac{\sigma_2}{\sigma_1} & \sigma_1 \\ \vdots & \vdots & \ddots \\ \frac{\sigma_n}{\sigma_{n-1}} & \frac{\sigma_{n-1}}{\sigma_n} & \dots & \sigma_1 \end{matrix} \right\rangle.$$

Остання тотожність випливає з означення скалярного добутку вектора на парадетермінант трикутної матриці та тотожності (див. [2], тотожність (5.9)):

$$\text{ddet}(Z(x_1 \dots x_n)) = \sum_{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n} (-1)^{n-(\lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n)} \cdot \frac{(\lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n)!}{\lambda_1! \lambda_2! \dots \lambda_n!} \cdot x_1^{\lambda_1} x_2^{\lambda_2} \dots x_n^{\lambda_n}.$$

2. Многочленами розбиттів Белла [5, с.173] називають многочлени виду

$$Y_n(fg_1 \dots fg_n) = \sum_{k_1+2k_2+\dots+nk_n=n} \frac{n! f_k}{k_1! \dots k_n!} \left( \frac{g_1}{1!} \right)^{k_1} \dots \left( \frac{g_n}{n!} \right)^{k_n},$$

де  $f^k = f_k$ .

Поняття многочленів розбиттів можна істотно узагальнити. Нижче під многочленами розбиттів ми розуміємо многочлени вигляду

$$P(x_1 \dots x_n; z) = \sum_{m=1}^n y_m z^m \sum_{\substack{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n \\ \lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n=m}} c(n; \lambda_1 \dots \lambda_n) \cdot x_1^{\lambda_1} \dots x_n^{\lambda_n}.$$

Тут  $c(n; \lambda_1 \dots \lambda_n)$  – деякі дробово-раціональні вирази, а  $y_m, m=1, 2, \dots, n$  – компоненти деякого  $n$ -вимірного вектора. В [2] показано (див. теорему 10), що многочлени розбиттів можна подати у вигляді скалярного добутку вектора на деякий парадетермінант трикутної матриці. Трикутну матрицю вигляду

$$B(x_1, x_2 \dots x_n) = \left( \frac{j}{i-j+j \cdot \delta_{ij}} \cdot \frac{x_{i-j+1}}{x_{i-j}} \right)_{1 \leq j \leq i \leq n} \quad (7)$$

назвемо трикутною матрицею Белла.

**Твердження 2.** Для трикутної матриці Белла справедлива тотожність

$$\text{ppreg} \left( \frac{j}{i-j+j \cdot \delta_{ij}} \cdot \frac{x_{i-j+1}}{x_{i-j}} \right)_{1 \leq j \leq i \leq n} = \sum_{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n} \frac{n!}{\lambda_1! (1!)^{\lambda_1} \dots \lambda_n! (n!)^{\lambda_n}} \cdot x_1^{\lambda_1} \dots x_n^{\lambda_n}.$$

**Доведення.** Розвинемо парадетермінант трикутної матриці многочлена Белла за елементами останнього рядка:

$$\begin{aligned} \text{ppreg}(B(x_1 \dots x_n)) &= \binom{n-1}{0} x_1 \text{ppreg}(B(x_1 \dots x_{n-1})) + \binom{n-1}{1} x_2 \text{ppreg}(B(x_1 \dots x_{n-2})) + \\ &+ \dots + \binom{n-1}{n-2} x_{n-1} \text{ppreg}(B(x_1)) + \binom{n-1}{n-1} x_n = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} x_{i+1} \text{ppreg}(B(x_1 \dots x_{n-i-1})). \end{aligned} \quad (8)$$

Позаяк  $\text{ppreg}(B(x_1)) = [x_1] = x_1$  і парадетермінант  $\text{ppreg}(B(x_1, \dots, x_n))$  та многочлен Белла [5, с.174] задовольняють рекурентне співвідношення (8), то твердження доведене.

Тепер розглянемо задачу про встановлення загального вигляду формул похідних вищих степенів від складеної функції

$$y = f(g(x)).$$

Цю задачу вперше розв'язав Фаа ді Бруно. Його формула має такий вигляд:

$$y^{(n)} = \sum_{k=1}^n f^{(k)} \left( \sum_{\substack{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n \\ \lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n=k}} \frac{n!}{\lambda_1! (1!)^{\lambda_1} \dots \lambda_n! (n!)^{\lambda_n}} \cdot (g^{(1)})^{\lambda_1} \dots (g^{(n)})^{\lambda_n} \right).$$

**Теорема 2.** Нехай функції  $f(x)$  і  $g(x)$  нескінченно диференційовані, причому виконуються рівності

$$\frac{d^i}{dg^i} f(g) = f^{(i)}, \quad \frac{d^i}{dx^i} g(x) = g^{(i)}, \quad i=1, 2, \dots$$

Тоді для довільного натурального  $n$  справедливі рівності:

$$\frac{d^n}{dx^n} f(g(x)) = \begin{pmatrix} f^{(1)} \\ f^{(2)} \\ \vdots \\ f^{(n)} \end{pmatrix}_n \cdot \begin{bmatrix} g^{(1)} & & & \\ \frac{1}{1} \cdot g^{(2)} & & & \\ \vdots & & & \\ \frac{1}{n-1} \cdot g^{(n)} & \frac{2}{n-2} \cdot g^{(n-1)} & \dots & g^{(1)} \end{bmatrix}_n =$$

$$= (f^{(1)}, f^{(2)} \dots f^{(n)}) \cdot \text{ppreg}(B(g^{(1)}, g^{(2)} \dots g^{(n)})).$$

**Доведення.** Справедливість цієї теореми одразу випливає із твердження 2, означення скалярного добутку вектора на параперманент трикутної матриці (7) та формули Фаа ді Бруно.

3. Покажемо, що суперпозиція двох формальних степеневих рядів виражається за допомогою скалярного добутку вектора на параперманент трикутної матриці. Доведемо спочатку справедливість наступного твердження.

**Твердження 3.** *Справедлива тотожність*

$$\left( \sum_{i=1}^{\infty} a_i z^i \right)^p = \sum_{n=p}^{\infty} \left( \sum_{\substack{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n \\ \lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n=p}} \frac{p!}{\lambda_1! \lambda_2! \dots \lambda_n!} \cdot a_1^{\lambda_1} a_2^{\lambda_2} \dots a_n^{\lambda_n} \right) \cdot z^n,$$

де  $p$  – деяке натуральне число.

**Доведення.** Коефіцієнт біля  $z^n$ , вочевидь, має вигляд  $m \cdot a_1^{\lambda_1} \dots a_n^{\lambda_n}$ , тут  $m$  – деяке натуральне число. Причому виконуються рівності

$$\lambda_1 + 2\lambda_2 + \dots + n\lambda_n = n,$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_n = p.$$

Знаходимо коефіцієнт  $\alpha$  при  $z^n$ , використовуючи твердження про те, що число всіх упорядкувань мультимножини з первинною специфікацією  $[a_1^{k_1}, a_2^{k_2} \dots a_n^{k_n}]$  дорівнює

$$\frac{(k_1 + k_2 + \dots + k_n)!}{k_1! k_2! \dots k_n!}.$$

**Теорема 3.** *Якщо формальний степеневий ряд  $c(z) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i z^i$  є результатом суперпозиції формальних степеневих рядів  $a(z) = \sum_{i=1}^{\infty} a_i z^i$  і*

$b(z) = \sum_{i=1}^{\infty} b_i z^i$ , то справедливі рівності:

$$c_i = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{pmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} b_1 & & & \\ \frac{b_2}{b_1} & b_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \frac{b_i}{b_{i-1}} & \frac{b_{i-1}}{b_{i-2}} & \dots & b_1 \end{bmatrix}_i.$$

**Доведення.** Справедливість цієї теореми випливає із твердження 3 та означення скалярного добутку вектора на параперманент. Дійсно,

$$c(z) = a(b(z)) = \sum_{p=1}^{\infty} a_p (b(z))^p =$$

$$= \sum_{p=1}^{\infty} a_p \sum_{n=p}^{\infty} \left( \sum_{\substack{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+n\lambda_n=n \\ \lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_n=p}} \frac{p!}{\lambda_1! \lambda_2! \dots \lambda_n!} \cdot b_1^{\lambda_1} b_2^{\lambda_2} \dots b_n^{\lambda_n} \right) \cdot z^n =$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \left( \sum_{p=1}^i a_p \sum_{\substack{\lambda_1+2\lambda_2+\dots+i\lambda_i=i \\ \lambda_1+\lambda_2+\dots+\lambda_i=p}} \frac{p!}{\lambda_1! \lambda_2! \dots \lambda_i!} \cdot b_1^{\lambda_1} b_2^{\lambda_2} \dots b_i^{\lambda_i} \right) \cdot z^i =$$

$$= \sum_{i=1}^{\infty} \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_i \end{pmatrix}_i \cdot \begin{bmatrix} b_1 & & & \\ \frac{b_2}{b_1} & b_1 & & \\ \vdots & \vdots & \ddots & \\ \frac{b_i}{b_{i-1}} & \frac{b_{i-1}}{b_{i-2}} & \dots & b_1 \end{bmatrix}_i \cdot z^i.$$

### Висновок

Операція скалярного добутку вектора на параперманент чи парадетермінант трикутної матриці дає змогу спростити доведення деяких відомих тверджень теорії парадетермінантів трикутних матриць та довести низку нових важливих теорем. При цьому всі результати отримують компактний та зручний для практичних застосувань вигляд. Рекурентні співвідношення для скалярного добутку вектора на парадетермінант чи параперманент трикутної матриці дають змогу побудувати зручні рекурсивні алгоритми для їх обчислення, що виправдовує подальші їх застосування.

1. Заторський Р. А. Про паравизначники та параперманенти трикутних матриць / Р. А. Заторський // Математичні студії. – 2002. – Т. 17, № 1. – С. 3–17.
2. Zatorsky R. A. Theory of paraderminants and its applications / R. A. Zatorsky // Algebra and Diskrete Mathematics. – 2007. – № 1. – P. 109–138.



3. Bell E. T. Partition polynomials / E. T. Bell // Ann. Math. – 1927. – Vol. 29. – P. 38–46.
4. Серре И. А. Курс высшей алгебры / И. А. Серре; под ред. Л.А. Левенстерна. – 2-е русск. изд. – М. : Изд-во т-ва М. О. Вольф, 1902. – 452 с.
5. Риордан Д. Комбинаторные тождества / Д. Риордан. – М. : Наука, 1982. – 256 с.

### Scalar Product of a Vector on a Paraderminant of a Triangular Matrix and Its Application

**R.A. Zatorsky**

*PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k,  
76000, Ukraine,  
e-mail: romazz@rambler.ru*

*Determination of scalar product of vector on paraderminant is given three-cornered matrix, application of this operation is considered to the formal operations analysis with formal sedate rows. The formulas of n-multiple differentiation of the built function and generalization of polynomials laying out of Bell are got an author.*

**Key words:** *three-cornered matrix, paraderminant, parapermanent, scalar product.*

УДК 519.217.4

### ДИФУЗІЙНІ ПРОЦЕСИ ТА ДЕЯКІ СПОСОБИ ЇХ ПОБУДОВИ Й ЗАСТОСУВАННЯ

**М.М. Осипчук**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57,  
e-mail: myosvpr@ukr.net*

*Статтю присвячено подальшій розробці методів побудови дифузійних процесів. Як приклад розглянуто стохастичну модель процесу розповсюдження диму в повітрі.*

**Ключові слова:** *дифузійний процес, вектор переносу, стохастичне диференціальне рівняння, математична модель.*

#### Дифузійний процес

Нехай  $P(t, x, \Gamma)$  ( $t > 0$ ,  $x \in R^m$ ,  $\Gamma \in B(R^m)$ ) – ймовірність переходу однорідного марківського процесу в  $R^m$ . Щоб процес називався дифузійним, потрібно, щоб виконувалися такі умови [1]:

$$1) \lim_{t \downarrow 0} \frac{1}{t} \int_{|y-x| > \varepsilon} P(t, x, dy) = 0 \text{ при всіх } \varepsilon > 0, x \in R^m;$$

2) Існує така функція  $a: R^m \rightarrow R^m$ , що

$$\lim_{t \downarrow 0} \frac{1}{t} \int_{|y-x| \leq \varepsilon} (y-x, \theta) P(t, x, dy) = (a(x), \theta) \text{ при всіх } \varepsilon > 0, x, \theta \in R^m;$$

3) Існує така функція  $B: R^m \rightarrow L_s(R^m)$ , що

$$\lim_{t \downarrow 0} \frac{1}{t} \int_{|y-x| \leq \varepsilon} (y-x, \theta)^2 P(t, x, dy) = (B(x)\theta, \theta) \text{ при всіх } \varepsilon > 0, x, \theta \in R^m.$$

При цьому функцію  $a(x)$  прийнято називати вектором переносу, функцію  $B(x)$  – матрицею (оператором) дифузії, а їх сукупність – локальними характеристиками дифузійного процесу.

Якщо ж границі з означення дифузійного процесу існують в узагальненому розумінні (тобто існують границі вигляду

$\lim_{t \downarrow 0} \frac{1}{t} \int_{R^m} \varphi(x) \int_G f(y-x) P(t, x, dy) dx$  для кожної неперервної фінітної функції  $\varphi(x)$ ), то такий процес називають узагальненим дифузійним.

Умови, за яких існує дифузійний процес із даними вектором переносу  $a(x)$  та матрицею дифузії  $B(x)$ , дає наступна теорема з [1].

**Теорема 1.** Якщо існують константи  $K > 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < C_1 \leq C_2$ , для яких при всіх  $x, y, \theta \in R^m$  та  $i, j = 1, 2, \dots, m$

$$1) |b_{ij}(x) - b_{ij}(y)| \leq K |x - y|^\alpha$$

$$2) C_1 \theta^2 \leq (B(x)\theta, \theta) \leq C_2 \theta^2$$

$$3) |a_i(x) - a_i(y)| \leq K |x - y|^\alpha$$

$$4) |a_i(x)| \leq C_2,$$

то існує однорідний дифузійний процес із вектором переносу  $a(x)$  та оператором дифузії, що задається матрицею  $B(x)$ .

Серед властивостей цього процесу слід відмітити те, що його ймовірність переходу має щільність  $g(t, x, y)$ , яка є фундаментальним розв'язком диференціального рівняння

$$\frac{\partial u(t, x)}{\partial t} = \sum_{i=1}^m a_i(x) \frac{\partial u(t, x)}{\partial x_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^m b_{ij}(x) \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x_i \partial x_j}.$$

Крім того, такий процес є розв'язком стохастичного диференціального рівняння

$$d\xi(t) = a(\xi(t))dt + B^{\frac{1}{2}}(\xi(t))dw(t), \quad (1)$$

де  $w(t)$  – вінерівський процес (стандартний броунівський рух) у  $R^m$ . Це дає змогу моделювати траєкторії такого процесу.

Більш загальні умови на вектор переносу, що гарантують існування дифузійного процесу та виконання рівності (1), наведено в наступному твердженні [2].

**Теорема 2.** Якщо існують константи  $K > 0$ ,  $0 < \alpha < 1$ ,  $0 < C_1 \leq C_2$ ,  $\delta > 0$ ,  $\gamma > -\frac{\delta+1}{2} + \frac{m}{2}$ , для яких при всіх  $x, y, \theta \in R^m$  та  $i, j = 1, 2, \dots, m$  функції  $a(x)$  та  $B(x) = \|b_{ij}(x)\|_{i,j=1}^m$  задовольняють такі умови:

- 1)  $|b_{ij}(x) - b_{ij}(y)| \leq K |x - y|^\alpha$
- 2)  $C_1 \theta^2 \leq (B(x)\theta, \theta) \leq C_2 \theta^2$
- 3)  $\int_{R^m} |a(y)|^{1+\delta} \exp\left\{-\frac{(y-x)^2}{t}\right\} dy \leq Kt^\gamma$ ,

то існує однорідний узагальнений дифузійний процес із вектором переносу  $a(x)$  та матрицею дифузії  $B(x)$ .

Побудова такого процесу здійснюється шляхом розв'язання інтегрального рівняння збудованої дифузії

$$W(t, x, y) = W_0(t, x, y) + \int_0^t d\tau \int_{R^m} W(t-\tau, z, y) |a(z)| (\nabla_x g_0(\tau, x, z), e(x)) dz, \quad (2)$$

де  $W_0(t, x, y) = (\nabla_x g_0(t, x, y), e(x))$ ,  $g_0(t, x, y)$  – щільність ймовірності переходу дифузійного процесу з нульовим вектором переносу та дифузійною матрицею  $B(x)$ ,  $e(x) = \frac{a(x)}{|a(x)|}$  при  $|a(x)| \neq 0$  та  $e(x) = 0$  в іншому випадку.

При виконанні умов теореми 2 рівняння (2) може бути розв'язане методом послідовних наближень, і при кожних  $\varphi \in C_0(R^m, R)$ ,  $t > 0$  визначено значення оператора

$$T_t \varphi(x) = \int_{R^m} g_0(t, x, y) \varphi(y) dy + \int_0^t d\tau \int_{R^m} V(t-\tau, z, \varphi) |a(z)| g_0(\tau, x, z) dz, \quad (3)$$

де  $V(t, x, \varphi) = \int_{R^m} W(t, x, y) \varphi(y) dy$ . Оператор (3) визначає на  $B(R^m)$  сім'ю ймовірнісних мір ( $t > 0$ ,  $x \in R^m$ )  $P(t, x, \Gamma) = T_t 1_\Gamma(x)$ , які є ймовірностями переходу дифузійного процесу з вектором переносу  $a(x)$  та матрицею дифузії  $B(x)$ .

**Моделювання розв'язків стохастичних диференціальних рівнянь**

Загалом стохастичним диференціальним рівнянням називається рівняння виду

$$d\xi(t) = a(t, \xi(t))dt + b(t, \xi(t))dw(t), \quad (4)$$

де  $a: R_+ \times R \rightarrow R^m$ ,  $b: R_+ \times R \rightarrow L_s(R^m)$  ( $L_s(R^m)$  – множина симетричних додатно визначених матриць розміру  $m \times m$ ),  $w(t)$  –  $m$ -вимірний вінерівський процес.

Для неперервних  $a(t, x)$ ,  $b(t, x)$  і таких, що  $|a(t, x)| + \|b(t, x)\| \leq C(1 + |x|)$ , існує єдиний розв'язок рівняння (4) з довільною початковою умовою

$$\xi(0) = \xi_0. \quad (5)$$

Розв'язком задачі (4), (5) вважаємо випадковий процес  $\xi(t)$ , що задовольняє інтегральне рівняння

$$\xi(t) = \xi_0 + \int_0^t a(s, \xi(s))ds + \int_0^t b(s, \xi(s))dw(s). \quad (6)$$

Тут другий інтеграл є інтегралом Іто за вінерівським процесом. Розбивши відрізок  $[0; T]$  на частини точками  $0 = t_0 < t_1 < \dots < t_n = T$ , де  $T > 0$  – деяке довільне число, одержимо різницевий аналог рівняння (6):

$$\xi(t_{k+1}) = \xi(t_k) + \int_{t_k}^{t_{k+1}} a(s, \xi(s))ds + \int_{t_k}^{t_{k+1}} b(s, \xi(s))dw(s).$$

За умови, що  $\max_k (t_{k+1} - t_k) \rightarrow 0$  значення інтегралів в останній рівності, можна наближено замінити виразами:

$$\int_{t_k}^{t_{k+1}} a(s, \xi(s))ds \approx a(t_k, \xi(t_k))(t_{k+1} - t_k), \quad \int_{t_k}^{t_{k+1}} b(s, \xi(s))dw(s) \approx b(t_k, \xi(t_k))(w(t_{k+1}) - w(t_k)).$$

Різниця  $w(t_{k+1}) - w(t_k)$  є нормально розподіленим випадковим вектором у  $R^m$  із нульовим математичним сподіванням та коваріаційною матрицею  $(t_{k+1} - t_k)I$ . Таким чином, розрахунковою формулою для моделювання траєкторій розв'язку стохастичного рівняння (4) з початковою умовою (5) в дискретні моменти часу  $t_0, t_1, \dots, t_n$  є:

$$\begin{aligned} \xi(t_{k+1}) &= \xi(t_k) + a(t_k, \xi(t_k))(t_{k+1} - t_k) + b(t_k, \xi(t_k))\eta_k \sqrt{t_{k+1} - t_k}, \\ \xi(t_0) &= \xi_0. \end{aligned} \quad (7)$$

Отже, досить змоделювати значення випадкового вектора  $\xi(t_0)$  відповідно до розподілу  $\xi_0$  та потрібну кількість незалежних значень  $m$ -вимірного випадкового вектора  $\eta_k$  зі стандартним нормальним розподілом. За формулою (7) можна знайти всі значення траєкторії  $\xi(t)$  у моменти часу  $t_k$ .

### Стохастична модель процесу розповсюдження диму в повітрі

**Основні припущення.** Для побудови моделі домовимося про такі припущення:

- повітряний простір є необмеженим зверху та з боків;
- відома швидкість  $a(t, x)$  руху повітряних мас;
- відома симетрична додатно визначена матриця дифузії  $B(t, x)$  у повітрі;
- джерело диму знаходиться на висоті  $h$  від підлоги повітряного простору і має площу  $S$ ;
- швидкість надходження  $v$  диму є відомою;
- концентрація диму біля джерела відома й дорівнює  $C_0$ .

**Математична модель.** Траєкторія руху частинки в деякому середовищі під дією теплового руху молекул середовища та макроскопічного його руху може бути описана як реалізація  $x(t)$  дифузійного процесу з вектором переносу  $a_g(t, x) = a(t, x) + (0; 0; v - g \cdot t)$ , де  $g$  – прискорення вільного падіння, та матрицею дифузії  $B(t, x)$ . Такі реалізації можна одержувати як розв'язки стохастичного диференціального рівняння

$$dx(t) = a_g(t, x(t)) \cdot dt + B^{\frac{1}{2}}(t, x(t)) \cdot dw(t), \quad (8)$$

з деякою початковою умовою  $x(0) = x_0$ , де  $w(t)$  – тривимірний стандартний вінерівський процес. Знайшовши ймовірність  $P(t, x_0, \Gamma)$  попадання дифузійного процесу, який стартував у точці  $x_0$ , за час  $t$  в область  $\Gamma$ , можемо знайти концентрацію диму в кожній точці  $x$  повітряного простору в будь-який момент часу  $t$  за формулою

$$C(t, x) = C_0 \cdot v \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{V(\Gamma_x)} \int_0^t d\tau \int_E P(\tau, y, \Gamma_x) dy, \quad (0.1)$$

де  $\Gamma_x$  – окіл точки  $x$ ,  $\delta$  – діаметр  $\Gamma_x$ ,  $V(\Gamma_x)$  – об'єм  $\Gamma_x$ ,  $E$  – множина надходження в повітряний простір диму.

Форма димової хмари буде визначатися нерівністю  $C(t, x) \geq C_{sp}$ , де  $C_{sp}$  – деякий граничний рівень концентрації диму.

Доведемо формулу (9). Очевидно, що  $C_0 \cdot v \cdot S$  дорівнює кількості диму, що надходить за одиницю часу в повітряний простір. Природно вва-

жати, що розподіл точок, з яких стартують частинки диму, є рівномірним на множині  $E$  площею  $S$ . Щільність розподілу таких точок має вигляд

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{S}, & \text{при } x \in E \\ 0, & \text{при } x \notin E \end{cases}$$

За формулою повної ймовірності, ймовірність того, що частинка диму потрапить у множину  $\Gamma$  у момент часу  $t$ , дорівнює

$$P(x(t) \in \Gamma) = \int_{R^3} P(t, y, \Gamma) \cdot f(y) \cdot \delta_E(y) dy = \frac{1}{S} \cdot \int_E P(t, y, \Gamma) dy.$$

Оскільки за час  $\tau$  у повітряний простір потрапляє частинок диму в кількості, пропорційній  $C_0 \cdot v \cdot S \cdot \tau$ , то в момент часу  $t$  у множині  $\Gamma$  опиниться частинок диму в кількості, пропорційній величині

$$C_0 \cdot v \cdot S \cdot \tau \cdot P(x(t - \tau) \in \Gamma) = C_0 \cdot v \cdot \tau \cdot \int_E P(t - \tau, y, \Gamma) dy.$$

Розбивши часовий інтервал від 0 до  $t$  на  $n$  частини тривалістю  $\Delta\tau$ , одержимо, що в множині  $\Gamma$  у момент часу  $t$  опиниться пропорційна

$$C_0 \cdot v \cdot \sum_{k=1}^n \int_E P(t - k \cdot \Delta\tau, y, \Gamma) dy \cdot \Delta\tau$$

кількість частинок диму. При  $n \rightarrow \infty$  ця величина має границю, рівну

$$C_0 \cdot v \cdot \int_0^t d\tau \int_E P(\tau, y, \Gamma) dy.$$

Розглянемо деякий окіл  $\Gamma_x$  точки  $x$  діаметром  $\delta$  і об'ємом  $V(\Gamma_x)$ . Тоді концентрація диму в точці  $x$  у момент часу  $t$  дорівнює

$$C_0 \cdot v \cdot \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{1}{V(\Gamma_x)} \int_0^t d\tau \int_E P(\tau, y, \Gamma_x) dy,$$

що й стверджувалось у (9).

**Розв'язання математичної моделі.** Основним при застосуванні формули (9) є обчислення ймовірності  $P(t, x_0, \Gamma)$ . На практиці можна обмежитись оцінкою такої ймовірності, яку маємо можливість знайти, змодельовавши велику кількість траєкторій – розв'язків рівняння (8). Для цього розглянемо дискретні моменти часу  $t_k = k \cdot \Delta t$ ,  $k = 0 \dots N$  і від-

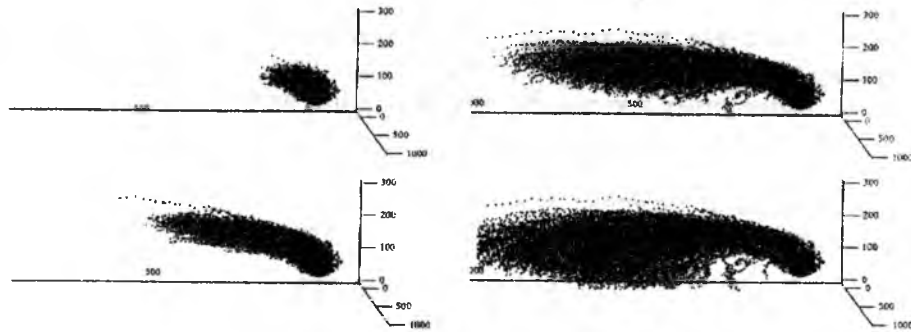
повідне (8) різницеве рівняння  $x_{k+1} - x_k = a_g(t_k, x_k) \cdot \Delta t + B^{\frac{1}{2}}(x_k) \cdot (w_{k+1} - w_k)$  з початковою умовою  $x_0 = \xi$ . Тут  $x_k = x(t_k)$ ,  $w_k = w(t_k)$ ,  $\xi = (\xi^{(1)}, \xi^{(2)}, h)$  – рівномірно розподілена на  $E$  випадкова точка. Для випадку стандартного вінерівського процесу  $w(t)$  прирости  $w_{k+1} - w_k$  є незалежними випадковими векторами, що мають нормальний розподіл із нульовим вектором математичних сподівань та коваріаційною матрицею  $\Delta t I$  ( $I$  – одинична матриця). Моделювання значень таких випадкових векторів є достатньо простою процедурою. Траєкторія обривається в перший момент часу  $t_k$ , якщо  $x_k^{(3)} = 0$  або  $x_{k+1}^{(3)} < 0$ , а  $x_k^{(3)} > 0$ .

Оцінкою ймовірності  $P(t_k, \xi, \Gamma)$  потрапляння в момент часу  $t_k$  траєкторії дифузійного процесу, що стартував із точки  $\xi$ , в область  $\Gamma \in Q_k$  відношення кількості траєкторій, для яких  $x_k \in \Gamma$ , до загальної кількості змодельованих траєкторій. Замінивши інтеграли в (9) відповідними суммами та взявши достатньо малі околі (об'єму  $V$ ) точок, в яких нас ціка-

вить значення концентрації диму, одержимо розрахункову формулу для обчислення  $C(t_k, x)$

$$C(t_k, x) \approx \frac{C_0 \cdot v}{V} \cdot \sum_{i=1}^k Q_i \Delta t. \quad (10)$$

На рисунку зображено зміну в часі форми димової хмари, змодельованої за допомогою розробленої процедури.



1. Портенко Н. И. Марковские процессы / Н. И. Портенко, А. В. Скороход, В. М. Шуренков // Итоги науки и техн. Современ. пробл. матем. Фундам. направления. – ВИНТИ, 1989. – Т. 46, № 2. – С. 5–248.
2. Осипчук М. М. Дифузія з нерегулярним переносом / М. М. Осипчук // Теорія ймовірностей та математична статистика. – 1996. – Т. 54. – С. 122–128.

## DIFFUSION PROCESSES AND SOME METHODS OF THEIR CONSTRUCTION AND APPLICATIONS

**M.M. Osypchuk**

Vasyl Stefanyk PreCarpathian National University,  
Ukraine, 76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenko street, 57,  
e-mail: [myosyp@ukr.net](mailto:myosyp@ukr.net)

*Work is devoted consideration of diffusion processes of both Markov processes which own some properties and decisions of stochastic differential equations. It enables to design the trajectories of such processes. Possibility of the use of diffusion processes in the tasks of design motion of shallow particles in a mobile environment is applied for determination of distribution of smoke in mid air.*

**Key words:** *diffusive process, vector of transfer, stochastic differential equalization, mathematical model.*

УДК 517.53

## МЕРОМОРФНІ ФУНКЦІЇ СКІНЧЕННОГО ПОРЯДКУ ІЗ ЗАДАНОЮ МНОЖИНОЮ ВАЛІРОНІВСЬКИХ ДЕФЕКТНИХ ЗНАЧЕНЬ

**Я.І. Савчук**

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

*Розглядається питання розподілу значень мероморфних функцій скінченного порядку. Отримано відносно повне описання множини дефектних значень у розумінні Ж. Валірона.*

**Ключові слова:** *мероморфна функція, множина валіронівських дефектних значень, характеристика Неванлінни.*

У даній роботі застосовуються основні результати теорії мероморфних функцій, а також позначення, використані в [1].

Зупинимось на деяких основних поняттях.

Мероморфною функцією в комплексній області  $D$  називається функція комплексної змінної  $w = f(z)$ , яка є аналітичною в усіх точках даної області, за винятком множини точок, які є полюсами для  $w = f(z)$  і не мають точки накопичення в  $D$ . Наприклад, відомо [2], що будь-яку мероморфну в  $D$  функцію  $f(z)$  можна подати у вигляді

$$f(z) = \frac{f_1(z)}{f_2(z)}, \quad (1)$$

де  $f_1(z)$  та  $f_2(z)$  – аналітичні в  $D$  функції.

Нижче розглядатимемо мероморфні в усій комплексній площині  $C$  функції. Відповідно до формули (1) таку функцію можна подати у вигляді частки двох аналітичних у  $C$  функцій, які ще називають цілими функціями.

Якщо для характеристики росту цілої функції  $g(z)$  розглядають функцію

$$M(r, g) = \max_{|z| \leq r} |g(z)| = \max_{|z|=r} |g(z)|,$$

то, очевидно, такий підхід не придатний для мероморфних функцій, оскільки, якщо  $z_0$  – полюс функції  $f(z)$ , то  $\lim_{z \rightarrow z_0} f(z) = \infty$ .

Для опису поведінки мероморфної функції  $f(z)$  введемо ряд величин, які називають характеристиками Неванлінни функції  $f(z)$ .

Позначимо через  $n(r, f)$  кількість полюсів  $f(z)$  в крузі  $\{|z| \leq r\}$ , при цьому вважатимемо, що полюс порядку  $m$  дає внесок, рівний  $m$ . Приймемо

$$N(r, f) = \int_0^r \frac{n(t, f) - n(0, f)}{t} dt + n(0, f) \ln r.$$

Ця характеристика також описує розташування полюсів функції  $f(z)$ . Функція  $N(r, f)$  є неперервною, неспадною та опуклою від  $\ln r$  на  $(0, \infty)$  функцією.

Розглянемо ще характеристику росту функції  $f(z)$ :

$$m(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln^+ |f(re^{i\varphi})| d\varphi,$$

де функція  $\ln^+ |x|$  визначається при  $x \geq 0$  рівністю  $\ln^+ |x| = \max\{\ln x, 0\}$ .

Зауважимо, що хоча функція  $m(r, f)$  є неперервною від  $r$ , її поведінка може бути менш правильною, ніж  $N(r, f)$ .

Характеристикою мероморфної функції  $f(z)$  називається величина

$$T(r, f) = m(r, f) + N(r, f).$$

Нехай  $a \neq \infty$  – деяке комплексне число. Величина  $m(r, a, f) = m\left(r, \frac{1}{f-a}\right)$  характеризує наближення функції  $f(z)$  до  $a$ .

Очевидно, що величини  $n(r, a, f) = n\left(r, \frac{1}{f-a}\right)$  та  $N(r, a, f) = N\left(r, \frac{1}{f-a}\right)$  характеризують модулі  $a$ -точок функції  $f(z)$ , тобто модулі коренів рівняння

$$f(z) = a.$$

Виявляється, що для довільної функції  $f(z) \neq const$  сума  $m(r, a, f) + N(r, a, f)$  майже інваріантна відносно  $a$ , а саме: має місце перша основна теорема розподілу значень.

**Теорема 1.** Нехай  $f(z)$  – мероморфна функція, яка не дорівнює тотожній сталій. Тоді для довільного комплексного числа  $a \neq \infty$  має місце співвідношення

$$m(r, a, f) + N(r, a, f) = T(r, f) + \varepsilon(r, a, f), \tag{2}$$

де  $\varepsilon(r, a, f) = O(1)$  при  $r \rightarrow \infty$ .

Із цієї теореми випливає, що для не рівних тотожній сталій мероморфних функцій  $T(r, f)$  необмежено зростає, тому доданок  $\varepsilon(r, a, f)$  в (2) можна вважати неістотним.

Порядком мероморфної функції  $f(z)$  називається число

$$\rho = \overline{\lim}_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln^+ T(r, f)}{\ln r}.$$

Якщо  $\rho < \infty$ , то кажуть, що функція  $f(z)$  має скінченний порядок.

З рівності (2) випливає, що сума  $m(r, a, f) + N(r, a, f)$  не залежить істотно від  $a$ . Однак вклад, який вносить у цю суму кожний із доданків,

може сильно залежати від  $a$ , хоча, як виявляється, для “більшості” значень  $a$  домінує доданок  $N(r, a, f)$ .

Величина

$$\Delta(a, f) = \overline{\lim}_{r \rightarrow \infty} \frac{m(r, a, f)}{T(r, f)}$$

називається валіронівським дефектом. Очевидно, що  $0 \leq \Delta(a, f) \leq 1$ . Якщо  $\Delta(a, f) > 0$ , то  $a$  називається валіронівським дефектним значенням.

Позначимо  $E_V(f) = \{a \in \mathbb{C} : \Delta(a, f) > 0\}$ .

Для мероморфних функцій скінченного порядку А. Хіллєнгрєн [3] отримав такий важливий результат щодо множини валіронівських дефектних значень  $E_V(f)$ .

**Теорема 2.** Нехай  $U \in \mathbb{C}$ . Наступні умови еквівалентні:

- 1) існують  $\alpha > 0$  та числа  $a_1, a_2, \dots \in \mathbb{C}$ , такі, що для довільного  $a \in U$  виконується  $|a - a_n| < \exp(-e^{n\alpha})$  для нескінченної кількості значень  $n$ ;
- 2) існує мероморфна функція  $f$  скінченного порядку та число  $x > 0$ , такі, що для довільного  $a \in U$  виконується  $\Delta(a, f) > x$ .

**Н а с л і д о к .** Для довільної мероморфної функції  $f$  скінченного порядку множина  $E_V(f)$  є зліченим об’єднанням множин, які задовольняють умову 2) теореми 2.

Основним результатом даної статті є нижчеподана теорема.

**Теорема.** Для довільної множини  $U \subset \mathbb{C}$ , яка є зліченим об’єднанням множин, що задовольняють умову 1) теореми 2, існує мероморфна функція  $f$  скінченного порядку, така, що  $U \subset E_V(f)$ .

**Д о в е д е н н я .** Нехай  $U = \bigcup_{s=1}^{\infty} U_s$ , де кожна множина  $U_s$  задово-

льняє умову 1) теореми 2;  $\alpha_s > 0$  та  $a_{ns}, n = 1, 2, \dots$  відповідають  $U_s$  в розумінні, указаному в умові 1) теореми 2. Не зменшуючи загальності, вважаємо всі  $\alpha_s < \frac{1}{5}$ .

Розіб’ємо півінтервал  $[1; +\infty)$  на неперетинні множини  $A_1, A_2, \dots, A_s, \dots$ :

$$A_s = \bigcup_{j=1}^{\infty} [2^j - 2^{j-s}; 2^j - 2^{j-s-1}).$$

Для кожного  $s$  виберемо систему чисел  $M_{1s}, M_{2s}, \dots$  із  $\mathbb{R}$ , таку, щоб виконувалися умови:

$$M_{1s} - \text{таке найменше число, що } E_{1s} = [M_{1s} + 1; M_{1s} + e^{\alpha_s}) \subset A_s;$$

$$M_{2s} - \text{таке найменше число, що } E_{2s} = [e^{\alpha_s} + M_{2s}; e^{2\alpha_s} + M_{2s}) \subset A_s \setminus E_{1s};$$

.....

$M_{ns}$  – таке найменше число, що  $E_{ns} = [e^{(n-1)\alpha_s} + M_{ns}; e^{n\alpha_s} + M_{ns}) \subset A_s \setminus \bigcup_{j=1}^{n-1} E_{js}$

Очевидно, такий вибір можливий, оскільки  $A_s$  складається з півінтервалів  $A_{sj} = [2^j - 2^{j-s}; 2^j - 2^{j-s-1})$ , таких, що  $mes A_{sj} \rightarrow \infty$  при  $j \rightarrow \infty$ .

Прийmemo  $c_{01} = 1, c_{02} = 0$ . При  $j \geq 1$  візьmemo

$$c_{j1} = \frac{a_{ns}}{1 + |a_{ns}|}, c_{j2} = \frac{1}{1 + |a_{ns}|}, \text{ якщо}$$

$$e^{(n-1)\alpha_s} + M_{ns} \leq j < e^{n\alpha_s} + M_{ns}, n \in N, s \in N.$$

Для всіх інших  $j \geq 1$  прийmemo  $c_{j1} = 0, c_{j2} = 1$ . Зауважимо, що для всіх значень  $a \in C$  та чисел  $j \in N$  виконуватиметься нерівність

$$|c_{j1} - ac_{j2}| < 1 + |a|. \tag{3}$$

Покажемо, що функція вигляду (1), де  $f_1(z) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_{j1} z^j}{j!}$ ,

$$f_2(z) = \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_{j2} z^j}{j!} \text{ буде шуканою.}$$

Зафіксуємо  $s \in N$ . Нехай  $A_s(r) = A_s \cap (0; r]$ . Неважко побачити, що при всіх  $r > r_0$  виконується умова

$$\frac{mes A_s(r)}{r} \geq 2^{-s-2}. \tag{4}$$

Оскільки  $\frac{mes E_{ns}}{mes E_{n-1,s}} = e^{\alpha_s} < 2$ , то при всіх  $v \geq v_0$  маємо

$$\frac{mes \left( \left( \bigcup_{j=1}^{\infty} E_{js} \right) \cap A_{s,v} \right)}{mes A_{s,v}} > \frac{1}{3}.$$

Тоді на основі (4) при  $r > r_0$  виконується нерівність

$$\frac{mes \left( \left( \bigcup_{j=1}^{\infty} E_{js} \right) \cap [0; r) \right)}{r} \geq \frac{2^{-s-2}}{3}. \tag{5}$$

Якщо візьmemo  $r = e^{n\alpha_s} + M_{ns}$ , то

$$mes \left( \left( \bigcup_{j=1}^{\infty} E_{js} \right) \cap [0; r) \right) = mes \left( \bigcup_{j=1}^{\infty} E_{js} \right) = e^{n\alpha_s} - 1. \text{ Ураховуючи (5), отримаємо}$$

$$M_{ns} \leq 3 \cdot 2^{s+2} \cdot e^{n\alpha_s}. \tag{6}$$

Враховуючи цю нерівність, матимемо

$$\frac{e^{n\alpha_s} + M_{ns}}{e^{(n-1)\alpha_s} + M_{ns}} \geq \frac{e^{n\alpha_s} + 3 \cdot 2^{s+2} \cdot e^{n\alpha_s}}{e^{(n-1)\alpha_s} + 3 \cdot 2^{s+2} \cdot e^{n\alpha_s}} = \frac{1 + 3 \cdot 2^{s+2}}{e^{-\alpha_s} + 3 \cdot 2^{s+2}}. \tag{7}$$

Нехай тепер  $a \in U_s$ . Нам потрібно показати, що  $\Delta(a, f) > 0$ . Оскільки  $U_s$  задовольняє умову (1) теореми 2, то  $|a - a_{ns}| < \exp(-e^{n\alpha_s})$  для нескінченної кількості чисел  $n$ .

Позначимо  $t = \left( \frac{1 + 3 \cdot 2^{s+2}}{e^{-\alpha_s} + 3 \cdot 2^{s+2}} \right)^{1/2}, [e^{(n-1)\alpha_s} + M_{ns}] = N, Nt = r.$

Із (6) та (7) випливає, що  $r < e^{n\alpha_s} + M_{ns} \leq e^{n\alpha_s} + 3 \cdot 2^{s+2} \cdot e^{n\alpha_s} < 2^{s+4} \cdot e^{n\alpha_s}$ . Тому  $|a - a_{ns}| < \exp(-r \cdot 2^{-s-4})$ . Тоді з урахуванням нерівності (3) отримуємо ( $|z| = r$ ):

$$\begin{aligned} |f_1(z) - a \cdot f_2(z)| &= \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_{j1} - ac_{j2}}{j!} z^j \right| = \left| \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \frac{c_{j1} - ac_{j2}}{j!} z^j + \sum_{j=N+1}^{[N^2]} \frac{a_{ns} - a}{(1 + |a_{ns}|)j!} z^j \right| \leq \\ &\leq \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \frac{|c_{j1} - ac_{j2}|}{j!} |z|^j + \sum_{j=N+1}^{[N^2]} \frac{|a_{ns} - a|}{(1 + |a_{ns}|)j!} |z|^j \leq \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \frac{1 + |a|}{j!} r^j + \\ &+ \sum_{j=N+1}^{[N^2]} \frac{|a_{ns} - a|}{j!} r^j \leq (et)^N + \left( \frac{e}{t} \right)^{N^2} + \exp(-r \cdot 2^{-s-4}). \end{aligned} \tag{8}$$

Оскільки  $|a - a_{ns}| < \exp(-e^{n\alpha_s}) < 1$ , то  $|a_{ns}| < |a| + 1$ . Звідки

$$\frac{1}{|a_{ns}| + 1} > \frac{1}{|a| + 2}. \text{ Тому}$$

$$\begin{aligned} |f_2(z)| &= \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_{j2}}{j!} z^j \right| = \left| \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \frac{c_{j2}}{j!} z^j + \sum_{j=N+1}^{[N^2]} \frac{1}{(1 + |a_{ns}|)j!} z^j \right| = \\ &= \left| \frac{1}{(1 + |a_{ns}|)} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{z^j}{j!} + \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \left( c_{j2} - \frac{1}{1 + |a_{ns}|} \right) \frac{z^j}{j!} \right| \geq \left| \frac{1}{1 + |a_{ns}|} \sum_{j=0}^{\infty} \frac{z^j}{j!} \right| - \\ &- \left| \left( \sum_{j=0}^N + \sum_{j=[N^2]+1}^{\infty} \right) \left( c_{j2} - \frac{1}{(1 + |a_{ns}|)} \right) \frac{z^j}{j!} \right| \geq \frac{|e^z|}{2 + |a|} - 2 \left( (et)^N + \left( \frac{e}{t} \right)^{N^2} \right). \end{aligned} \tag{9}$$

Позначимо  $\beta = \min \{ \ln t, \arccos(1 - 2^{-s-4}) \}$ . Очевидно, що

$$\beta < \alpha_s < \frac{1}{5}, \text{ тому } (et)^N < \exp\left(r \cos \frac{\beta}{3}\right), \left( \frac{e}{t} \right)^{N^2} < \exp\left(r \cos \frac{\beta}{3}\right). \text{ Під-}$$

ставивши ці вирази в (8) та (9), одержимо:

$$\begin{aligned} \left| \frac{1}{f(re^{i\varphi}) - a} \right| &= \frac{|f_2(re^{i\varphi})|}{|f_1(re^{i\varphi}) - a \cdot f_2(re^{i\varphi})|} \geq \frac{\frac{1}{2 + |a|} \exp(r \cos \varphi) - 4 \exp\left(r \cos \frac{\beta}{3}\right)}{2(1 + |a|) \exp\left(r \cos \frac{\beta}{3}\right) + \exp(r(1 - 2^{-s-4}))} \geq \\ &\geq \frac{1}{2(2 + |a|)^2} \exp\left(r \left( \cos \varphi - \cos \frac{\beta}{3} \right)\right) - \frac{2}{1 + |a|}. \end{aligned}$$

Тоді

$$m(r, a, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln^+ \left| \frac{1}{f(re^{i\varphi}) - a} \right| d\varphi \geq \frac{1}{2\pi} \int_{-\beta/3}^{\beta/3} \ln^+ \left| \frac{1}{f(re^{i\varphi}) - a} \right| d\varphi \geq$$

$$\geq \frac{1}{2\pi} \int_{-\beta/3}^{\beta/3} r \left( \cos \varphi - \cos \frac{\beta}{3} \right) d\varphi + O(1) = \frac{r}{\pi} \left( \sin \frac{\beta}{3} - \frac{\beta}{3} \cos \frac{\beta}{3} \right) + O(1) > \frac{r\beta^3}{300} + O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (10)$$

Відомо [1], що для функції виду (1) виконується рівність

$$T(r, f) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \left( |f_1(re^{i\varphi})| + |f_2(re^{i\varphi})| \right) d\varphi + O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (11)$$

У нашому випадку маємо

$$|f_1(re^{i\varphi})| = \left| \sum_{j=1}^{\infty} \frac{c_{j1}}{j!} (re^{i\varphi})^j \right| \leq \sum_{j=1}^{\infty} \frac{|c_{j1}|}{j!} |re^{i\varphi}|^j \leq \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{j!} r^j = e^r.$$

Аналогічно  $|f_2(re^{i\varphi})| \leq e^r$ . Тоді, ураховуючи (11), отримуємо

$$T(r, f) \leq r + O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (12)$$

Оскільки при  $a \in U_s$  нерівність  $|a - a_{ns}| < \exp(-e^{n\alpha_s})$  виконується для деякої послідовності чисел  $n \in \mathbf{N}$ , яка прямує до  $\infty$ , то нерівність (10) виконується для деякої послідовності чисел  $r \in \mathbf{R}$ , яка прямує до  $+\infty$ . Ураховуючи (12), дістаємо  $\Delta(a, f) > \frac{\beta^3}{300}$ .

1. Гольдберг А. А. Распределение значений мероморфных функций / А. А. Гольдберг, И. В. Островский. – М. : Наука, 1970. – 592 с.
2. Хейман У. Мероморфные функции / У. Хейман. – М. : Мир, 1966. – 287 с.
3. Hylltngren A. Valiron deficient values for meromorphic functions in the plane / A. Hylltngren // Acta math. – 1970. – 124, 1–2. – P. 1–8.

### MEROMORF FUNCTIONS OF EVENTUAL ORDER WITH THE SET OF GREAT NUMBER VALIRON IMPERFECT VALUES

Y.I. Savchuk,

Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine,  
ph. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

A question of distributing of values of meromorf functions of eventual order is examined. It is got relatively complete description of great number of imperfect values in understanding of Valiron.

**Key words:** meromorf function, great number of Valiron imperfect values, Nevanlinna's description.

УДК 539.3: 622.243.56

### ДИНАМІЧНА СТІЙКІСТЬ НИЗУ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ БЕЗ ПРОМІЖНИХ ТА З ПРОМІЖНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ В КОМПОНОВЦІ

В.М. Мойсишин

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15  
тел. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

Сформульовано та розв'язано задачі про динамічну стійкість компоновки низу бурильної колони із проміжними елементами (опорно-центрувальними пристроями, амортизаторами) та без них.

**Ключові слова:** компоновка низу бурильної колони, динамічна стійкість, опорно-центрувальні пристрої, амортизатор.

**Постановка та розв'язок задачі про динамічну стійкість низу бурильної колони без проміжних елементів у компоновці**

Вибір оптимальних параметрів режиму буріння ускладнюється обмеженнями на осьове навантаження та швидкість обертання долота. Метою цих обмежень є запобігання викривленню свердловини та інтенсивним вібраціям бурильного інструменту.

Створення високих осьових навантажень для забезпечення інтенсивної відробки доліт тісно пов'язане із застосуванням компоновок низу бурильної колони (КНБК) із проміжними елементами (центраторами, калібраторами, амортизаторами, контактними елементами і т. п.). Опорно-центрувальні пристрої застосовують для стабілізації та керування траєкторією стовбура свердловини, а віброзахисні елементи (амортизатори) для послаблення впливу згенерованих роботою долота вібрацій на елементи надамортизаторної частини бурильної колони.

Серед широкого спектра коливних процесів поперечні коливання найістотніше впливають на міцність та експлуатаційну якість компоновки. Унаслідок зміни в часі параметрів системи "порода – бурильна колона – бурова установка" за деяких умов низ компоновок стає динамічно нестійким, тобто виникає параметричний резонанс. Це призводить до появи поперечних коливань значної амплітуди, що погіршує умови роботи шарошкових доліт і є причиною передчасного спрацювання їх опор та оснащення. Тому вивчення динамічної стійкості компоновок із проміжними елементами має актуальне значення.

Розглядаючи бурильну колону як механічну систему зі змінним у часі параметром (статичною складовою осьової сили на долоті), на яку діють зовнішні збуджуючі навантаження, треба говорити про вимушені коливання в параметричній системі. Звузимо цю відносно складну задачу, детально зупинившись на з'ясуванні механізму та умов виникнення параметричного резонансу, для чого скористаємось лінійною постановкою задачі.

Під час динамічної взаємодії долота з вибоєм свердловини спостерігається збурення поздовжніх коливань компоновки. Якщо амплітуда цих коливань менша від деякого критичного значення, то стан бурильної колони цілком визначається поздовжніми переміщеннями. За певних

співвідношень між збурюючою силою й частотою власних коливань об'язаного низу рівноважна форма стає динамічно нестійкою. Співвідношення частот, при якому відбувається це явище, називається параметричним резонансом і відрізняється від співвідношення при звичайному резонансі вимушених коливань.

Відомі методики вивчення динамічної стійкості бурильної колони полягають у зведенні диференціального рівняння поперечних коливань до рівняння Е.Л. Мат'є і побудові діаграми Айнса–Стретта. Це дає можливість указати на ті сукупності значень параметрів коливальної системи, що призводять до нестійких режимів буріння.

Недоліками зазначених методик є нехтування відносним і переносним крутими моментами, втратами тиску на долоті, а також інерційними складовими, що виникають унаслідок руху промивальної рідини та обертання бурильної колони навколо осі свердловини.

Прагнучи уникнути цих недоліків, диференціальне рівняння малих поперечних коливань низу компоновки подамо у вигляді

$$EJ \frac{\partial^4 w(x,t)}{\partial x^4} + i(M_0 + M_\partial \cos pt) \frac{\partial^3 w(x,t)}{\partial x^3} + (P_0 + p_0 S_0 + \lambda^p + P_\partial \cos pt) \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial x^2} + \mu \frac{\partial w(x,t)}{\partial t} + m_0 \left( \frac{\partial^2 w(x,t)}{\partial t^2} - \omega_0 w(x,t) \right) = 0, \quad (1)$$

де  $w(x, t)$  – прогин пружної лінії;  $EJ$  – жорсткість на згин;  $P_0$  і  $P_\partial \cos pt$  – статична і динамічна складові осьового навантаження на долоті;  $p_0$  – перепад тиску на долоті;  $S_0$  – площа вихідних отворів породоруйнівного інструмента;  $\lambda^p$  – стала, яка враховує вплив інерційної складової руху промивальної рідини;  $m_0$  – маса одиниці довжини труб;  $\omega_0$  – кутова швидкість обертання ротора;  $\mu$  – коефіцієнт в'язкого тертя;  $p$  – частота збурюючої сили;  $i$  – уявна одиниця.

Загальний інтеграл рівняння (1) не можна виразити через елементарні функції, тому скористаємось наближеним методом Бубнова–Гальборкіна. Оскільки другий доданок у (1) є комплексним, то динамічний прогин низу бурильної колони подамо в комплексному вигляді рядом за фундаментальними функціями

$$w(x, t) = \sum_n \left( i \eta_n(t) e^{i \frac{\pi n x}{\ell}} \right), \quad (2)$$

де  $n$  – числа натурального ряду;  $\eta_n(t)$  – поки що невідомі функції часу;  $\ell$  – довжина динамічно активної ділянки бурильної колони.

Для гладкої компоновки  $\ell$  – це довжина першої, рахуючи від долота, півхвилі, що обчислюється за формулою

$$\ell = \frac{3,65}{\omega_0} \sqrt{-\frac{P_{зв}}{2m_0} + \sqrt{0,25 \left( \frac{P_{зв}}{m_0} \right)^2 + 2,68 \frac{EJg}{q} \omega_0^2}}, \quad (3)$$

де  $P_{зв} = P_0 + p_0 S_0 + \lambda^p$  – зведена сила на долоті;  $q$  – вага одиниці довжини труби;  $g$  – прискорення земного тяжіння.

Формула (3) є узагальненням формули Є. Ф. Епштейна [2]. У ній замість осьової сили  $P_0$  взято зведену силу  $P_{зв}$ .

Для компоновки з опорно-центрувальними елементами  $\ell$  – це місце встановлення першого, рахуючи від долота, центратора. Щоправда, якщо перший центратор встановлено дуже низько (над самим долотом чи на відстані короткого перехідника від нього), то за  $\ell$  слід взяти відстань між першим та другим центраторами.

У випадках включення в КНБК амортизатора, за довжину  $\ell$  динамічно активної ділянки слід прийняти відстань від долота до амортизатора. Якщо ж згаданий віброзахисний пристрій є наддолотним, то  $\ell$  обчислюємо за формулою (3).

Як бачимо, розглядаючи динамічну стійкість низу бурильної колони, маємо можливість, на відміну від гладких компоновок, регулювати довжину  $\ell$  динамічно активної ділянки шляхом зміни місця установки проміжного елемента.

Підкладаючи (2) в (1), після виділення уявних частин одержимо

$$\ddot{\eta}_n(t) + 2\varepsilon \dot{\eta}_n(t) + \frac{1}{m_0} \left[ EJ \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^4 - (M_0 + M_\partial \cos pt) \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^3 - (P_0 + p_0 S_0 + \lambda^p + P_\partial \cos pt) \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^2 - \omega_0 \right] \eta_n(t) = 0, \quad \varepsilon = \frac{\mu}{2m_0}. \quad (4)$$

Замінами

$$f_n(t) = e^{-\varepsilon t} \eta_n(t), \quad pt = 2\tau \quad (5)$$

зводимо (4) до системи незалежних рівнянь Е. Л. Мат'є:

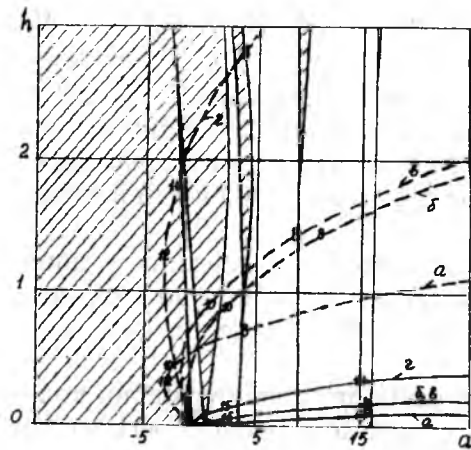
$$\frac{d^2 f_n}{d\tau^2} + (a_n - 2h_n \cos 2\tau) f_n = 0, \quad (6)$$

де  $a_n, h_n$  визначаються за формулами

$$\left. \begin{aligned} a_n &= \frac{4}{p^2} \left[ EJ \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^4 - \frac{M_0}{m_0} \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^3 - \frac{P_0 + p_0 S_0 + \lambda^p}{m_0} \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^2 - \omega_0^2 - \varepsilon^2 \right], \\ h_n &= \frac{2}{p^2} \left[ \frac{M_\partial}{m_0} \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^3 + \frac{P_\partial}{m_0} \left( \frac{n\pi}{\ell} \right)^2 \right]. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Області значень параметрів  $a_n, h_n$  для  $n$ -го рівняння Е. Л. Мат'є, при яких виникає параметричний резонанс  $n$ -ї головної координати, дає діаграма Айнса–Стретта (рис. 1, 2). Вона повністю звільняє від виконання будь-яких операцій, пов'язаних із розв'язанням рівнянь (6). У кожному конкретному випадку достатньо лише знайти за формулами (7) зображальну точку з координатами  $a_n, h_n$ . Якщо зображальна точка знаходиться на заштрихованому полі діаграми, що відповідає  $n$ -й головній координаті, то система нестійка; стійким положенням системи відповідають білі поля діаграми для  $n$ -ї головної координати  $\eta_n$ .





**Рис. 1.** Вплив статичної  $P_0$  та динамічної  $P_d$  складових осьової сили на долоті на динамічну стійкість низу бурильної колони:

$$\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1};$$

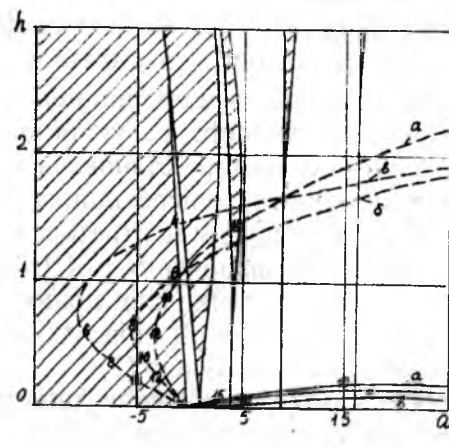
$$а - P_0 = 200 \text{ кН}, P_d = 30 \text{ кН};$$

$$б - P_0 = 50 \text{ кН}, P_d = 60 \text{ кН};$$

$$в - P_0 = 100 \text{ кН}, P_d = 60 \text{ кН};$$

$$г - P_0 = 200 \text{ кН}, P_d = 120 \text{ кН}$$

--- - комп. 1; ——— - комп. 2



**Рис. 2.** Вплив кутової швидкості обертання ротора  $\omega_0$  на динамічну стійкість низу бурильної колони:

$$P_0 = 200 \text{ кН}, P_d = 60 \text{ кН};$$

$$а - \omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}; б - \omega_0 = 3\pi \text{ с}^{-1};$$

$$в - \omega_0 = 4\pi \text{ с}^{-1}$$

--- - комп. 1; ——— - комп. 2

З діаграми Айнса–Стретта видно, що в разі відсутності тертя й малого значення  $h$  параметричний резонанс (нестійкість) настає при значеннях  $a$ , рівних квадратам чисел натурального ряду (квадратам порядкових номерів головних координат). Зі зростанням збурення  $h$  область нестійкості розширюється, тому параметричний резонанс виникає не тільки при значенні  $a$ , яке дорівнює квадрату порядкового номера головної координати, але і в околі цього числа, чим відрізняється від звичайного резонансу.

## 2. Динамічна стійкість КНБК з опорно-центрувальними елементами

Оскільки найбільше зацікавлення викликає резонанс на найнижчій частоті, то обмежимося випадком  $n=1$ , тобто в подальших міркуваннях заштриховані зони на рис. 1, 2 із вершинами в точках  $(a, h)$ :  $(4, 0)$ ;  $(9, 0)$ ;  $(16, 0)$  не прийматимемо до уваги. Крім цього, знехтуємо відносним моментом та інерційною складовою сили, породженої рухом промивальної рідини, оскільки їх внесок у числові значення координат зображених точок несуттєвий, та й самі викладки при цьому значно спрощуються.

У статті [3] запропоновано розв'язати друге рівняння системи (7) відносно  $\frac{\pi}{\ell}$ , підкласти одержаний вираз у перше рівняння й одержати залежність  $a = a(h)$ , яка дає змогу оцінити вплив основних параметрів

роботи компоновки (кутової швидкості обертання ротора  $\omega_0$ , статичної  $P_0$  та динамічної  $P_d$  складових осьового навантаження на долото) на динамічну стійкість КНБК з опорно-центрувальними елементами.

Суцільні параболи на рис. 1, 2 відповідають компоновці низу бурильної колони з ОБТ 203×90 (компоновка 1), а штриховані параболи КНБК з БТ 140×10 (компоновка 2). Цифри на параболах визначають довжину  $\ell$  динамічно активної ділянки компоновки для тієї зображальної точки, в якій знаходяться.

Вихідні дані для розрахунків були прийняті такими: діаметр долота  $D_d = 0,2953 \text{ м}$ ; площа вихідних отворів породоруйнівного інструмента  $S_0 = 2,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ , що відповідає трьом гідромоніторним насадкам діаметром 11 мм; перепад тиску на долоті  $p_0 = 10,68 \text{ МПа}$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Н/м}^2$ ;

$J = \frac{\pi(D_1^4 - d_1^4)}{32}$  (для компоновки 1  $D_1 = 0,203 \text{ м}$ ,  $d_1 = 0,09 \text{ м}$ ,  $m_0 = 204 \text{ кг}$ ; для компоновки 2  $D_1 = 0,14 \text{ м}$ ,  $d_1 = 0,12 \text{ м}$ ,  $m_0 = 36,8 \text{ кг}$ );  $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ ; амплітуда “грунтових” коливань  $a_0 = 0,006 \text{ м}$ ; їх частота  $p = 3\omega_0$ . Зв'язок між величиною  $a_0$  та амплітудами динамічної складової осьової сили на долоті  $P_d$  і відносного крутного моменту  $M_d$  наведено в роботі [1].

Крутний момент на долоті  $M_0$  під час обертання компоновки ротора подамо сумою

$$M_0 = M_n + M_{nut}(P_0 + p_0 S_0),$$

де  $M_n$  – складова моменту, що не залежить від осьової сили  $P_0$  і знаходиться за формулою Н. М. Філімонова [4]  $M_n = 0,55 D_d$ ;  $M_{nut}$  – питомий момент шарошкового долота. Останній має розмірність Н·м/кН і визначається сумою  $M_{nut} = \tilde{Q} + 120 D_d$ , де  $\tilde{Q}$  – дослідний коефіцієнт (змінюється в діапазоні 1 ... 2 Н·м/кН, прийняли  $\tilde{Q} = 1,5 \text{ Н·м/кН}$ ).

Аналіз отриманих результатів (табл. 1, рис. 1, 2) свідчить, що зі збільшенням статичної  $P_0$  і динамічної  $P_d$  складових осьової сили вітки парабол розходяться, а критична довжина  $\ell$ , за якої компоновка стає динамічно нестійкою, зменшується. Зменшується вона і в разі збільшення кутової швидкості обертання ротора. Так, зокрема для компоновки 1 при  $\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}$  критична довжина  $\ell$  становить 8,24 м, при  $\omega_0 = 3\pi \text{ с}^{-1}$  –  $\ell = 5,76 \text{ м}$ , а при  $\omega_0 = 4\pi \text{ с}^{-1}$  –  $\ell = 3,83 \text{ м}$ . Вище за ці довжини перший із центраторів розміщувати не можна, оскільки потрапимо в зону параметричного резонансу.

Для компоновки 2 критична довжина  $\ell$  становить 18 ... 20 м, але оскільки поріг збурюваності  $h$  є порівняно малим, то для компоновок з обважненим низом параметричний резонанс спостерігається рідко. Це пояснюється тим, що в реальних механічних системах завжди існує демпфування. Області динамічної нестійкості таких систем лежать усередині відповідних областей нестійкості, зображених на рис. 1 і 2, і не торкаються горизонталі  $Oa$ . Отже, за достатньо малих  $h$  параметричне збурення стає неможливим.

Табл. 1. Залежність координат  $a$ ,  $h$  зображальної точки від довжини  $\ell$  динамічно активної ділянки компоновки

$\ell, \text{ м}$	$P_0 = 20 \cdot 10^4 \text{ Н}, P_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ Н}$			$\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}, P_0 = 20 \cdot 10^4 \text{ Н}$			$\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}, P_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ Н}$							
	$\omega_0 = 3\pi \text{ с}^{-1}, \omega_0 = 4\pi \text{ с}^{-1}$			$P_0 = 3 \cdot 10^4 \text{ Н}, P_0 = 6 \cdot 10^4 \text{ Н}, P_0 = 12 \cdot 10^4 \text{ Н}$			$P_0 = 5 \cdot 10^4 \text{ Н}, P_0 = 10 \cdot 10^4 \text{ Н}, P_0 = 20 \cdot 10^4 \text{ Н}$							
	$a$	$h$	$h$	$a$	$h$	$h$	$a$	$h$	$h$					
2	5732,89	22,645	2117,06	10,064	851,52	5,661	5732,89	11,322	5732,89	22,645	5808,37	22,645	5732,89	22,645
4	281,14	5,661	70,87	4,473	-2,72	1,415	281,14	2,831	281,14	5,661	300,01	5,661	281,14	5,661
6	36,29	2,516	-0,07	1,118	-12,79	0,629	36,29	1,258	36,29	2,516	44,67	2,516	36,29	2,516
8	4,02	1,415	-5,18	0,629	-8,41	0,354	4,02	0,708	4,02	1,415	8,74	1,415	4,02	1,415
10	-2,03	0,905	-4,59	0,403	-5,49	0,226	-2,03	0,453	-2,03	0,905	0,99	0,906	-2,03	0,905
12	-3,09	0,629	-3,61	0,280	-3,80	0,157	-3,09	0,315	-3,09	0,629	-0,99	0,629	-3,09	0,629
КОМПОНОВКА 1														
5	270,00	0,654	114,65	0,290	60,28	0,163	270,00	0,327	270,00	0,654	272,18	0,654	270,00	0,654
10	15,07	0,163	5,81	0,073	2,57	0,041	15,07	0,082	15,07	0,163	15,61	0,163	15,07	0,163
15	2,24	0,073	0,56	0,032	-0,03	0,018	2,24	0,036	2,24	0,073	2,48	0,073	2,24	0,073
20	0,25	0,041	-0,22	0,018	-0,380	0,010	0,25	0,020	0,25	0,041	0,39	0,041	0,25	0,041
25	-0,24	0,026	-0,39	0,012	-0,45	0,007	-0,24	0,013	-0,24	0,026	-0,15	0,026	-0,24	0,026
30	-0,390	0,018	-0,44	0,008	-0,46	0,005	-0,39	0,009	-0,39	0,018	-0,33	0,018	-0,39	0,018
КОМПОНОВКА 2														

## Динамічна стійкість КНБК з амортизатором

Уперше розв'язок задачі про динамічну стійкість багаторозмірної компоновки з амортизатором запропоновано в роботі [1]. Він враховує жорсткість  $k_a$  та демпфування  $\alpha_a$  пружного елемента амортизатора, жорсткість  $k_n$  та демпфування  $\alpha_n$  розбурюваної породи.

Для проведення числових експериментів виберемо дво-, три- та чотирирозмірну компоновки. Вхідні параметри візьмемо такі:

Компоновка 3: жорсткість та демпфування розбурюваної породи  $k_n = 50 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $\alpha_n = 5000 \text{ Нс/м}$ ; діаметр долота  $D_D = 0,2953 \text{ м}$ ; довжина динамічно активної ділянки ОБТ  $\ell \text{ м}$ , довжина першої надамортизаторної секції ОБТ  $(L_1 - \ell) \text{ м}$ , де  $L_1 = 36 \text{ м}$ ; довжина інших секцій труб  $L_2 = 108 \text{ м}$ ,  $L_3 = 1800 \text{ м}$ ; внутрішні та зовнішні діаметри труб  $D_1 = 0,203 \text{ м}$ ,  $d_1 = 0,080 \text{ м}$ ;  $D_2 = 0,203 \text{ м}$ ,  $d_2 = 0,080 \text{ м}$ ;  $D_3 = 0,127 \text{ м}$ ,  $d_3 = 0,107 \text{ м}$ ; маса погонного метра труб кожної із секцій  $m_{01} = 215 \text{ кг}$ ,  $m_{02} = 215 \text{ кг}$ ,  $m_{03} = 33 \text{ кг}$ , густина та модуль пружності матеріалу труб  $\gamma_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ ,  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ; витрата промивальної рідини та її густина  $Q = 0,030 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_P = 1200 \text{ кг/м}^3$ ; площа вихідних отворів долота  $S_0 = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ; перепад тиску на долоті  $p_0 = 6,5 \times 1,2 \text{ МПа}$ ; статична складова осьового навантаження на долото  $P_0 = 160 \text{ кН}$ ; кутова швидкість обертання ротора  $\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}$ ; амплітуда “грунтового” збурення  $a_0 = 0,002 \text{ м}$ ; характеристики амортизатора  $k_a = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $\alpha_a = 200 \text{ Нс/м}$ .

Компоновка 4:  $k_n = 50 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ;  $\alpha_n = 5000 \text{ Нс/м}$ ;  $D_D = 0,2953 \text{ м}$ ;  $L_1 = 36 \text{ м}$ ;  $L_2 = 108 \text{ м}$ ;  $L_3 = 1800 \text{ м}$ ;  $D_1 = 0,229 \text{ м}$ ;  $d_1 = 0,090 \text{ м}$ ;  $D_2 = 0,203 \text{ м}$ ;  $d_2 = 0,080 \text{ м}$ ;  $D_3 = 0,127 \text{ м}$ ;  $d_3 = 0,107 \text{ м}$ ;  $m_{01} = 273 \text{ кг}$ ;  $m_{02} = 215 \text{ кг}$ ;  $m_{03} = 33 \text{ кг}$ ;  $\gamma_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ;  $Q = 0,030 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_P = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $S_0 = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $p_0 = 6,5 \times 1,2 \text{ МПа}$ ;  $P_0 = 160 \text{ кН}$ ;  $\omega_0 = 2\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $a_0 = 0,002 \text{ м}$ ;  $k_a = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $\alpha_a = 200 \text{ Нс/м}$ .

Компоновка 5:  $k_n = 50 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ;  $\alpha_n = 5000 \text{ Нс/м}$ ;  $D_D = 0,2953 \text{ м}$ ;  $L_0 = 5 \text{ м}$ ;  $L_1 = 25 \text{ м}$ ;  $L_2 = 130 \text{ м}$ ;  $L_3 = 3100 \text{ м}$ ;  $D_0 = 0,245 \text{ м}$ ;  $d_0 = 0,100 \text{ м}$ ;  $D_1 = 0,229 \text{ м}$ ;  $d_1 = 0,090 \text{ м}$ ;  $D_2 = 0,203 \text{ м}$ ;  $d_2 = 0,080 \text{ м}$ ;  $D_3 = 0,140 \text{ м}$ ;  $d_3 = 0,120 \text{ м}$ ;  $m_{00} = 314 \text{ кг}$ ;  $m_{01} = 273 \text{ кг}$ ;  $m_{02} = 215 \text{ кг}$ ;  $m_{03} = 36,8 \text{ кг}$ ;  $\gamma_T = 7800 \text{ кг/м}^3$ ;  $E = 2,06 \cdot 10^{11} \text{ Па}$ ;  $Q = 0,030 \text{ м}^3/\text{с}$ ;  $\gamma_P = 1200 \text{ кг/м}^3$ ;  $S_0 = 2,84 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$ ;  $p_0 = 6,5 \times 1,2 \text{ МПа}$ ;  $P_0 = 220 \text{ кН}$ ;  $\omega_0 = 3\pi \text{ с}^{-1}$ ;  $a_0 = 0,002 \text{ м}$ ;  $k_a = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$ ,  $\alpha_a = 200 \text{ Нс/м}$ .

Теоретично одержані результати наведено на рис. 3 – 7 і в таблицях 2 – 4. Їх аналіз (як і раніше, цікавимося, у першу чергу, параметричним резонансом на найнижчій частоті) дає можливість виявити, що визначальними параметрами при вивченні динамічної стійкості КНБК з амортизатором є місце встановлення віброзахисного пристрою (довжина динамічно активної ділянки обваженого низу) та кутова швидкість обертання ротора (див. рис. 3 – 5).

Доволі відчутним є також вплив характеристик розбурюваної породи та пружного елемента амортизатора (див. рис. 6, 7, одержані для компоновки 5). Правда, в цьому випадку в разі зміни параметрів  $k_n$ ,  $\alpha_n$ ,  $k_a$ ,  $\alpha_a$  координати  $a$  зображальних точок залишаються практично незмінними, і питання про динамічну стійкість компоновки в тому чи іншому випадку вирішується величиною порога збурюваності  $h$  (шириною областей параметричного резонансу).

У той же час зміна в реальних для роторного буріння межах статичної складової осевого навантаження  $P_0$  на долото, витрати промивальної рідини  $Q$ , довжини обваженого низу  $L_{обт}$  порівняно мало впливають на координати  $a$ ,  $h$  зображальних точок діаграми Айнса–Стретта (див. дані табл. 2–4, одержані для компоновки 5).

Вплив переносної складової крутного моменту та інерційної складової від обертання бурильної колони на координати  $a$  зображальних точок також порівняно невеликий.

Для підвищення ефективності бурових робіт підбір параметрів КНБК при випереджувальному темпі зношуваності опор, у порівнянні з оснащенням, слід здійснювати за умови ослаблення, а в разі однакового або випереджувального темпу зношуваності оснащення – підсилення динамічного впливу компоновки на долото.

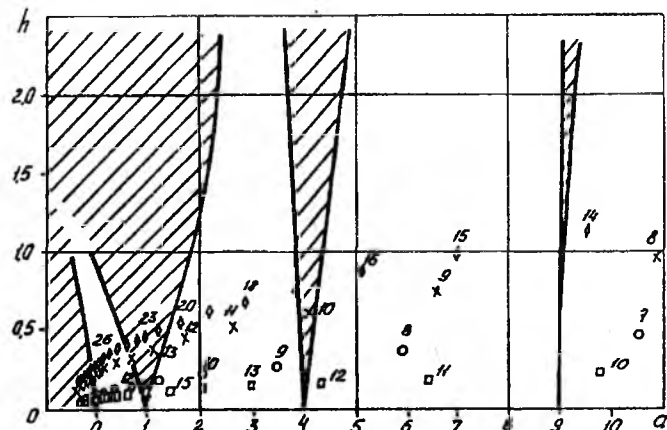


Рис. 3. Вплив місця встановлення амортизатора на динамічну стійкість КНБК (компоновка 3):

$$\diamond - \omega_0 = \pi \text{ c}^{-1}, \square - \omega_0 = 2\pi \text{ c}^{-1}, \times - \omega_0 = 3\pi \text{ c}^{-1}, \circ - \omega_0 = 4\pi \text{ c}^{-1}$$

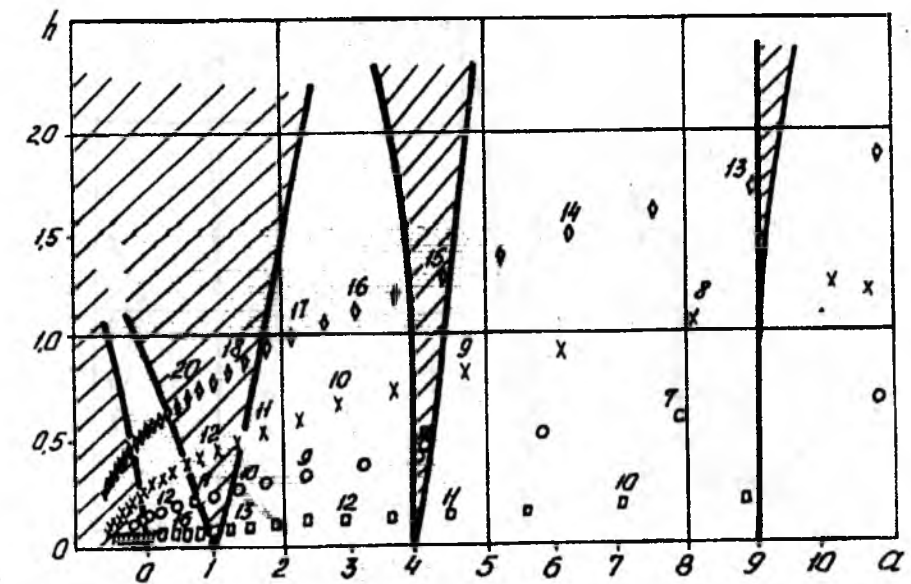


Рис. 4. Вплив місця встановлення амортизатора на динамічну стійкість КНБК (компоновка 4):

$$\diamond - \omega_0 = \pi \text{ c}^{-1}, \square - \omega_0 = 2\pi \text{ c}^{-1}, \times - \omega_0 = 3\pi \text{ c}^{-1}, \circ - \omega_0 = 4\pi \text{ c}^{-1}$$

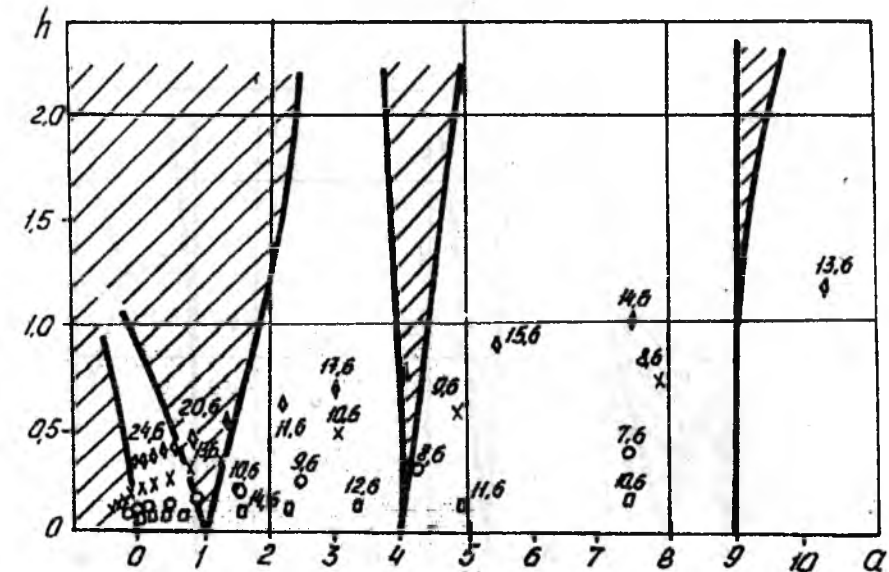


Рис. 5. Вплив місця встановлення амортизатора на динамічну стійкість КНБК (компоновка 5):

$$\diamond - \omega_0 = \pi \text{ c}^{-1}, \square - \omega_0 = 2\pi \text{ c}^{-1}, \times - \omega_0 = 3\pi \text{ c}^{-1}, \circ - \omega_0 = 4\pi \text{ c}^{-1}$$

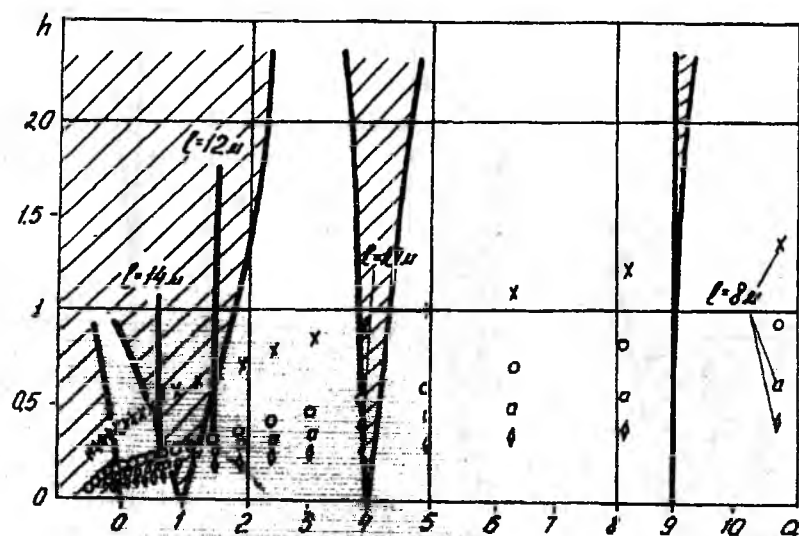


Рис. 6. Вплив параметрів  $k_a$ ,  $\alpha_a$  амортизатора у випадку зміни місця його встановлення на координати зображальних точок (компонівка 5):  
 $\diamond$  -  $k_a = 5 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_a = 200$  Нс/м;  $\square$  -  $k_a = 15 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_a = 600$  Нс/м;  
 $\times$  -  $k_a = 25 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_a = 1000$  Нс/м;  $\circ$  -  $k_a = 40 \cdot 10^6$  Н/м,  
 $\alpha_a = 1600$  Нс/м

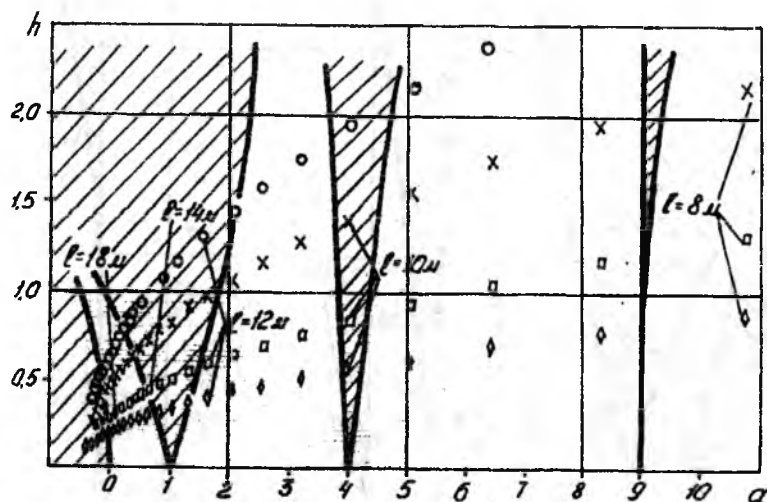


Рис. 7. Вплив характеристик  $k_n$ ,  $\alpha_n$  розбурюваної породи на координати зображальних точок у випадку зміни місця встановлення амортизатора (компонівка 5):

- $\diamond$  -  $k_n = 50 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_n = 5 \cdot 10^4$  Нс/м;  
 $\square$  -  $k_n = 100 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_n = 10 \cdot 10^4$  Нс/м;  
 $\times$  -  $k_n = 200 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_n = 20 \cdot 10^4$  Нс/м;  
 $\circ$  -  $k_n = 300 \cdot 10^6$  Н/м,  $\alpha_n = 30 \cdot 10^4$  Нс/м

Таблиця 2. Залежність координат  $a, h$  зображальних точок діаграми Айнса–Стретта від статичної складової осевого навантаження на долото у випадку зміни місця встановлення амортизатора в КНБК

$l, \text{ м}$	Координати зображальних точок				
	$a$				$h$
	$P_0 = 100 \text{ кН}$	$P_0 = 150 \text{ кН}$	$P_0 = 200 \text{ кН}$	$P_0 = 250 \text{ кН}$	
8	11,076	10,933	10,789	10,646	0,863
10	4,207	4,116	4,024	3,933	0,558
12	1,759	1,696	1,633	1,569	0,393
14	0,720	0,673	0,627	0,580	0,293
16	0,221	0,186	0,150	0,114	0,228
18	-0,041	-0,069	-0,097	-0,125	0,184
20	-0,189	-0,111	-0,234	-0,257	0,152
22	-0,276	-0,295	-0,314	-0,333	0,129
24	-0,331	-0,347	-0,362	-0,378	0,111
26	-0,366	-0,379	-0,393	-0,406	0,098

Аналітичне вивчення поздовжніх коливань показало, що зміна місця встановлення амортизатора від 0 м до значень, що відповідають лівій ( $a < 0$ ) межі першої області динамічної стійкості динамічно активної ділянки обваженого низу, приводить до зростання коефіцієнтів динамічності  $k_d$  компоновки. Оскільки зношеність оснащення відпрацьованих шарошкочових доліт значно частіше перевищує зношеність опор, то для вирівнювання цих параметрів підамортизаторну масу слід вибрати (з урахуванням обмеження лівою межею першої області динамічної стійкості КНБК) якомога більшу.

Наведені міркування лягли в основу рекомендацій щодо вибору місця встановлення віброзахисних пристроїв у компоновках обваженого низу в процесі буріння роторним способом. Рекомендовані діапазони довжин підамортизаторних ділянок ОБТ дворовмірних компоновок наведені в таблиці 5.

Таблиця 3. Вплив витрати промивальної рідини на координати  $a, h$  зображальних точок діаграми Айнса–Стретта

$l, \text{ м}$	Координати зображальних точок				
	$a$				$h$
	$Q = 0,020 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q = 0,025 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q = 0,030 \text{ м}^3/\text{с}$	$Q = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}$	
8	10,736	10,734	10,732	10,730	0,480
12	1,609	1,608	1,607	1,606	0,223
16	0,137	0,136	0,136	0,135	0,133
20	-0,243	-0,243	-0,243	-0,243	0,091
24	-0,368	-0,369	-0,369	-0,369	0,069
28	-0,417	-0,417	-0,417	-0,417	0,057

Таблиця 4. Залежність координат  $a, h$  зображальних точок діаграми Айнса–Стретта від довжини обваженого низу  $L_{OBT}$  бурильної колони та місця встановлення  $\ell$  амортизатора

$\ell, \text{ м}$	Координати зображальних точок				
	$h$				$a$
	$120 + \ell$	$140 + \ell$	$160 + \ell$	$180 + \ell$	
8	0,925	0,787	0,718	0,675	10,732
12	0,426	0,353	0,319	0,299	1,607
16	0,252	0,202	0,180	0,167	0,136
20	0,172	0,131	0,115	0,107	-0,243
24	0,130	0,094	0,081	0,074	-0,369
28	0,108	0,071	0,060	0,054	-0,417

Розрахунки проводилися для порід VI–VII категорій твердості згідно із класифікацією проф. Л. А. Шрейнера. Для більш м'яких порід області параметричного резонансу звужуються, що лише розширює допустимі діапазони зміни довжин  $\ell$ , що розглядаються.

Зростання кутової швидкості обертання ротора приводить до зменшення довжин  $\ell$  обваженого низу, що відповідають межах головної (першої) області динамічної стійкості КНБК, а зростання геометричних розмірів поперечних перерізів ОБТ – до збільшення цих довжин.

Таблиця 5. Рекомендовані довжини ділянок ОБТ під амортизатором

Типорозміри труб*	$\omega_0, \text{ c}^{-1} (n, \text{ об/хв})$			
	$\pi (30)$	$2\pi (60)$	$3\pi (90)$	$4\pi (120)$
ОБТС 1-133	–	11,75–12,50	11,5–12,75	8,50–9,00
ОБТС 1-146	–	12,5–14,75	12,0–14,0	9,5–11,5
ОБТС 1-178	18,0–20,0	13,5–16,0	12,5–14,5	11,0–12,5
ОБТС 1-203	21,5–24,0	15,0–18,0	13,5–16,0	11,5–14,0
ОБТС 1-229	23,0–26,5	16,5–20,0	14,0–17,5	12,0–15,0

\*Рекомендації справедливі і для труб типу ОБТС 2.

#### Висновки

1. Знайдено і проаналізовано розв'язок задачі про динамічну стійкість низу бурильної колони з опорно-центрувальними елементами з урахуванням відносного і переносного крутих моментів, утрат тиску на долоті та інерційних складових, породжених рухом промивальної рідини й обертанням бурильної колони. Удосконалення технологій відпрацювання шарошkových доліт за рахунок пошуку оптимальних значень складових осьового навантаження і швидкості обертання ротора слід проводити в областях динамічної стійкості компоновки.

2. Включення до складу компоновки амортизатора-роз'єднувача вище долота призводить до виникнення в КНБК динамічно активної ді-

лянки, яка дає змогу створити додаткове динамічне навантаження на долото, за умови уникнення в процесі експлуатації бурильної колони зон параметричного резонансу, покращити показники відпрацювання доліт. Апробацією в промислових умовах [1] розроблених рекомендацій щодо вибору місця установки амортизатора в КНБК у процесі буріння-ротормним способом встановлено збільшення механічної швидкості поглиблення свердловини й проходки на долото в середньому на 15–20%, покращення умов роботи опор і оснащення шарошkových доліт.

1. Мойсишин В. М. Основи механіки бурильної колони при поглибленні свердловин роторним способом : дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук / В. М. Мойсишин. – Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 1996. – 498 с.

2. Расчет бурильных труб в геологоразведочном бурении / Е. Ф. Эпштейн, В. И. Мацейчик, И. И. Ивахнин [и др.]. – М. : Недра, 1979. – 160 с.

3. Мойсишин В. М. Динамічна стійкість низу бурильної колони з опорно-центрувальними елементами / В. М. Мойсишин, І. М. Гураль, Я. С. Яремійчук // Нафтова і газова промисловість. – 2003. – № 1. – С. 34–36.

4. Григулецкий В. Г. Проектирование компоновок нижней части бурильной колонны / В. Г. Григулецкий, В. Т. Лукьянов. – М. : Недра, 1990. – 302 с.

#### DYNAMIC FIRMNESS OF BOTTOM OF BORING COLUMN WITHOUT INTERMEDIATE AND WITH INTERMEDIATE ELEMENTS IN ARRANGEMENT

V.M. Moisyshyn

Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpat's'ka street, Ivano-Frankiv'sk, 76019, Ukraine,  
ph. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

The author formulates and solves problems of dynamic stability of a bottom-hole drill string assembly with intermediation devices (support-centring devices, shock-absorbers) and without them.

**Key words:** bottom-hole drill string assembly, dynamic stability, support-centring devices, shock-absorber.

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВІБРОУДАРНИХ АГРЕГАТИВ ІЗ ЛАНЦЮГОВО-РОЗГАЛУЖЕНИМ СПОСОБОМ З'ЄДНАННЯ ТВЕРДИХ ТІЛ

В.П. Нісонський<sup>1</sup>, В.М. Шопя<sup>2</sup>, І.І. Герєга<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстигача НАН України, 7960,1 Україна, Львів, вул. Наукова 3-б.

*Запропоновано до розгляду математичну модель динамічного режиму роботи віброударних агрегатів із ланцюгово-розгалуженим способом з'єднання твердих тіл. Ураховано змінне технологічне навантаження, а також контакт робочих поверхонь. Систему рівнянь подано в матричному вигляді. Розглянуто динамічну схему віброударної ґратки моделі 31327.*

*Ключові слова: математична модель, динамічний режим роботи, віброударний агрегат, ланцюгово-розгалужений спосіб з'єднання твердих тіл.*

Машини й агрегати, в яких використовується вібрація, знаходять усе більш широке застосування. Це обумовлено поширенням вібраційних технологій у техніці, медицині, будівництві та інших сферах людської діяльності. Як і в теоретичних дослідженнях про вібрацію, так і в практичному її використанні існує безліч недосліджених моментів.

Велике практичне застосування знайшли віброагрегати, що характеризуються співудараннями між їх окремими елементами чи ланками, так звані віброударні машини. Використання віброударної дії вигідне тим, що дає змогу одержати значний результат при мінімізації технологічних засобів [1]. У багатьох технологічних процесах віброударні явища застосовуються більш ефективно, ніж чисто вібраційні (будівельні машини, віброінструменти, транспортні засоби і грохоти, вібромайданчики для ущільнення бетонної суміші, машини для ливарного виробництва та інші). Вібрація виникає і в процесі буріння свердловин, але тут вона відіграє шкідливу роль, оскільки призводить до руйнування інструмента (долота) і зниження техніко-економічних показників.

У нашій моделі розглядатиметься система твердих тіл, виготовлених із твердого ізотропного матеріалу і з'єднаних пружними зв'язками. Ми розглядаємо тверді ізотропні тіла. При взаємодії тіла з пружними зв'язками будемо вважати тіло твердим, тобто таким, що не піддається деформації. Але при контактній взаємодії робочих органів технологічного навантаження з робочими органами опорної рами треба вважати

тіла пружними, тому що силами пружності, що виникають під час контактування, вже не можна знехтувати. Пружні сили, що виникають під час контактної взаємодії, будемо вважати лінійними, тобто такими, що описуються лінійним законом Гука.

У ливарному виробництві знайшли широке застосування багатосекційні вібраційні агрегати з послідовним та ланцюгово-розгалуженим [2; 3] способами розміщення інерційних тіл.

Характерною особливістю багатосекційних агрегатів є взаємодія кількох робочих органів із технологічним навантаженням. За один період коливань інерційних тіл відбувається не менше двох контактів технологічного навантаження з робочими органами. Один контакт відбувається з робочим органом опорної рами, а один (або декілька) – з робочими органами інерційно-ударних машин (вибивних ґраток). Такий режим роботи багатосекційних агрегатів сприяє досягненню їх більшої ефективності й дає змогу зменшити встановлену потужність приводних електродвигунів [2]. У промисловості також застосовується і комбінований (ланцюгово-розгалужений) спосіб з'єднання твердих тіл, яким комплектують агрегат (вибивну ґратку). Такий спосіб з'єднання твердих тіл використовується, наприклад, у випадку комплектування вибивної ґратки моделі 31327, зображеної на рис. 1.

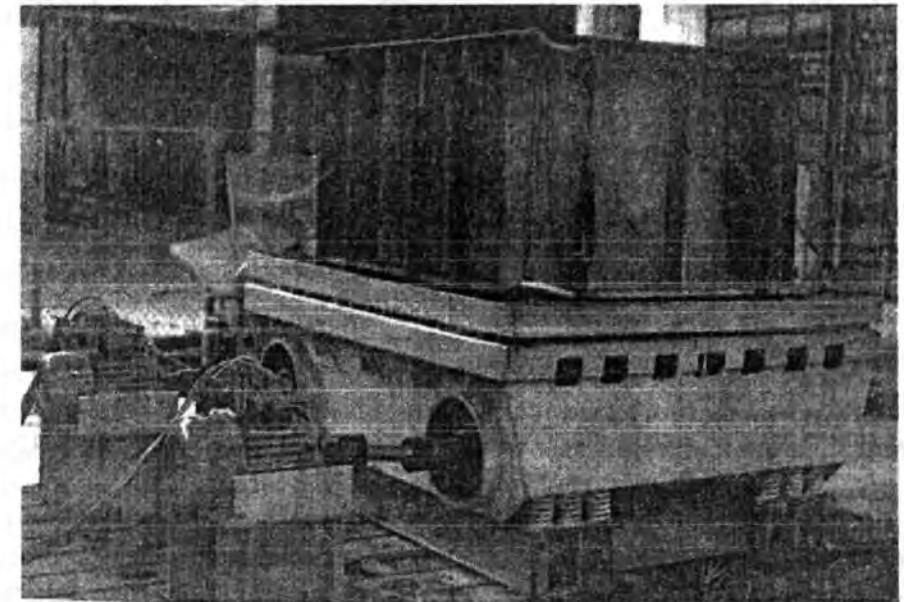


Рис. 1. Загальний вигляд віброударної ґратки моделі 31327

Вибивна інерційна ґратка моделі 31327 використовується для вибивання формівної технологічної суміші з ливарних форм та стрижневих сумішей із відливок в умовах вибивання в ливарних цехах. За необхідності ґратки можна з'єднувати в багатосекційні агрегати (блоки) із декількох (двох, чотирьох, шести) ґраток.

Дослідженням віброударних коливальних систем займалися І. І. Гергега, В. М. Шопа, І. С. Лозовий, М. Р. Козулькевич та ін. Розробкою методів розрахунку нелінійних динамічних систем вібраційних машин займався В. П. Франчук; науковими основами створення гірських вібраційних транспортно-технологічних машин важкого типу – А. Г. Червоненко, теорією моделювання коливальних робочих органів механізмів та її застосуванням – А. Н. Марюта. Динаміку несучих конструкцій бурових установок досліджували С. Г. Калінін, Є. В. Харченко та ін. Останнім часом з'явилися роботи З. А. Стоцько, Б. І. Сокола, В. Г. Топільницького та ін. з моделювання та дослідження динаміки роботи вібраційних машин об'ємної обробки виробів.

Загальна динамічна схема вибивальної інерційно-ударної ґратки моделі 31327 з двома вибивними ґратками зображена на рис. 2:

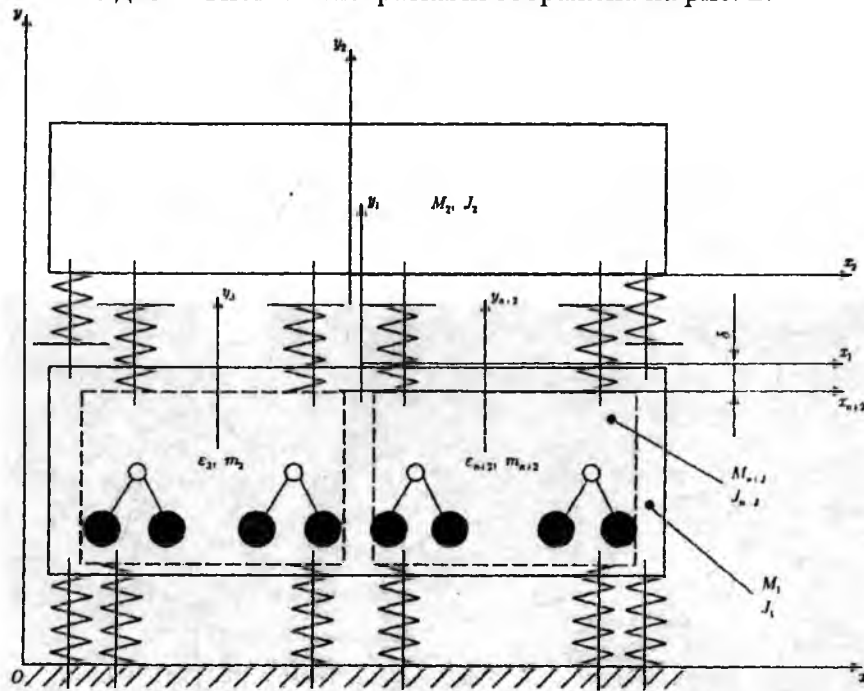


Рис. 2. Загальна динамічна схема віброударної ґратки моделі 31327

На рис. 3 зображена загальна динамічна схема багатосекційного агрегату з  $n$  вибивними ґратками.

На загальній фундаментній рамі ( $i=1$ ) встановлено паралельно  $N$ -ну кількість вібраційних вибивних ґраток, з'єднаних із рамою пружними зв'язками жорсткістю  $c_{1n}$  (для  $n$ -ї ґратки). Технологічне навантаження ( $i=3$ ) встановлено на опорній рамі ( $i=2$ ). Фундаментна й опорна рами з'єднані з основою (фундаментом) за допомогою пружних (варіант 1) або жорстких (варіант 2) зв'язків. Жорсткість пружних зв'язків, що з'єднують фундаментну й опорну рами з основою, позначимо відповідно  $c_{01}$  і  $c_{02}$ .

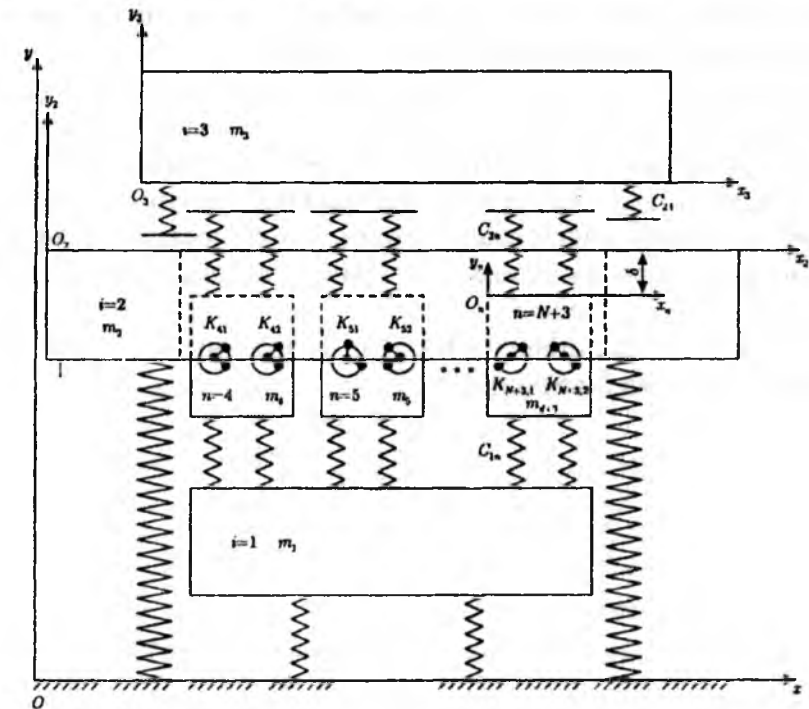


Рис. 3. Загальна схема багатосекційного віброударного агрегату

У положенні статичної рівноваги між технологічним навантаженням і робочими органами ґратки передбачено проміжок  $\delta$  коливальних робочих органів, причому амплітуда  $A$  коливальних робочих органів більша за відстань  $\delta$ :

$$A > \delta. \quad (1)$$

Вибивальні ґратки ( $i = 4 \dots N + 3$ ), що виконують коливальний рух, руйнують формувальну суміш у ливарній формі ( $i=3$ ) за рахунок ударів, що наносяться знизу по хрестовинах опоки [2; 3]. Повторне руйнування суміші здійснюється шляхом співударяння ливарної форми з робочими органами опорної рами. У запропонованій моделі віброагрегату вибивальні ґратки складають блок і коливаються в одній вертикальній площині. Таким чином, динамічна схема віброагрегату являє собою коливальну систему твердих тіл із ланцюгово-розгалуженим (послідовно-паралельним) способом з'єднання мас пружними елементами.

Введемо такі системи координат для коливальної системи, зображеної на рис. 3:

- $XOY$  – нерухома система координат, що жорстко з'єднується з основою і вибирається довільно;
- $X_iO_iY_i$ ,  $X_nO_nY_n$  – рухомі системи координат, що жорстко з'єднуються відповідно з  $i$ -м твердим тілом ( $i = 1, 2, 3$ ) і  $n$ -ю ґраткою ( $n = 4, 5 \dots N + 3$ ). Осі рухомих систем координат  $O_nY_n$ ,  $O_nX_n$  вибираються так, щоб моменти сил тертя при складанні рівнянь руху

дорівнювали нулеві. Тому відповідні осі спрямовані вздовж поверхонь контакту, як зображено на рис. 2 та рис. 3.

Для твердих тіл системи (за винятком технологічного навантаження) відповідні осі  $O_i X_i$  розміщені вздовж лінії, що з'єднує точки кріплення верхніх пружних елементів; для технологічного навантаження – вздовж лінії, що з'єднує точки кріплення нижніх пружних елементів.

Назвемо вільним такий стан системи, що відповідає недеформованому стану всіх пружних зв'язків. У вільному стані рухомі системи координат (рис. 2, 3) паралельні.

Рівняння руху інерційних елементів розрахункової схеми подано рівняннями Лагранжа 2-го роду [3]

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_s} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_s} = Q_s, \quad (2)$$

де  $T$  – кінетична енергія системи;

$q_s$  –  $s$ -та узагальнена координата;

$Q_s$  –  $s$ -та узагальнена сила.

Кількість узагальнених координат  $s$  у (1) визначається [3; 4]:

$$s = 3 \cdot [N + 1 + \sigma(\xi_1) + \sigma(\xi_2)] + \sum_{n=4}^{N+3} [K_n + \sum_{k=1}^{n_n} P_{nk} + L_n], \quad (3)$$

де  $\sigma(\xi_1), \sigma(\xi_2)$  – одинична функція Хевісайда,  $\sigma(\xi) = 1$  при  $\xi \geq 0$ ;  $\sigma(\xi) = 0$  при  $\xi < 0$ ;  $\xi_{1,2} = +1$  у випадку пружного з'єднання відповідної рами з фундаментом (основою) та  $\xi_{1,2} = -1$  у випадку жорсткого з'єднання відповідної рами з фундаментом (основою);

$K_n$  – кількість вібробудників, встановлених на вібромашині;

$P_{nk}$  – кількість рухомих дебалансних мас, з'єднаних із валом вібробудника пружними зв'язками;

$L_n$  – кількість приводних електродвигунів, які встановлено разом із вібробудником або на нерухомій рамі.

За узагальнені координати системи прийнято:

$x_i, y_i$  – координати початку системи координат  $X_i O_i Y_i$ , жорстко зв'язаної відповідно з  $i$ -м інерційним тілом, відносно нерухомої системи координат  $XOY$ ;

$x_n, y_n$  – координати початку системи координат  $X_n O_n Y_n$  точки  $O_n$ , жорстко зв'язані відповідно з  $n$ -ю граткою, відносно системи координат  $XOY$ ;

$\varphi_i, \varphi_n$  – кути повороту відповідно інерційного елемента і робочого органа вібраційного агрегату (гратки);

$\varphi_{nk}, \beta_{nl}$  – кути повороту відповідно вала вібробудника й приводного двигуна;

$\psi_{nkp}$  – кут повороту дебалансної маси.

Кути  $\varphi_i, \varphi_n, \varphi_{nk}, \beta_{nl}, \psi_{nkp}$  відраховуються проти руху годинникової стрілки від додатного напрямку осі  $OX$ .

При розробці математичної моделі прийнято такі допущення:

- пружні елементи неінерційні;
- маси, що входять до системи, являють собою жорсткі інерційні тіла, що виконують плоскопаралельний рух;
- враховується жорсткість пружних елементів на розтяг і зсув.

Технологічний процес вибивання формівної суміші з опок під час роботи вібраційного вибивального агрегату супроводжується зміною маси технологічного навантаження. Це дає підстави до прийняття допущення, що в процесі виконання технологічної операції маса і момент інерції є функціями часу:

$$m_3 = f_{m3}(t); \quad I_3 = f_{I3}(t), \quad (4)$$

де  $m_3, I_3$  – відповідно маса і центральний момент інерції технологічного навантаження.

В [2; 4] наведено спосіб, за яким можливо, не вдаючись до рівнянь Лагранжа 2-го роду, побудувати математичну модель для будь-якої ланцюгової динамічної схеми вібраційної машини. Він полягає в тому, що для вибраної динамічної схеми визначають матрицю коефіцієнтів для кожного твердого тіла. Згідно з розташуванням тіл у динамічній системі, укладають послідовно матриці, що їм відповідають, у загальну матрицю коефіцієнтів усієї системи, сполучаючи їх діагоналі з діагоналлю загальної матриці. Такий спосіб побудови матриці математичної моделі зумовлений тим, що матриці інерційних величин  $[A_n^\Sigma] [A_i]$  містять фізичні величини, знаходження яких є чисто технічним питанням і для конкретних динамічних систем не виникає труднощів. Згаданий спосіб побудови загальної матриці для довільної системи рівнянь поширюється й на математичну модель ланцюгово-розгалужених віброударних динамічних систем. На рис. 2 зображено простішу динамічну схему віброударної машини з ланцюгово-розгалуженим способом з'єднання мас. До цієї схеми входять чотири твердих тіла: опорна рама ( $i=1$ ), технологічне навантаження ( $i=2$ ) та дві віброударні гратки ( $i=3,4$ ). Кожна гратка містить по два вібробудника; на валу кожного вібробудника розміщено по дві дебалансні маси. Електродвигуни, що приводять у рух вали вібробудників, знаходяться на нерухомій основі. Опорна рама та віброгратки з'єднані з фундаментом пружними зв'язками. Для такої динамічної схеми математична модель у матричній формі матиме вигляд [5]:

$$\begin{bmatrix} A_1^\Sigma & & & O \\ & A_2^\Sigma & & \\ & & A_1 & \\ O & & & A_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} K_1^\Sigma \\ K_2^\Sigma \\ K_1 \\ K_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_1^\Sigma \\ B_2^\Sigma \\ B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Рівняння руху (5) є суттєво нелінійною системою звичайних диференціальних рівнянь другого порядку, не розв'язаних відносно другої похідної. Розв'язати таку систему можливо чисельними методами з допомогою пакета прикладних програм.

На підставі даної моделі проведено розрахунки максимальної теоретичної частоти технологічного навантаження в динамічному доре-



зональному режимі роботи для ґратки моделі 31327. На рис. 4 зображено графіки теоретичної та експериментальної частоти технологічного навантаження [6].

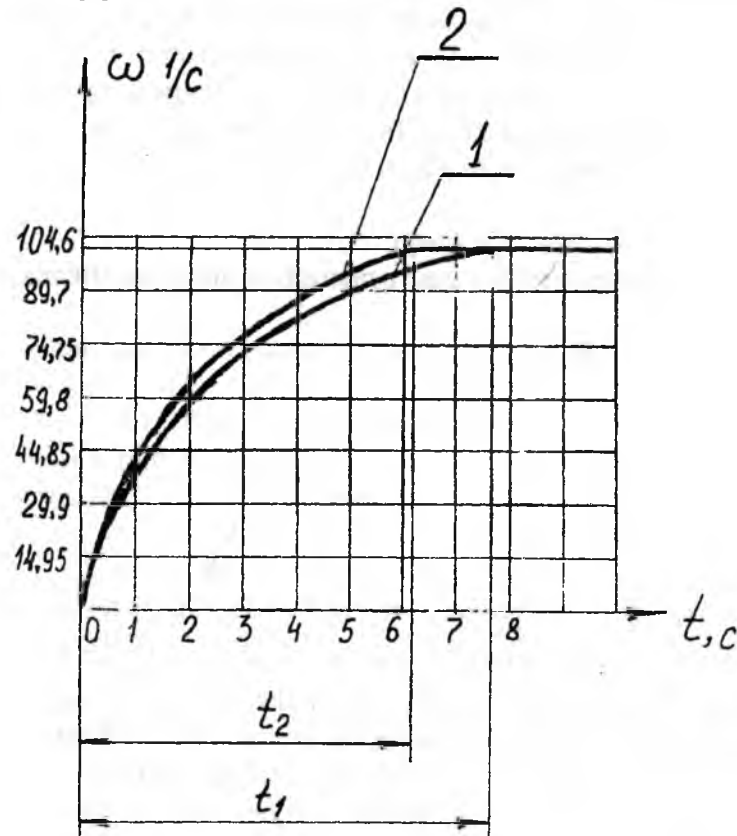


Рис. 4. Порівняння теоретичної та експериментальної частоти коливань технологічного навантаження для ґратки 31327

Порівняння побудованих графіків указує на прийнятну точність розрахунків побудованої математичної моделі з даними, отриманими експериментальним шляхом.

1. Вибрации в технике. – М. : Машиностроение, 1981. – Т. 4. – 512 с.
2. Обобщённая математическая модель колебательной системы с учётом изменения положения и величины технологической нагрузки / И. И. Гергега, И. С. Лозовой, М. Р. Козулькевич, В. М. Шопа // Докл. АН УССР. – 1989. – № 12. – С. 32–35.
3. Гергега І. І. Математична модель ланцюгово-розгалуженої віброударної коливальної системи / І. І. Гергега, В. П. Нісонський // Доповіді НАН України. – 1994. – № 35. – С. 58–63.
4. Математическая модель многосекционных выбивных агрегатов с учётом рассеяния энергии / В. П. Нисонский, И. И. Гергега, М. Р. Козулькевич, Ю. В. Гуцуляк // Пробл. прочности. – 1994. – № 10. – С. 30–36.

5. Нісонський В. П. Математична модель багатосекційного вібраційного агрегату / В. П. Нісонський, І. І. Гергега, В. М. Шопа // Доп. НАН України. – 2000. – № 6. – С. 62–65.
6. Нісонський В. П. Математичне моделювання динамічного режиму роботи віброударних агрегатів з ланцюгово-розгалуженим способом з'єднання твердих тіл / В. П. Нісонський // Автомат. вироб. процесів у машинобуд. та приладобуд. – Вип. 40. – С. 170–177.

### Mathematical Simulation of Vibropercussion Units where Solid Bodies are Connected in a Chain Ramified Way

V.P. Nisonsky<sup>1</sup>, V.M. Shopa<sup>2</sup>, I.I. Gerrega<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, 15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivsk, 76019, Ukraine, ph. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)

<sup>2</sup>Pidstyhach Institute of Applied Problems in Mechanics and Mathematics of NASU, 3-b Naukova str., Lviv, 79601, Ukraine

*A mathematical simulation of the dynamic work regime of vibropercussion units where solid bodies are connected in a chain ramified way is presented in this paper. The variable mass of technological loading and contact of working surfaces is taken into consideration. The system of equations is given in a matrix way. The dynamic scheme of vibrograte model 31327 is considered.*

**Key words:** mathematical model, dynamic office hours, vibrooudarniy aggregate, chain-ramified method of connection of solids.

## ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЦІОНАРНОГО ПОЛЯ В АНТИПРИЗМІ

С.О. Камасва

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 21 27; e-mail: [Svitlana.Kamaeva@gmail.com](mailto:Svitlana.Kamaeva@gmail.com)

Роботу присвячено дослідженню стаціонарного поля в антипризмі. Із цією метою побудовано декілька математичних моделей та проведено порівняння отриманих результатів із результатами, одержаними за відомими дискретними методами.

**Ключові слова:** стаціонарне поле, антипризма, задача теплопровідності, метод скінченних різниць, метод Монте-Карло.

**Постановка проблеми.** Многогранники внаслідок їх незвичайних властивостей симетрії досліджуються з давніх часів. Вони знайшли широке застосування в архітектурі, кристалографії, декоративному мистецтві, дизайні, ювелірній промисловості, а також у математиці, фізиці, медицині, теорії графів тощо. Розмаїття їхніх форм вражає. Мабуть тому їх прийнято класифікувати за типами: правильні та напівправильні опуклі многогранники (тіла Платона та Архімеда відповідно), правильні неопуклі многогранники (тіла Кеплера–Пуансо), опуклі паралелепедри (тіла Федорова). Але навіть у межах одного типу вони суттєво відрізняються (і не лише за формою). Взяти хоча б такі архімедові тіла, як призма та антипризма. Перші, будучи найпростішими напівправильними многогранниками, легко піддаються формалізації. Саме тому на сьогоднішній день накопичено певний досвід розв'язування різних інженерних задач у цих тілах. У той же час задачі в антипризмах залишаються маловивченими.

**Аналіз попередніх публікацій.** Великий внесок у розвиток теорії многогранників зробив відомий грецький математик Архімед (близько 287 р. до н. е. – 212 р. до н. е.). Вважається, що саме він уперше побудував напівправильні многогранники, які назвали в його честь архімедовими тілами. На жаль, рукопис Архімеда не зберігся через пожежу в Александрійській бібліотеці. Проте існування цього рукопису підтверджується посиланням на нього в роботах інших учених, зокрема математика Паппа. Архімед розглядав правильні призми та антипризми як дві нескінченні послідовності многогранників. Проте він, напевно, і не уявляв собі, яку роль відіграватимуть антипризми при розв'язуванні задач, що виникнуть через 2000 років. Прикладом цього може бути знаменита задача Томсона. Відомо, що під час вивчення планетарної моделі атома Дж. Дж. Томсон (1856–1940) проводив експерименти зі знаходження найкращих розташувань зарядів на сфері з метою мінімізації потенціальної енергії системи. З появою комп'ютерів проводилось багато

числових експериментів, однак лише наприкінці ХХ ст. окремі випадки були розв'язані математично строго. Точні розв'язки задачі Томсона [1; 2] були отримані методами теорії наближення функції, основоположником якої є П. Л. Чебишов (1821–1894). Вдалось довести, наприклад, що для шести зарядів найкращою конструкцією в плані глобального мінімуму потенціальної енергії виявилася саме антипризма, а не трикутна призма, як очікувалось. Дана задача є яскравим прикладом того, що антипризми є цікавим об'єктом досліджень, проте моделювати їх надзвичайно складно через особливості їх будови. Можливо саме тому на сьогодні в антипризмах не проведено досліджень стаціонарних фізичних полів.

**Мета роботи.** У рамках температурної задачі побудувати стаціонарне поле антипризми та порівняти отримані результати з розв'язками, знайденими за відомими дискретними методами.

**Основна частина.** Антипризма – це напівправильний многогранник, в якого дві паралельні грані – рівні між собою правильні  $n$ -кутники, а решта  $2n$  граней – правильні трикутники [3]. Розглянемо антипризму з трикутною основою, оскільки вона є найпростішою в сімействі антипризм (рис. 1).

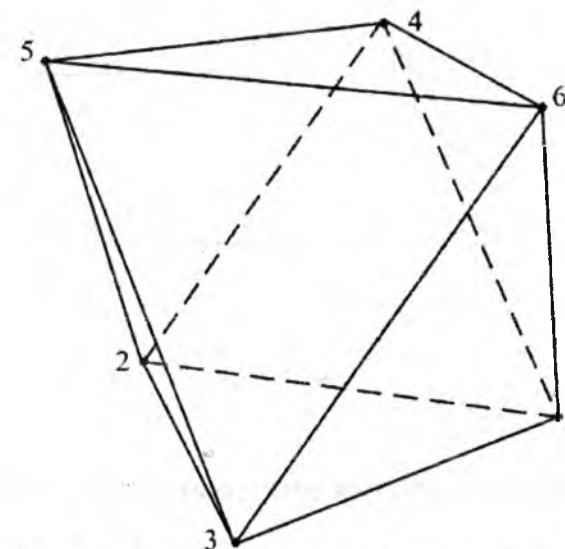


Рис. 1. Антипризма з трикутною основою

Сформулюємо завдання: побудувати температурне поле антипризми за відомими сталими значеннями температури  $T_1 - T_6$  в її вершинах (вузлах). Занесемо ці значення у таблицю 1.

Таблиця 1. Значення температури у вузлах антипризми, (°C)

Вершина	1	2	3	4	5	6
Температура	50	40	60	10	30	20

Розв'язування даної задачі за допомогою дискретних методів передбачає нанесення тривимірної сітки в області антипризми, що пов'язано з певними труднощами. Тому доцільно розглянути інше розташування даного тіла, коли воно набуває вигляду звичайного октаедра. Октаедр посідає особливе місце серед просторових фігур, оскільки зустрічається не лише в наукових дослідженнях, а й у природних процесах. Він є однією з найпростіших форм кубічної сингонії в кристалографії, оскільки за його формою кристалізуються магнетит, мідь, срібло, золото, алмаз і деякі інші мінерали. Недарма Йоганн Кеплер (1571–1630) писав: "...Серед правильних тіл найперше, начало і батько решти – куб, а його, якщо можна так сказати, дружина – октаедр..."

Введемо таку систему координат, щоб її осі проходили через усі вершини октаедра (рис. 2).

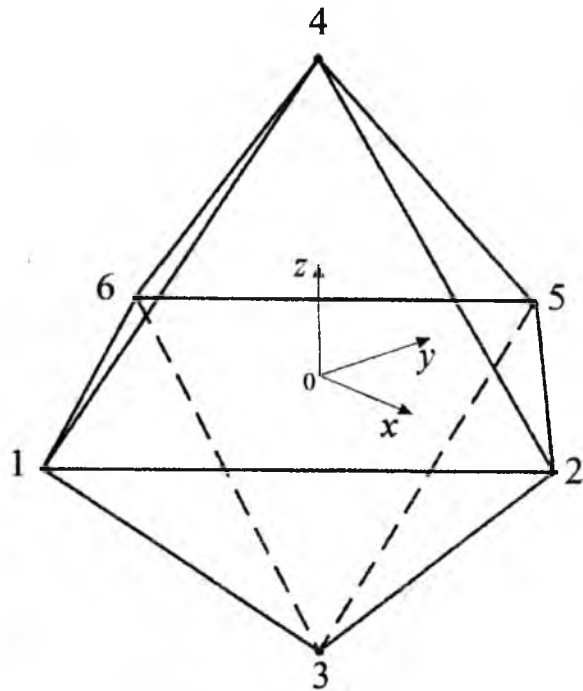


Рис. 2. Зображення антипризми у формі октаедра

Знайдемо розв'язок поставленої задачі за допомогою таких відомих методів, як метод скінченних різниць (МСР) та метод Монте-Карло.

За МСР температуру в кожному внутрішньому вузлі можна визначити як середнє арифметичне значень температури в 12 сусідніх вузлах. Такий обчислювальний шаблон зображено на рис. 3. У вузлах, що лежать на гранях та ребрах октаедра, використовується шаблон із 6 та 2 сусідніх вузлів відповідно. Тут використано гіпотезу, що поширення тепла на грані підпорядковується плоскому, а вздовж ребра – лінійному законам.

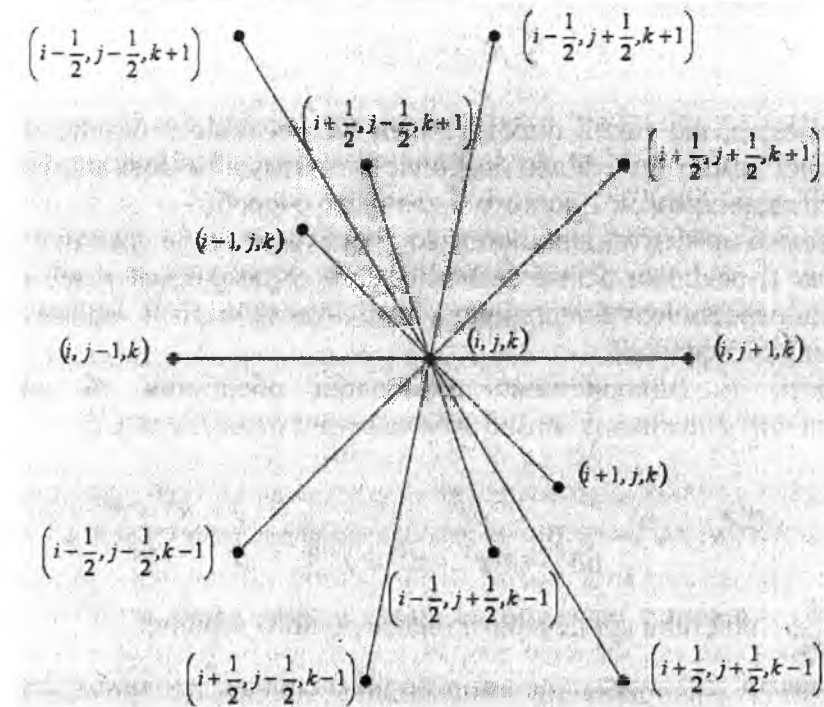


Рис. 3. Обчислювальний шаблон

В області октаедра зі стороною  $a$  було введено сітку з кроком  $\frac{a}{5}$ .

Це призвело до отримання системи із 140 лінійних рівнянь, яку було розв'язано засобами програмного середовища MathCad. Результати обчислень наведено в таблиці 2.

У випадку застосування методу Монте-Карло було проведено низку комп'ютерних експериментів засобами C/C++ зі здійснення випадкових блукань. Досліджувана область покривалася такою ж сіткою, як і в МСР. Відомо, що забезпечення прийнятної точності відбувається за рахунок великої кількості статистичних випробувань, тому в ході проведення обчислень експеримент повторювався понад 20 000 разів. Отримані результати наведено в таблиці 2.

Розглянемо можливість побудови температурного поля з використанням базису, побудованого засобами геометричного моделювання [4; 5]. Згідно з цим підходом базисна функція для кожного вузла являє собою композицію з поверхонь у рамках інтерполяційної гіпотези типу Лагранжа:

$$N_i(x_k, y_k, z_k) = \delta_{ik}, \quad (i = \overline{1,6}; k = \overline{1,6}), \quad (1)$$

де  $\delta_{ik}$  – символ Кронекера,  $N_i(x, y, z)$  – базисна функція, що відповідає вузлу  $i$ .

Система базисних функцій також має забезпечувати ваговий баланс:

$$\sum_{i=1}^6 N_i(x, y, z) = 1.$$

Зрозуміло, що такий підхід забезпечує неєдиність базису залежно від обраної композиції та дає можливість отримувати нові альтернативні базиси за допомогою простого й наочного способу.

Неважко помітити, що достатньо побудувати лише функцію форми для вузла 1, оскільки решта функцій легко отримуються з неї шляхом циклічної перестановки координат. Тому покажемо різні варіанти конструювання цієї функції.

*Модель 1.* Використаємо параболоїд обертання та дробово-раціональний множник із метою забезпечення умов (1) та (2):

$$N_1^{(1)}(x, y, z) = \frac{b^2}{6b^2 - 4(x^2 + z^2 + y^2)} \left( 1 - \frac{y}{b} - \frac{x^2 + z^2}{b^2} \right),$$

де  $b = \frac{a}{\sqrt{2}}$  – відстань від центра октаедра до його вершин.

*Модель 2.* Використаємо композицію з площин, що проходять через усі грані, несуміжні з вузлом 1, забезпечуючи при цьому умову (1):

$$N_1^{(2)}(x, y, z) = \frac{1}{16b^4} (x + y + z - b)(x + y - z - b)(-x + y + z - b)(-x + y - z - b).$$

У такому випадку існує незначне порушення вагового балансу, тому слід провести корекцію базисної функції:

$$N_1^{(2*)}(x, y, z) = \frac{N_1^{(2)}(x, y, z)}{\sum_{i=1}^6 N_i^{(2)}(x, y, z)}.$$

*Модель 3.* Використаємо попередню комбінацію поверхонь, але спробуємо зменшити осциляції на границі:

$$N_1^{(3)}(x, y, z) = \frac{(x + y + z - b)(x + y - z - b)(-x + y + z - b)(-x + y - z - b)}{(6b^4 + 10y^2b^2) \left( 1 - \frac{4}{17b^2} (x^2 + z^2) \right)}.$$

При цьому значення функції на серединах суміжних із вузлом 1 ребрах дорівнює 0.5.

З метою виконання (2) маємо:

$$N_1^{(3*)}(x, y, z) = \frac{N_1^{(3)}(x, y, z)}{\sum_{i=1}^6 N_i^{(3)}(x, y, z)}.$$

*Модель 4.* Функцію форми для першого вузла можна отримати і в такому вигляді:

$$N_1^{(4)}(x, y, z) = \frac{(x + y + z - b)(x + y - z - b)(-x + y + z - b)(-x + y - z - b)}{6b^4 + 10b^2(y^2 - x^4 - z^4)}.$$

Для виконання (2) маємо:

$$N_1^{(4*)}(x, y, z) = \frac{N_1^{(4)}(x, y, z)}{\sum_{i=1}^6 N_i^{(4)}(x, y, z)}.$$

Значимо, що за допомогою такого підходу можна отримати безліч дробово-раціональних базисів, але альтернативою для них виступають поліноміальні функції форми.

*Модель 5.* Побудуємо поліноміальну функцію для вузла 1, яка є гармонічною за диференціальним критерієм Лапласа:

$$N_1^{(5)}(x, y, z) = \frac{1}{6} - \frac{1}{2b}y + \frac{1}{3b^2}y^2 - \frac{1}{6b^2}x^2 - \frac{1}{6b^2}z^2.$$

Значимо, що при цьому зберігається ваговий баланс в антипризмі.

Введена система координат  $Oxuz$  є зручною для октаедра, але є неприродною для антипризми. Логічно розмістити вісь апікат так, щоб вона проходила через центри основ антипризми, а початок координат містився б в її центрі. При цьому напрям осей абсцис та ординат може бути довільним, проте його вибір доцільно узгодити з основами антипризми. Наприклад, в антипризмі з трикутною основою зручно ввести таку систему координат  $Ox'y'z'$ , в якій вісь  $Oz'$  проходить через баріцентри граней 1–2–3 та 4–5–6, вісь  $Ox'$  – через середини ребер 1–6 та 2–5, а вісь  $Oy'$  – через середини апофем граней 3–5–6 та 1–2–4, опущених з вершин 3 та 4 відповідно. Нехай висота антипризми  $H = 2$ , тоді сторона антипризми  $a = \sqrt{6}$  ( $b = \sqrt{3}$ ), що впливає з геометричних міркувань (рис. 4).

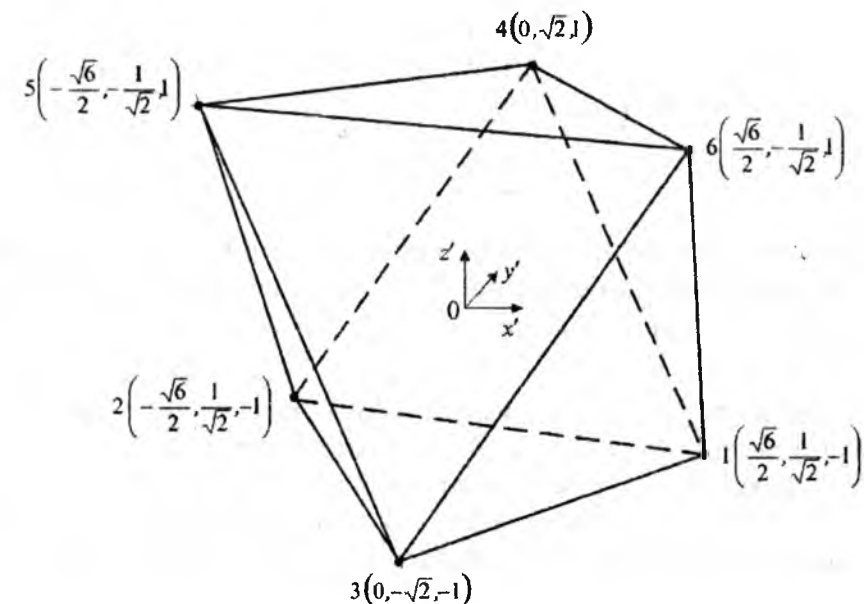


Рис. 4. Система координат  $Ox'y'z'$  в антипризмі

Побудуємо базис в антипризмі згідно з введеною системою координат.

З використанням ймовірно-геометричного підходу на двовимірних скінченних елементах трикутної форми [6] та врахуванням аплікати  $z'$ , базисна функція для вузла 1 матиме вигляд:

$$N_1^{(6)}(x', y', z') = \frac{\text{mes } D_1}{\text{mes } D} \cdot \frac{1}{2} (1 - z'),$$

$$\text{де } \text{mes } D = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x'_1 & y'_1 \\ 1 & x'_2 & y'_2 \\ 1 & x'_3 & y'_3 \end{vmatrix} \text{ – площа основи 1–2–3,}$$

$$\text{mes } D_1 = \frac{1}{2} \begin{vmatrix} 1 & x' & y' \\ 1 & x'_2 & y'_2 \\ 1 & x'_3 & y'_3 \end{vmatrix} \text{ – площа області, сприятливої для вузла 1 в}$$

основі 1–2–3.

Дана функція задовольняє інтерполяційну гіпотезу типу Лагранжа та є гармонічною за диференціальним критерієм Лапласа.

Решта функцій отримується аналогічним чином. При цьому в антипризмі зберігається ваговий баланс:

$$\sum_{i=1}^6 N_i^{(6)}(x', y', z') = 1$$

За відомих постійних значень температури у вузлах антипризми  $T_1 - T_6$  (табл. 1) значення температури в будь-якій довільно вибраній точці  $A$  в кожному з базисів знайдемо за формулою:

$$T^{(k)}(A) = \begin{cases} \sum_{i=1}^6 N_i^{(k)}(x, y, z) \cdot T_i, & (k = \overline{1,5}), \\ \sum_{i=1}^6 N_i^{(k)}(x', y', z') \cdot T_i, & (k = 6). \end{cases}$$

Результати розрахунків у вибраних контрольних точках для побудованих моделей наведено в таблиці 2. Ці точки задані в системі координат  $Oxuz$ . Зв'язок систем  $Oxuz$  та  $Ox'y'z'$  здійснювався за допомогою кутів Ейлера [7].

Оскільки результати, отримані за МСР та методом Монте-Карло, добре узгоджуються, то подальші порівняння будемо проводити тільки з МСР. Для кращого сприйняття отриманих результатів на основі таблиці 2 визначено відносні похибки температур у контрольних точках антипризми, знайдених уже описаними методами, в порівнянні із МСР (табл. 3).

Таблиця 2. Значення температури в контрольних точках, ( $^{\circ}\text{C}$ )

Контрольна точка	МСР	Метод Монте-Карло	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6
$A_1 \left( \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{-2\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	41.73 9	41.708	37.538	43.643	42.876	42.851	41.6	41.6
$A_2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	36.26 1	36.266	35.538	36.766	36.444	36.431	36.4	36.4
$A_3 \left( 0; \frac{\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	33.26 3	33.277	34.384	32.822	32.807	32.809	33.2	33.2
$A_4 \left( \frac{-3\sqrt{3}}{5}; 0; 0 \right)$	26.85 9	26.785	31.579	23.551	25.362	25.949	27.2	27.2
$A_5 \left( \frac{2\sqrt{3}}{5}; 0; \frac{\sqrt{3}}{5} \right)$	32.89 6	32.913	34.308	33.234	32.654	32.615	33.2	33.6
$A_6 \left( \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5} \right)$	30	30.02	33.188	29.048	29.048	29.048	30.0	30.0
$A_7 \left( \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{-\sqrt{3}}{5} \right)$	40	40.038	36.812	40.952	40.952	40.952	40.0	40.0
$A_8 \left( \frac{-2\sqrt{3}}{5}; 0; \frac{-\sqrt{3}}{5} \right)$	34.89 6	34.847	35.077	33.048	34.523	34.586	35.2	35.6
$A_9 \left( 0; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{-2\sqrt{3}}{5} \right)$	47.37	47.051	39.692	50.520	49.321	49.293	47.2	46.8
$A_{10} \left( 0; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{2\sqrt{3}}{5} \right)$	27.36 5	27.358	32.000	24.498	26.021	26.088	27.2	27.6

Таблиця 3. Відносні похибки обчислень у порівнянні з МСР, (%)

Контрольна точка	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6
$A_1 \left( \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{-2\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	10.06	4.56	2.72	2.66	0.33	0.33
$A_2 \left( \frac{2\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	1.99	1.39	0.50	0.47	0.38	0.38
$A_3 \left( 0; \frac{\sqrt{3}}{5}; 0 \right)$	3.37	1.33	1.37	1.36	0.19	0.19
$A_4 \left( \frac{-3\sqrt{3}}{5}; 0; 0 \right)$	17.57	12.32	5.57	3.39	1.27	1.27
$A_5 \left( \frac{2\sqrt{3}}{5}; 0; \frac{\sqrt{3}}{5} \right)$	4.29	1.03	0.74	0.85	0.92	2.14

Продовження таблиці 3.

Контрольна точка	Модель 1	Модель 2	Модель 3	Модель 4	Модель 5	Модель 6
$A_6 \left( \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5} \right)$	10.63	3.17	3.17	3.17	0.00	0.00
$A_7 \left( \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{\sqrt{3}}{5}; \frac{-\sqrt{3}}{5} \right)$	7.97	2.38	2.38	2.38	0.00	0.00
$A_8 \left( \frac{-2\sqrt{3}}{5}; 0; \frac{-\sqrt{3}}{5} \right)$	0.52	5.30	1.07	0.89	0.87	2.02
$A_9 \left( 0; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{-2\sqrt{3}}{5} \right)$	16.20	6.66	4.13	4.07	0.35	1.19
$A_{10} \left( 0; \frac{-\sqrt{3}}{5}; \frac{2\sqrt{3}}{5} \right)$	16.94	10.48	4.91	4.67	0.60	0.86

**Висновки.** У даній роботі вперше досліджується стаціонарне поле антипризми в рамках температурної задачі. Засобами геометричного моделювання авторами побудовано декілька базисів на антипризмі. У тому числі вдалось побудувати гармонічний поліноміальний базис, який добре апроксимує температурне поле антипризми. Базис 6 також забезпечує хороші результати й заслуговує на особливу увагу, оскільки процедуру його побудови можна поширити на антипризми з іншими основами.

Зазначимо, що наведенні моделі не потребують нанесення сітки в області антипризми й дають змогу знайти значення досліджуваної неперервної величини в довільно вибраній точці, чого не можна зробити в разі застосування наведених дискретних методів.

1. Андреев Н. Н. Экстремальные расположения точек на сфере / Н. Н. Андреев, В. А. Юдин // Математическое просвещение (третья серия). – 1997. – Вып. 1. – С. 115–121.
2. Андреев Н. Н. Расположение точек на сфере с минимальной энергией / Н. Н. Андреев // Труды Математического института им. В. А. Стеклова РАН. – 1997. – Т. 219. – С. 27–31.
3. Антипризма // Математическая энциклопедия. – Т. 1. – М.: Изд. “Советская энциклопедия”, 1977. – С. 297.
4. Хомченко А. Н. Геометрические аспекты сирендиповых аппроксимаций / А. Н. Хомченко, Л. И. Камаева; Ивано-Франк. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1987. – 10 с. (Деп. в УкрНИИТИ 27.03.87, № 1062).
5. Хомченко А. Н. Геометрия сирендиповых аппроксимаций / А. Н. Хомченко, Е. И. Литвиненко, П. И. Гучек // Прикладная гео-

метрия и инженерная графика – К.: Будівельник, 1996. – Вып. 59. – С. 40–42.

6. Хомченко А. Н. О вероятностном построении базисных функций МКЭ / А. Н. Хомченко; Ивано-Франк. ин-т нефти и газа. – Ивано-Франковск, 1982. – 7 с. (Деп. в ВИНТИ 21.10.82, № 5264).
7. Корн Г. Справочник по математике (для научных работников и инженеров) / Г. Корн, Т. Корн. – М.: Наука, 1974. – 832 с.

## RESEARCH OF THE STATIONARY FIELD IN THE AREA OF ANTIPRISM

**S.O. Kamaeva**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpat'ska street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine  
ph. +380 (3422) 4 21 27; e-mail: [Svitlana.Kamaeva@gmail.com](mailto:Svitlana.Kamaeva@gmail.com)*

*Work is devoted to an exploration of the stationary field in the area of antiprism. For this task several mathematical models were built and comparing of obtained results with the results, obtained by the known discrete methods, was conducted.*

*Key words: stationar field, antiprism, task of heat conductivity, method of scinchennih differences, method of Monte Carlo.*

# Фізика і хімія твердого тіла

УДК 621.472.629.78

## НАПІВПРОВІДНИКОВІ НАНОМАТЕРІАЛИ, НАНОТЕХНОЛОГІЇ ТА НАНОЕЛЕКТРОНІКА

Д.М. Фреїк

Фізико-хімічний інститут Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, Україна, 76000, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57, e-mail: [freik@pu.if.ua](mailto:freik@pu.if.ua)

Проведено огляд робіт із питань наноматеріалознавства, в якому акцентовано увагу на фізичних особливостях квантово-розмірних структур, способах їх отримання й умовах формування. Крім того, окремо розглядаються перспективи створення нових елементів наноелектроніки, наведено їх характеристики.

**Ключові слова:** наноструктури, напівпровідники, наноелектроніка.

### Зміст

#### Вступ.

1. Фізичні основи квантово-розмірних структур.
2. Методи отримання наноструктурованих матеріалів.
  - 2.1. Літографія.
  - 2.2. Молекулярно-променева епітаксія.
  - 2.3. Осадження наноструктур із металоорганічних сполук.
  - 2.4. Іонне бомбардування та імплантація.
  - 2.5. Молекулярне нашарування – метод хімічної зборки.
  - 2.6. Методи колоїдної хімії.
  - 2.7. Осадження газодинамічного потоку пари.
3. Штучні атоми і кристали.
4. Елементи наноелектроніки.
  - 4.1. Наноласери.
  - 4.2. Одноелектронні транзистори.
  - 4.3. Одноелектронне тунелювання.

#### Висновки.

#### Вступ

Розробка й використання міліметрової технології почалися в середині ХХ ст. і надалі розвивались у зв'язку з виникненням промислової електроніки. Послідовне зменшення розмірів елементів більш ніж у  $10^3$  разів привело людство у світ твердотільної мікротехнології. Її виник-

нення й розвиток пройшли червоною ниткою через другу половину ХХ ст., що дало змогу отримати величезну кількість різноманітних елементів обчислювальної техніки. Кристали кремнію є основою інтегральних мікросхем; їх мініатюризація й зумовлює швидке зростання ефективності й швидкодії на одиницю вартості обчислювальних машин із періодом подвоєння у два роки. Рекордний результат із мініатюризації мікросхем на кремнії було досягнуто в 90-х роках ХХ ст. за допомогою електронної літографії, що дало змогу отримати будь-яку структуру на мікронному і субмікронному рівнях. Але навіть за таких розмірів їх робота описується класичними законами, наприклад, законом Ома, який однаково правильний як для побутового електронагрівача, так і для інтегральної мікросхеми.

Це правило починає порушуватися при розмірах структур, що складають нанометри ( $1 \text{ нм} = 10^{-9} \text{ м}$ ) (табл. 1).

Таблиця 1. Область функціонування наноматеріалів

Розміри	Назва
0,1 нм – 0,5 нм	атоми
0,5 нм – 10 нм	молекули
10 нм – 100 нм	кластери металів, напівпровідників

Уперше виразно концепція наноматеріалів була сформульована Р. Глейтером [1], який увів у науковий обіг і сам термін (спочатку як “нанокристалічні матеріали” [2], потім “наноструктурні”, а також “нанофазні”, “нанокомпозитні” і т. д.). З 1992 року регулярно, кожні два роки, проводяться міжнародні конференції (NANO), а щорічна кількість симпозіумів, семінарів і т. д. за даною тематикою вже налічує декілька десятків. Слід зауважити, що до цього напрямку долучилися й наші вчені: на міжнародних конференціях із фізики і технології тонких плівок, які вже з ХІ ст. (2007 р.) почали включати доповіді з наноструктур – МКФТТПН [3].

Таким чином, із середини 80-х років ідеї наноматеріалів практично витали в атмосфері багатьох наукових колективів, але доля розпорядилася на користь сформульованої в роботах [1; 2] концепції, яка була велими переконливо висловлена й дістала великий резонанс [4].

### 1. Фізичні основи квантово-розмірних структур

Наноструктуровані матеріали можна поділити на три основні класи [5]:

- квантові точки (КТ) (quantum dots (QD)) – структури, розміри яких у всіх трьох напрямках складають декілька міжатомних відстаней (залежно від масштабу розгляду структура вважається нульмірною або тримірною);
- квантові дроти (КД) (quantum wires (QWr)) — структури, розміри яких у двох напрямках складають декілька міжатомних відстаней, а

розмір у третьому напрямі є макроскопічною величиною;

- квантові стінки (КС), інакше квантові ями (quantum wells (QW)) – структури, розмір яких в одному напрямі складає декілька міжатомних відстаней, а розміри у двох інших напрямках є макроскопічною величиною.

У чому особливість таких нанооб'єктів? По-перше, унаслідок таких малих розмірів вони мають дуже малу площу поверхні (наприклад, частинки діоксиду кремнію – аеросилу – практично непористі, розміром у декілька десятків нанометрів можуть мати питому поверхню до 400 м<sup>2</sup>/г). Як наслідок, такі структури проявляють високу фізико-хімічну активність. По-друге, розміри наночасток співмірні з довжиною вільного пробігу електрона, що впливає не лише на зміну властивостей нанооб'єктів, але на їх стрибкоподібну зміну (ефект розмірного квантування).

Деталізуємо деякі з цих особливостей. Відомо, що енергія  $E$  вільного електрона визначається співвідношеннями

$$E = \frac{m_0 v^2}{2} = \frac{p^2}{2m_0}, \quad (1)$$

де  $m_0$ ,  $v$ ,  $p$  – відповідно, ефективна маса електрона, швидкість та квазіімпульс електрона. Тобто він може мати будь-яке значення енергії. У кристалі реалізується енергетична структура з дозволеними і забороненими зонами. Якщо в одному з напрямків рух електрона обмежений (наприклад, тонка фольга товщиною  $d$  і  $d < \lambda$ , де  $\lambda$  – довжина хвилі де-Бройля електрона), то енергія електрона  $E_n$ , як і імпульс  $p_n$ , прийме тільки визначені значення:

$$E_n = \frac{p_n^2}{2m} = \frac{\pi^2 \hbar^2 n^2}{2md^2}, \quad p_n = \frac{\pi \hbar n}{d}, \quad n = 1, 2, 3. \quad (2)$$

Таким чином, мінімальна енергія  $E_{\min}$  ( $n=1$ ) обернено пропорційна до квадрата лінійних розмірів  $d$  ( $E_{\min} \sim \frac{1}{d^2}$ ) і зростає зі зменшенням цього характерного розміру.

У випадку, коли відстань між рівнями помітно більша від тієї, що відповідає мінімуму теплової енергії, такий електронний спектр носіїв у квантових об'єктах дає можливість усунути основну проблему, що виникає в процесі виробництва приладів сучасної мікро- і оптоелектроніки, “розмивання” носіїв заряду в енергетичному вікні порядку  $k_B T$  (де  $k_B$  – стала Больцмана;  $T$  – абсолютна температура), оскільки підвищення робочої температури призводить до деградації основних властивостей приладів.

Для характеристики електронів у кристалах вводиться поняття “густини станів”  $g(E)$ , що визначається як число станів, що припадає на одиничний інтервал енергії  $E$ . У двовимірному випадку для кожного з квантово-розмірних рівнів з енергією  $E_N$  повне число станів дорівнює  $G_N(E) = m(E - E_N)S / (2\pi \hbar^2)$ , де  $S$  – площа зразка. Густина станів, яка в цьому випадку обчислюється на одиницю площі, визначається сумою за всіма рівнями, енергії яких  $E_N$  лежать нижче  $E$ :

$$g_2(E) = \frac{2}{S} \sum_N \frac{dG_N}{dE} = \sum_N \frac{m}{\pi \hbar}. \quad (3)$$

Зрештою, для кожного рівня  $E_i$  квантової нитки довжиною  $L$ ,  $G_i = \sqrt{2m(E - E_i)}L / (\pi \hbar)$  густина станів на одиницю довжини складає

$$g_1 G = \frac{2}{L} \sum_i \frac{dG_i}{dE} = \frac{\sqrt{2m}}{\hbar} \sum_i \frac{1}{\sqrt{E - E_i}}. \quad (4)$$

На рис. 2 схематично зображено функції густини станів для всіх випадків, що обговорювалися. Видно, що вони мають якісно різний характер. У тривимірному випадку густина станів монотонно зростає зі зростанням енергії (рис. 1, а), у двовимірному випадку має вигляд горизонтальних сходинок (рис. 1, б), а в квантових нитках необмежено зростає щоразу, як ми наближаємося зверху до енергії чергового квантового рівня (рис. 1, в).

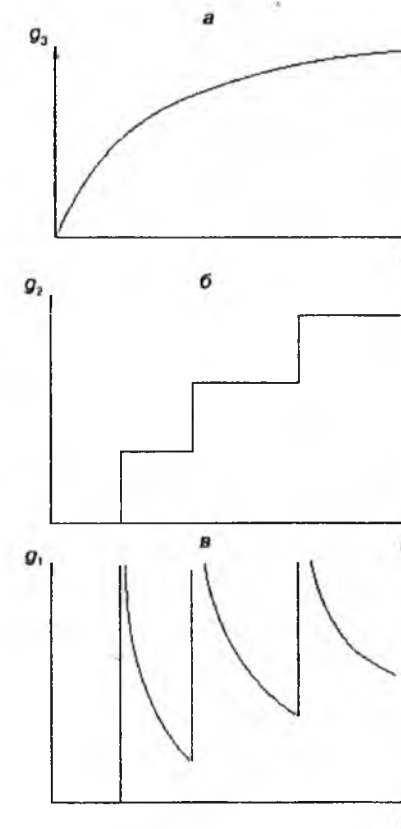


Рис. 1. Густина станів у масивному тривимірному напівпровіднику (а), двовимірних електронних структурах – квантових ямах (б) та одновимірних структурах – квантових нитках (в)

Якщо температура достатньо низька, то електрони заповнюють стани з найменшими енергіями. У кожному стані, згідно з принципом Паулі, може розташовуватися по два електрони з протилежними спінами. Легко помітити, що поки число електронів на одиницю довжини нитки



$n$  менше, ніж  $2\sqrt{2m(E_2 - E_1)}/\pi\hbar$ , усі вони розташовуються на першому квантовому рівні, і провідність нитки складає  $\sigma = e^2/\pi\hbar$ . Як тільки концентрація перевищить указане значення, частина електронів буде вимушена розміститися на другому рівні, а в рівнянні провідності з'явиться додатковий член  $e^2/\pi\hbar$ , що описує внесок цього рівня. Іншими словами, провідність стрибком зростає. Такі стрибки відбуватимуться щоразу, як електрони починатимуть заповнювати черговий рівень. Загалом залежність  $\sigma(n)$  повинна мати східчастий вигляд, причому висота цих сходинок дорівнюватиме універсальній величині  $e^2/\pi\hbar$  (рис. 2).

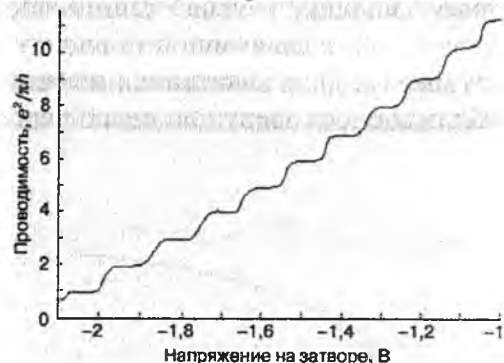


Рис. 2. Експериментальна залежність провідності квантової нитки (точкового контакту) від напруги на затворі, що визначає концентрацію носіїв.

Практично всі типи наноматеріалів (за винятком супрамолекулярних [6–8]) через умови отримання й особливості структури є нерівноважними. У найзагальнішому вигляді відхилення від рівноваги і, відповідно, надмірна вільна енергія Гіббса можуть бути пов'язані з характерною для наноматеріалів великою кількістю поверхонь розділу (міжзеренні і міжфазні межі, потрійні стики), наявністю нерівноважних фаз міжфазних сегрегацій, залишкових напруг і підвищеного вмісту дефектів кристалічної будови. На рис. 3 показано зміну загальної частки (поверхонь розділу, а також, власне, міжзеренних меж і потрійних стиків) залежно від розміру зерен.

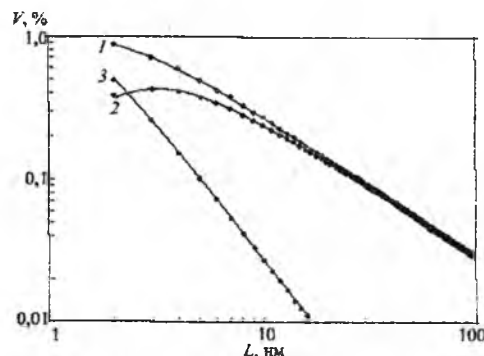


Рис. 3. Залежність загальної частки поверхонь розділу (1), частки міжзеренних меж (2) і потрійних стиків (3) у структурі наноматеріалів від розміру зерен (товщина меж зерен дорівнює 1 нм)

Цілком очевидно, що після термічного впливу, а також у силових (радіаційних, деформаційних та ін.) полях неминучі релаксаційні, сегрегаційні й гомогенізаційні процеси рекристалізації, а також явища розпаду, фазових перетворень, спікання і запливання нанопор (нанокاپілярів), аморфізації і кристалізації. Усе це неодмінно позначиться на фізико-хімічних, фізико-механічних та інших властивостях і впливатиме на експлуатаційні ресурси наноматеріалів, що визначатиме важливість вивчення їх стабільності. Це, як і дослідження природи розмірних ефектів, є однією з найважливіших і недостатньо вивчених проблем наноструктурного матеріалознавства.

Необхідно також мати на увазі, що в легованих наноструктурах вплив розміру кристалітів на інтегральну вільну енергію може бути немонотонним (рис. 4). Така поведінка залежності  $G = f(L)$  (рис. 4) означає, що через існування мінімуму при  $L_{\text{крит}}$  ріст зерен у інтервалі  $L < L_{\text{крит}}$  стає термодинамічно не вигідним.

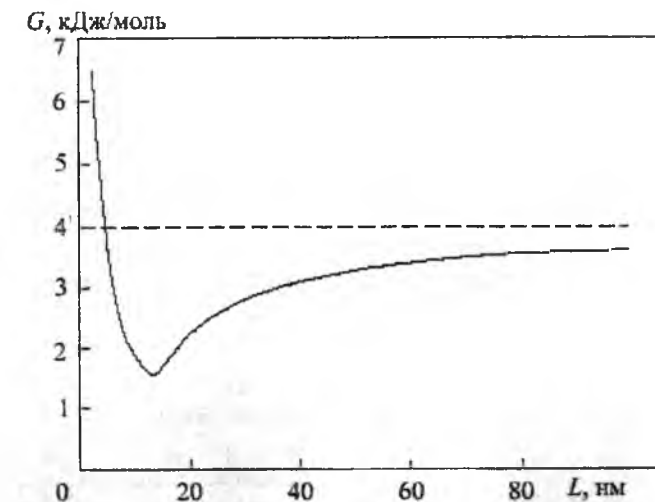


Рис. 4. Залежність молярної вільної енергії Гіббса для бінарного нанокристалічного сплаву із середньою концентрацією 5% (ат.) від розміру кристалітів (для звичайного полікристала ( $G = 4$  кДж/моль,  $T = 600$  К).

Слід також звернути увагу на те, що, змінюючи зарядність численних міжзеренних областей, можна впливати на електронну структуру наноматеріалів загалом, тобто на магнітні, оптичні, електричні та інші властивості, а також на взаємну розчинність й утворення нових фаз.

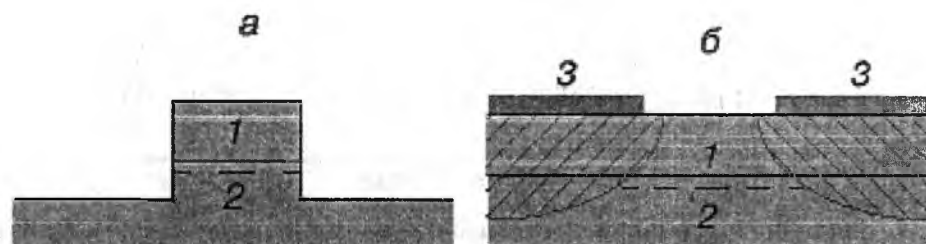
Таким чином, розмірні ефекти в наноструктурах супроводжуються квантовими ефектами, оскільки розмір кристалітів стає співмірним із довжиною де-бройлівської хвилі  $\lambda_B$ . Для металів  $\lambda_B \approx 0,1 - 1$  нм, а для напівметалів і вузькощілинних напівпровідників  $\lambda_B \sim 100$  нм [4]. Отже, первинні концепції [1; 2] одержують нові цікаві імпульси для розвитку: виявлення ролі розмірних і квантових ефектів у модифікації властивостей наноматеріалів.

## 2. Методи отримання наноструктурованих матеріалів

На даний час уже розроблено й ефективно функціонує цілий ряд технологій і методик, що забезпечують отримання наноструктурованих матеріалів, які використовуються як у суто академічному плані, так і на практиці [4]. Зупинимося лише на окремих аспектах формування напівпровідникових квантово-розмірних структур [9–12].

**2.1. Методи літографії.** Найочевидніше, що отримати наноструктуру можна шляхом безпосереднього “вирізування” вузької смужки за допомогою літографічної техніки (рис. 5, а). При цьому для отримання електронних ниток шириною в сотні ангстрем, де квантування енергій електронів буде помітним, не обов’язково створювати смужки саме такої ширини, що вимагає надвисокої роздільної здатності літографічної техніки. Справа в тому, що на бічних гранях витравленої смужки (як і на вільній поверхні напівпровідника) утворюються поверхневі стани, що, як правило, створюють шар збіднення. Цей шар викликає додаткове звуження провідного каналу, внаслідок чого квантові ефекти можна спостерігати і в смужках більшої ширини – порядку десятої частки мікрона.

Можна поступити й по-іншому. Поверхню напівпровідникової структури покривають металевим електродом, що створює з напівпровідником контакт Шотткі, який має вузьку щілину (рис. 5, б). Якщо гетерограниця знаходиться достатньо близько від поверхні (в шарі збіднення), то двовимірні електрони на межі відсутні всюди, окрім вузької області під щілиною. Такий тип одновимірної структури володіє додатковою перевагою: змінюючи напругу на затворі, ми можемо управляти ефективною шириною квантової нитки й концентрацією носіїв у ній.



**Рис. 5.** Напівпровідникові гетероструктури з квантовими нитками, одержані за допомогою субмікронної літографії за рахунок витравлювання вузької смужки із самої структури (а) або щілини в затворі Шотткі (б): 1 – напівпровідник зі широкою забороненою зоною (наприклад, AlGaAs); 2 – напівпровідник із вузькою забороненою зоною (наприклад, GaAs); 3 – металевий затвор. Вузький електронний канал, що утворюється поблизу гетерограниці, виділений штриховою лінією. Области збіднення електронами заштриховані.

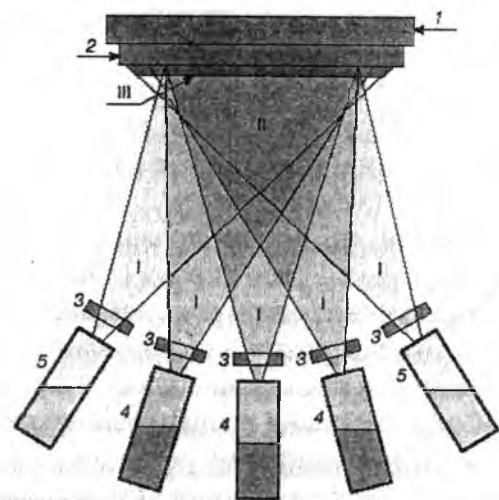
**2.2. Молекулярно-променева епітаксія.** Метод молекулярно-променевої епітаксії (molecular-beam epitaxy, MBE) призначений для вирощування кристалічних структур у надвисокому вакуумі за допомогою пучків атомів або молекул, що є компонентами зростаючої сполуки.

Таким чином, MBE є удосконаленням звичного способу напилення плівок шляхом випаровування у вакуумі [13].

Принципи технології MBE формувалися поступово. 1964 року (R. В. Schoolar, J. N. Zemel) за допомогою молекулярних пучків було одержано досконалі епітаксійні плівки PbS на монокристалічній підкладці NaCl. 1968 року (J. E. Davey, T. Pankey, J. R. Arthur) в умовах високого вакууму були вирощені епітаксійні плівки GaAs на монокристалічних підкладках арсеніду галію. Цього ж року (1968) автором огляду успішно проведено технологічні роботи з отримання монокристалічних плівок халькогенідів олова відкритим випаровуванням у вакуумі. Ці дослідження стали основою для подальшого росту в питанні вирощування досконалих плівок GaAs та інших напівпровідникових сполук  $A_3B_5$ ,  $A_4B_6$  і  $A_2B_6$  методом MBE. Новий етап у розвитку і вдосконаленні MBE почався в 70-ті роки ХХ ст. і пов’язаний зі створенням і промисловим виробництвом відповідного вакуумного устаткування.

Атомні або молекулярні пучки створюються в ефузійних комірках (ефузія – повільне витікання газів через малі отвори, досліджене 1911 року датським фізиком М. Кнудсенем) за достатньо високої температури й спрямовуються в бік нагрітої до необхідної температури монокристалічної підкладки (рис. 6). Атоми в пучках рухаються за інерцією в надвисокому вакуумі, не стикаючись один з одним або будь-якими іншими атомами. Такий балістичний характер транспортування компонентів напівпровідникової сполуки забезпечує створення однорідних метастабільних твердих розчинів, навіть у таких системах, де в умовах, близьких до термодинамічної рівноваги (сама така ситуація має місце при традиційних способах вирощування кристалів), існує область незмішуваності. MBE забезпечує епітаксійний ріст тонких плівок напівпровідникових сполук за рахунок реакцій між компонентами атомних або молекулярних пучків із поверхнею підкладки. Швидкість осадження речовини на підкладку за порядком величини зазвичай складає один моноатомний шар за секунду. Отримання якісних структур можливе в разі використання високочистих джерел компонентів і за умови точного контролю температур підкладки і джерел, що може бути реалізоване лише при комп’ютерному управлінні параметрами процесу росту.

Римськими цифрами на рис. 6 позначені області (зони), що визначають основні особливості MBE: I – зона генерації молекулярних пучків ефузійними комірками Кнудсена з механічними заслінками; II – зона змішування (перетину) пучків елементів, випаровуваних із різних ефузійних комірок; III – зона кристалізації на підкладці (зона росту).

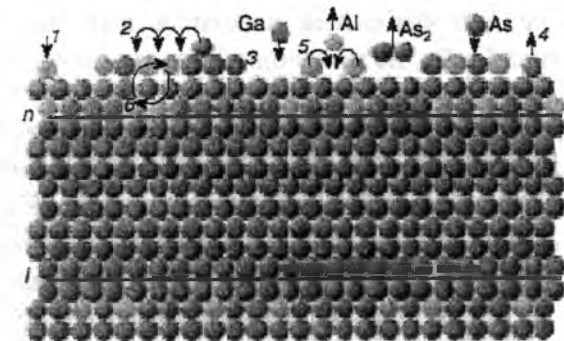


**Рис. 6.** Схема методу МВЕ для отримання плівок легованих потрійних сполук. Уся установка розміщена в камері надвисокого вакууму. 1 – блок нагрівання; 2 – підкладка; 3 – заслінка окремої комірки; 4 – ефузійні комірки основних компонентів; 5 – ефузійні комірки легуючих домішок.

Зону росту можна умовно розділити на три частини: перша – це кристалічна підкладка або черговий моноатомний шар, що виріс; друга – газова суміш компонентів у приповерхневій області; третя – перехідний шар, геометрія і процеси в якому сильно залежать від вибору умов росту. Отже, якщо необхідно виростити конденсат методом МВЕ, потрібно мати можливість належним чином регулювати структуру і склад перехідного шару. Для вирощування кристалографічно досконалих структур слід так підбирати режим росту, щоб перехідний шар був максимально тонким, тобто моноатомним. Ця вимога може бути виконана за умови, коли потік падаючих на підкладку атомів близький за об'ємом до потоку атомів, що випаровуються з підкладки. У цьому режимі ріст структури здійснюється шляхом утворення й подальшого росту двовимірних зародків на атомарно-плоскій поверхні.

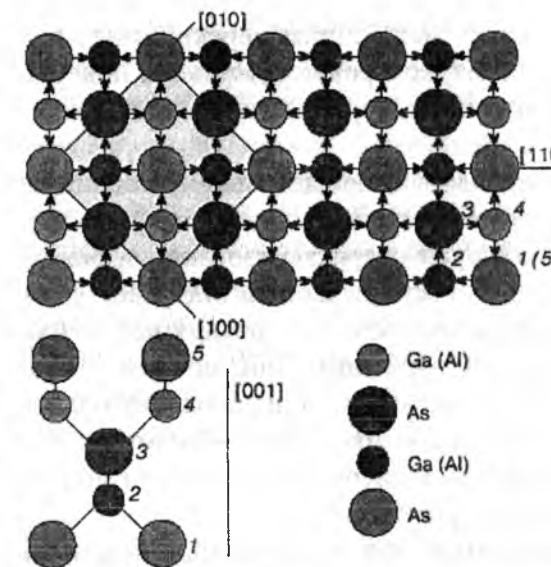
Епітаксійний ріст у методі МВЕ включає такі елементарні процеси (рис. 7) [11]:

- 1) адсорбція (прилипання) падаючих на підкладку атомів або молекул, що становлять вирощувану сполуку;
- 2) міграція (поверхнева дифузія) адсорбованих атомів поверхнею підкладки (їй може передувати дисоціація молекул вирощуваної сполуки);
- 3) вбудовування атомів у кристалічні ґратки підкладки або моноатомний шар гетероструктури, що росте;
- 4) термічна десорбція атомів, що не вбудувалися в кристалічні ґратки;
- 5) утворення й подальший ріст двовимірних зародків кристала на підкладці або на поверхні зростаючого шару;
- 6) взаємна дифузія атомів, що вбудувалися в кристалічні ґратки.



**Рис. 7.** Елементарні процеси в зоні росту за методом МВЕ:

1 – адсорбція атомів із зони змішування на поверхні; 2 – міграція адсорбованих атомів поверхнею підкладки; 3 – входження адсорбованих атомів у кристалічну ґратку; 4 – термічна десорбція; 5 – утворення поверхневих зародків; 6 – взаємна дифузія; n-n та i-i – нормальна та інвертована області гетероструктури



**Рис. 8.** Кристалічна структура цинкової обманки. Угорі – проєкція на площину (001), перпендикулярну осі росту. Виділена грань елементарного куба в площині (001). Цифрами вказано атоми, що заповнюють шар у площині (001), стрілки вказують на послідовність шарів

Найпоширенішими кристалічними ґратками для сполук  $A_3B_5$  і  $A_2B_6$  є так звана структура цинкової обманки  $ZnS$ , зображена на рис. 8. Якщо поверхня підкладки паралельна одній із граней елементарного куба з індексами Міллера (001), то епітаксійний ріст здійснюється послідовним нарощуванням аніонних і катіонних шарів, як це показано на рис. 7, де схематично представлена гетероструктура (ГС)  $Al_xGa_{1-x}As-GaAs$ , в якій шар арсеніду галію зосереджений між двома шарами твердого розчину алюмінію (з атомною концентрацією  $x$ ) в арсеніді галію. Алюміні-

ній, близький за своїми хімічними властивостями до галію, заміщає атоми галію в ґратках GaAs, не призводячи при цьому до будь-якої істотної зміни міжатомних відстаней.

Кожен напівпровідник (наприклад, GaAs або  $Al_xGa_{1-x}As$ ) може бути вирощений пошарово за фіксованої швидкості росту, коли температура підкладки забезпечує оптимальну для даної сполуки швидкість поверхневої дифузії. Оскільки хімічні зв'язки у напівпровідникових сполуках різняться між собою, то різними будуть й енергії активації поверхневої дифузії катіонів, що входять до складу цих сполук. Тому якість гетеро-меж може бути істотно різною, залежно від того, яка зі сполук у вибраному температурному режимі росте першою. Межі прийнято називати нормальними, якщо компонент із нижчою температурою плавлення росте першим (наприклад,  $Al_xGa_{1-x}As$  на GaAs); для зворотної послідовності використовується термін “інвертована межа”. На рис. 7 проєкції цих двох меж зображені лініями з буквеними індексами  $n$  та  $i$  відповідно. Щоб одержати гладші й досконаліші гетеро-межі, використовується методика переривання росту або методика осадження пульсуючим пучком. Згладжування поверхні протягом часу переривання росту (саме переривання здійснюється механічним перекриттям на деякий проміжок часу заслінок ефузійних комірок) обумовлене поверхневою міграцією і/або сублимацією атомів, адсорбованих на поверхню вирощеного моношару.

Температура підкладки визначає співвідношення між потоками адсорбції і десорбції атомів, що входять до складу структури, що росте. Це співвідношення може бути охарактеризоване коефіцієнтом прилипання атома даного сорту до поверхні, на якій відбувається епітаксійний ріст. Коефіцієнт прилипання вказує на ту частину падаючого потоку, що адсорбується на поверхні. При адсорбції аніонного компонента, наприклад, миш'яку при рості арсеніду галію, важливу роль відіграє те, в якій молекулярній формі ( $As_2$  або  $As_4$ ) аніонний компонент доставляється на поверхню, де відбуваються дисоціація молекул і подальше вбудовування атомів у кристалічні ґратки.

Крім того, температура підкладки визначає швидкість поверхневої дифузії, що передує вбудовуванню атомів у кристалічні ґратки. Ця температура повинна бути достатньо високою, щоб забезпечити необхідне число ( $\sim 10^4$ ) дифузійних стрибків атома на поверхні, перш ніж він займе своє положення в ґратці. При цьому середнє переміщення атома по поверхні за час  $t$  визначається як  $x = \sqrt{D_s t}$ , де  $D_s = D_{s0} \exp\left\{-\frac{E_{sd}}{kT}\right\}$  – коефіцієнт поверхневої дифузії. Передекспоненціальний фактор  $D_{s0} = a^2 \nu$ , де  $a$  – довжина дифузійного стрибка (відстань між сусідніми еквівалентними положеннями атома на поверхні росту),  $T$  – температура в енергетичних одиницях,  $\nu = 10^{12} \text{ c}^{-1}$  – частота коливань атома на поверхні. Енергія активації поверхневої дифузії  $E_{sd}$  в напівпровідниках зазвичай складає 1 – 1,5 еВ, тому за одну секунду атом у середньому зміщується на декілька десятків або сотень міжатомних відстаней за температури

підкладки 600–800°C. Такий зсув якраз і відповідає приблизно  $10^4$  дифузійним стрибкам.

Істотне збільшення температури підкладки небажане з двох причин: по-перше, воно може призвести до зменшення коефіцієнтів прилипання; по-друге, до активзації взаємної дифузії, тобто дифузії атомів між шарами. Оскільки ґС є різко неоднорідним (в атомному масштабі) за хімічним складом структури, то з часом за рахунок процесів взаємної дифузії ці структури повинні або переходити в термодинамічно рівноважний стан з однорідним розподілом концентрацій усіх компонентів, або розшаровуватися на фази цілком певного складу. Проте, оскільки енергія активації взаємної дифузії атомів у напівпровідниках зазвичай складає 4–5 еВ, а передекспоненціальний фактор має той самий порядок величини, що і в разі поверхневої дифузії, то очевидно, що в інтервалі температур 600–800°C цей ефект неймовірно малий, оскільки середній зсув атома в результаті взаємної дифузії навіть за декілька десятків годин виявляється істотно меншим за міжатомну відстань. Це твердження тим більше справедливе для кімнатної температури, за якої зазвичай працюють прилади, елементами яких є ґС. Вибір і підтримка оптимальної температури росту є однією з найважливіших умов здійснення MBE.

У випадках послідовного вирощування шарів GaAs і  $Ga_{1-x}Al_xAs$ , що мають практично однакові параметри кристалічних ґраток, можна виростити досконалі структури, що містять двовимірні електрони. Останніми роками було виявлено, що за понижених температур росту при моношаровому рості напівпровідника з параметрами кристалічних ґраток, відмінними від параметрів ґраток підкладки, можна одержати на поверхні росту майже однакові за розміром острівці. Острівці осадженого напівпровідника пірамідальної форми, що практично не містять дефектів, є квантовими точками. Як приклад, можна навести осадження InAs (параметр ґратки  $a_0 = 0,60584$  нм) на підкладці GaAs ( $a_0 = 0,56533$  нм). Такий процес одержав назву самоорганізації квантових точок у процесі росту (рис. 9, а).

Рушійною силою утворення острівців, а не плоского шару, є прагнення системи до стану з мінімумом енергії. У разі незбігу параметрів ґраток виникають пружні деформації як острівця, що утворився, так і підкладки. Якщо в процесі росту поверхня залишається плоскою (пунктир на рис. 9, а), то енергія пружної деформації зростає, а енергія поверхні не змінюється. За певної товщини (зазвичай декілька моношарів) така ситуація стає енергетично не вигідною. Мінімуму енергії системи відповідатиме утворення тривимірних острівців-пірамід (стрілки на рис. 9, а), основа яких буде сильно деформована (для InAs на поверхні GaAs – стиснута), але деформація зменшуватиметься в міру віддалення від підкладки до вершини піраміди. Один шар InAs, званий змочуючим шаром, відділяє піраміди від підкладки GaAs.

Таким чином, рушійною силою утворення квантових точок у процесі самоорганізації є зменшення енергії деформації. Так, якщо на підкладці з арсеніду галію вирощувати шар арсеніду індію, параметр ґратки якого

більший, то виникнуть пружні напруги, що призведуть до росту острівців (квантових точок) InAs на поверхні GaAs. Поверхня покривається пірамідами InAs із розмірами в декілька десятків ангстрем. Виявляється вигіднішим формування острівців, аніж однорідно-напруженої поверхні. Зростання пірамід відбувається до повного зняття пружної напруги на вершині піраміди.

Утворення погоджено-напружених острівців на поверхні залежить від двох параметрів: розузгодження ґратки і кількості осадженого на поверхню матеріалу. Мінімум енергії відповідає утворенню однакових за розміром і формою острівців. У такий спосіб вдається виростити не тільки моношар пірамід на поверхні арсеніду галію, але й послідовні шари, як це зображено на рис. 9, б. При цьому вершини пірамід є зародками утворення пірамід у новому шарі: має місце утворення штучних кристалів (див. розділ III цього огляду).

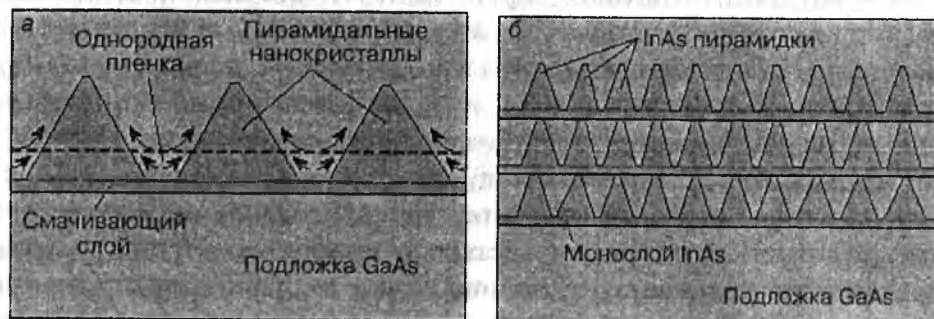


Рис. 9. Утворення пірамідальних острівців InAs у результаті трансформації плоских шарів цього напівпровідника (пунктир), вирощуваних на підкладці GaAs з відмінними параметрами ґраток (а); система зв'язаних вертикально квантових точок InAs на підкладці GaAs (б)

**2.3. Осадження плівок із металоорганічних сполук.** Методика осадження плівок із металоорганічних (МОС) сполук (metalorganic vapor phase epitaxy, MOVPE), відома також як МОС-гідридна технологія, найістотніше відрізняється від методики МВЕ характером масопереносу: атомні або молекулярні пучки без об'ємної дифузії в МВЕ і газовий потік суміші компонентів реакції з дифузійною в напрямі фронту зростання ГС в MOVPE (рис. 10) [11].

Ще 1968 року було показано (Н. М. Manasevit), що газозфазні суміші металоорганічної сполуки триметилгалію  $(\text{CH}_3)_3\text{Ga}$  і гідриду миш'яку  $\text{AsH}_3$  у випадках здійснення реакції піролізу (розкладання за підвищеної температури) в атмосфері молекулярного водню  $\text{H}_2$  за температур 600 – 700°C у реакторі відкритого типу можуть бути використані для вирощування епітаксійних плівок GaAs. Надалі були виконані дослідження, що засвідчують ефективність методики MOVPE для вирощування різних напівпровідникових сполук у вигляді тонких плівок субмікронних розмірів. У даний час більшість сполук  $\text{A}_3\text{B}_5$ ,  $\text{A}_2\text{B}_6$  і  $\text{A}_4\text{B}_6$  можуть бути одержані в методиці MOVPE. Загальна проблема, що виникає в разі вирощування

різних напівпровідникових структур, полягає в оптимальному виборі металоорганічних сполук для реакцій піролізу в процесі росту.

Металоорганічні сполуки утворюють широкий клас речовин, що мають хімічні зв'язки “метал – вуглець” або “метал – кисень – вуглець”, а також координаційні сполуки металів і органічних молекул. Сполуки, що представляють інтерес для вирощування напівпровідникових структур, за кімнатної температури, як правило, є рідинами, хоча деякі зі сполук, використовуваних у техніці MOVPE, перебувають у твердому стані. Ці сполуки можуть бути легко перенесені в зону реакції в потоці газу-носія, наприклад, молекулярного водню, що проходить через рідке джерело або над поверхнею твердого джерела. Гідриди, вживані в напівпровідниковій технології, за кімнатної температури є газами і зазвичай використовуються у вигляді розбавленої суміші з  $\text{H}_2$ . Металоорганічні й гідридні компоненти змішуються в газовій фазі і піддаються піролізу в потоці атмосфери  $\text{H}_2$  через реактор відкритого типу (рис. 10), який функціонує за атмосферного або зниженого тиску. Температура піролізу звичайно складає від 600°C до 800°C. Енергія для розігрівання газової суміші підводиться від радіочастотного генератора або потужної лампи. Відбувається розігрівання графітного столика, на якому розміщуються монокристалічні підкладки. Газова суміш поблизу підкладок також нагрівається до високої температури, тоді як стінки камери реактора залишаються холодними, наприклад за рахунок водяного охолодження. Такий режим забезпечує осадження продуктів реакції на підкладках і призводить до відносно малих утрат компонентів реакції на стінках камери. Кристалізація в процесі MOVPE виникає в момент проходження газової суміші компонентів реакції в потоці газу-носія поблизу нагрітої підкладки й проходить в умовах, істотно ближчих до термодинамічної рівноваги, ніж при МВЕ.

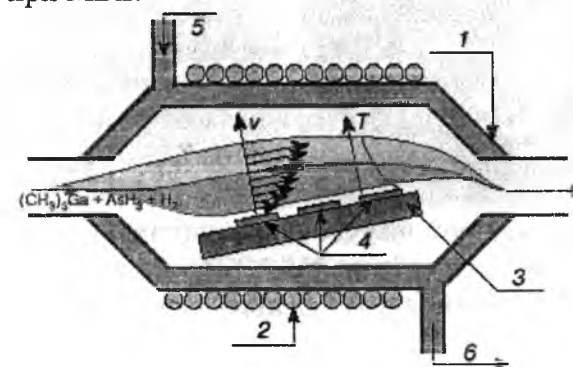
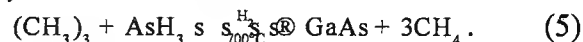
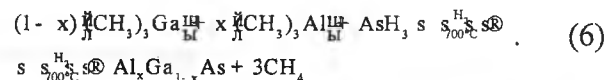


Рис. 10. Схема горизонтального реактора відкритого типу з охолоджуваними стінками для МОС-гідридної технології наноструктур: 1 – кварцовий корпус; 2 – котушка ВЧ-генератора для нагрівання підкладки; 3 – блок нагрівання; 4 – підкладки; 5 – водяне охолодження (впускання); 6 – водяне охолодження (випускання). Схематично зображено розподіл швидкостей  $v$  і температури  $T$  у газовому потоці в дифузійному шарі поблизу підкладки (масштаб не витриманий).

Найчастіше використовуються метилові або етилові металоорганіки через відносну простоту приготування й легкість піролізу в атмосфері молекулярного водню. Ці сполуки постачають атоми металів із побічними продуктами у вигляді метану або етану. Хімічна реакція в окремому випадку MOVPE росту арсеніду галію з триметилгалієм і гідриду миш'яку може бути записана як

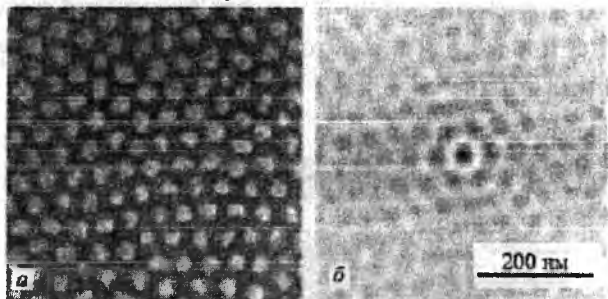


Подібні реакції застосовуються для вирощування інших подвійних, а також потрійних і четвертних сполук. Наприклад, ріст  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  описується рівнянням



У цьому випадку атомна концентрація  $x$  алюмінію в твердому розчині  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  безпосередньо пов'язана з відносним початковим парціальним тиском триметилгалію і триметилалюмінію в газовій фазі.

**2.4. Методи іонного бомбардування та імплантації.** Особливо цікавими в плані отримання квантових точок за допомогою іонного розпилювання є результати, одержані співробітниками Institute of Semiconductor Electronics (Німеччина) [14]. При вертикальному падінні пучка іонів  $\text{Ar}^+$  з енергією 420 еВ ними було одержано на поверхні (100) GaSb гексагональну кристалічну структуру з квантових точок діаметром 35 нм (рис. 11). Слід зауважити, що описані вище експерименти об'єднуються загальним механізмом, пов'язаним здебільшого з іонним розпилюванням поверхні мішені, а також з утворенням на поверхні нових багатокомпонентних сполук.



**Рис. 11.** СЕМ-зображення поверхні монокристалічного GaSb при опроміненні іонами  $\text{Ar}^+$  з енергією 420 еВ (а) і відповідне двовимірне автокореляційне представлення регулярності й гексагонального впорядкування точок (б)

На Міжнародній конференції з модифікації твердих тіл іонними пучками (IBMM 98, Амстердам) було представлено результати робіт [5; 15] з формування впорядкованої системи нанорозмірних елементів – паралельно розташованих лінійних утворень  $\text{CoSi}_2$  на поверхні зразків монокристалічного кремнію, опромінених іонами  $\text{Co}^+$  (рис. 12). Встановлено, що кластери  $\text{CoSi}_2$  ростуть у формі квадрата до тих пір, поки їх розмір не перевищить  $e a_0$  ( $e$  – основа натурального логарифма,  $a_0$  – ро-

змір, який відповідає мінімальній енергії кластера). Коли це відбувається, одночасно починає збільшуватися довжина кластера й зменшуватися його ширина до значення  $a_0$  (67 нм на Si(100)). Це свідчить про те, що сформовані силіциди перебудовуються з метою зменшення ширини. Крім того, слід урахувати, що розмір сформованого кластера залежить від енергій міжфазної взаємодії між кластером і поверхнею підкладки, що безпосередньо впливає на значення, яке визначається за формулою

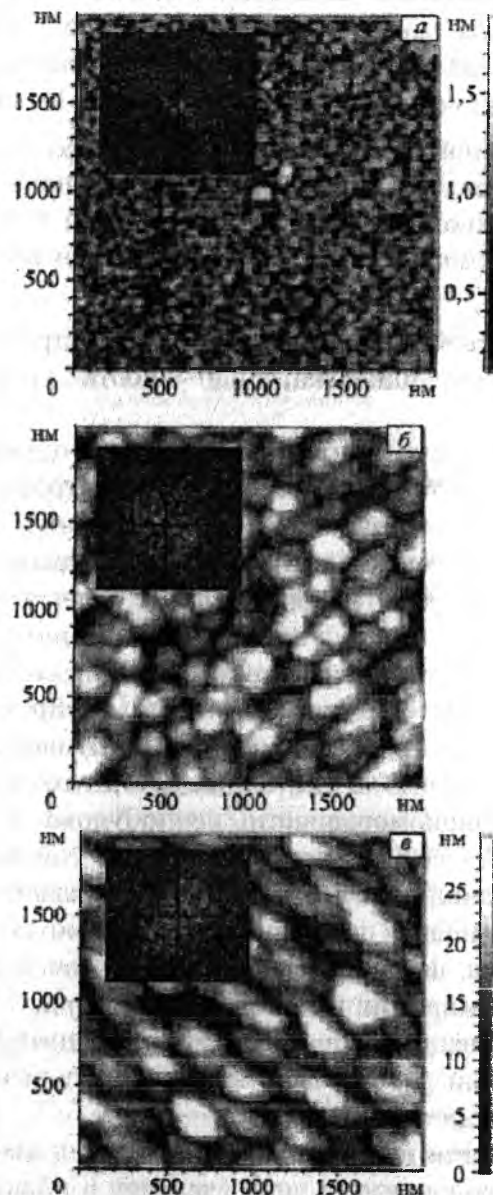
$$a_0 = e f h \exp(G/(ch)), \quad (7)$$

де  $c$  – константа, залежна від тензора напруги острівця, коефіцієнта Пуассона і модуля зсуву підкладки;  $h$  і  $\phi$  – висота і крайовий кут кластера відповідно.

Структури Si – Ge з квантовими точками є одними з найцікавіших об'єктів для квантової електроніки й оптоелектроніки. Такі структури вирощуються за допомогою молекулярно-променевої епітаксії і на них (принаймні в макетному варіанті) продемонстровані основні передбачені приладові можливості. Проблема, проте, полягає в тому, що реальна побудова технології, навіть із невеликим серійним випуском приладів, стикається з тим, що установки молекулярно-променевої епітаксії наявні лише в одиничних екземплярах, навіть у найрозвиненіших країнах світу (США, Японія, Англія), а процес як підготовки зразків, так і реалізації росту є тривалим. У зв'язку із цим достатньо природною альтернативною технологічною можливістю для побудови аналогічних об'єктів, а саме структур Si – Ge з квантовими точками, є іонна імплантація.

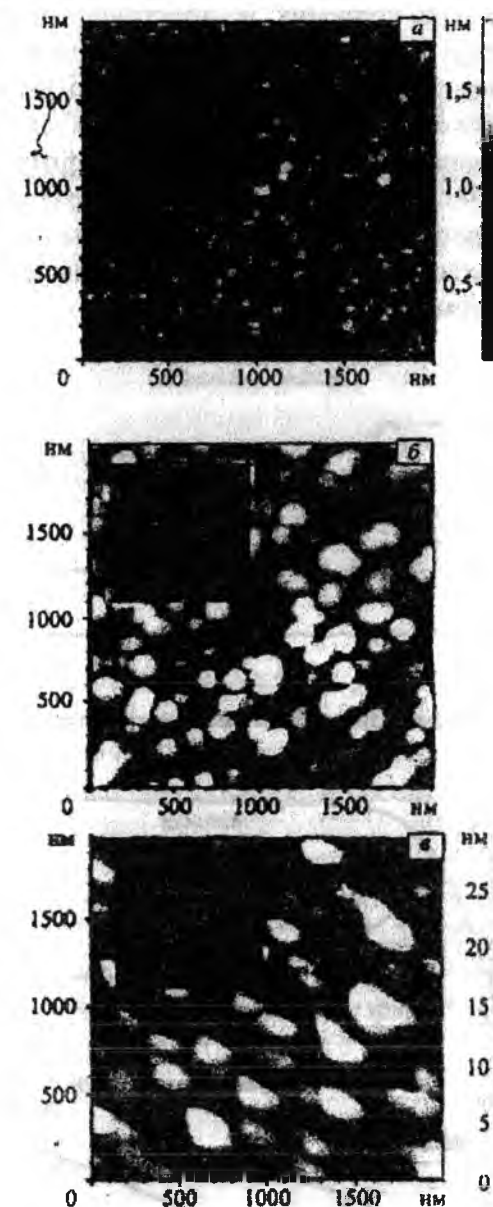
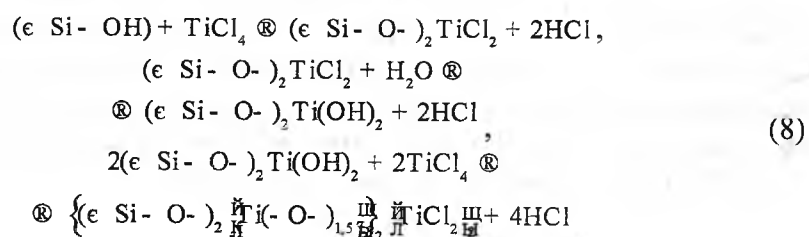
При проникненні іонів  $\text{Ge}^+$  у кремнієву підкладку і при подальшому дослідженні опроміненої поверхні за допомогою атомно-силового мікроскопа виявилось, що опромінена поверхня стає шорсткою з явно вираженими нанорозмірними неоднорідностями (рис. 13) [5; 16]. Як видно з рис. 13, існуючі неоднорідності за певних режимів можуть організуватися в паралельно розташовані витягнуті утворення, які ідентифікуються як квантові дрти.

**2.5. Молекулярне нашарування – метод хімічного складання.** В основі цих підходів лежать нові уявлення в області хімії надмолекулярних сполук, у рамках якої розроблено прецизійні хімічні способи синтезу твердих речовин – методи хімічного складання. Одним із тих, що одержали найбільше поширення і розвиток, є метод молекулярного нашарування (МН) [17]. Він полягає в реалізації в нерівноважних умовах хімічних реакцій на поверхні твердого тіла між реагентами, що підводяться ззовні, і поверхневими функціональними групами (ФГ) підкладки. Методом МН можна не лише синтезувати на поверхні твердофазної матриці наноструктури різного хімічного складу (моношари, зокрема багатокомпонентні), але й здійснювати поатомне хімічне складання поверхневих нано- і мікроструктур шляхом багатократного чергування хімічних реакцій за заданою програмою.



**Рис. 12.** АСМ-топографія у двовимірному вигляді зразка p-Si, опроміненого іонами кобальту ( $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 150 \text{ кеВ}$ ,  $j = 5 \text{ мкА/см}^2$ )

Так, синтез титаноксидного шару на поверхні діоксиду кремнію (біла сажа марки БС-30) здійснюється шляхом багатократного проведення реакцій:



**Рис. 13.** АСМ-топографія у двовимірному представленні зразка p-Si(111) з питомим опором  $\rho = 1 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ , опроміненого іонами  $\text{Ge}^+$  ( $D = 10^{17} \text{ см}^{-2}$ ,  $E = 150 \text{ кеВ}$ ,  $j = 5 \text{ мкА/см}^2$ ):

а – без випалювання; б – після пічного випалювання за температури  $980^\circ\text{C}$  протягом 30 хв; в – після двох послідовних пічних випалювань за температури  $980^\circ\text{C}$  протягом 30 хв (1) і за температури  $1100^\circ\text{C}$  протягом 30 хв (2). На врізках показані Фур'є-перетворення цих ділянок поверхні

При цьому товщина утвореного оксидного шару (0,2–2,0 нм) має лінійну залежність від числа циклів МН (1–20).

Дослідження властивостей продуктів, одержаних за методом МН,

уможливили винайдення корисних із практичної точки зору ефектів (рис. 14): розмірно-структурні (рис. 14, а–в) – ефект моношару, тобто різка, стрибкоподібна зміна властивостей матриці після нанесення 1 – 4-го моношарів нових структурних одиниць (див. рис. 14, а); ефект перекриття підкладки, коли утворюється шар, який фізично екранує поверхню (рис. 14, б); ефект взаємного узгодження структури поверхні підкладки і шару, що нарощується (рис. 14, в); ефекти багатоконпонентної системи, які виявляються під час створення багатозонних і синергичних низькорозмірних систем.



Рис. 14. Графічне зображення розмірно-структурних ефектів у процесах МН:  $n$  – число циклів МН (або кількість моношарів);  $\theta$  – ступінь фізичного перекриття поверхні нарощування шаром;  $d$  – товщина покриття;  $\Delta$  – структурний параметр

Можливі області застосування нової прецизійної технології з урахуванням знайдених закономірностей і різних напрямів розвитку твердофазного матеріалознавства представлені на рис. 15.

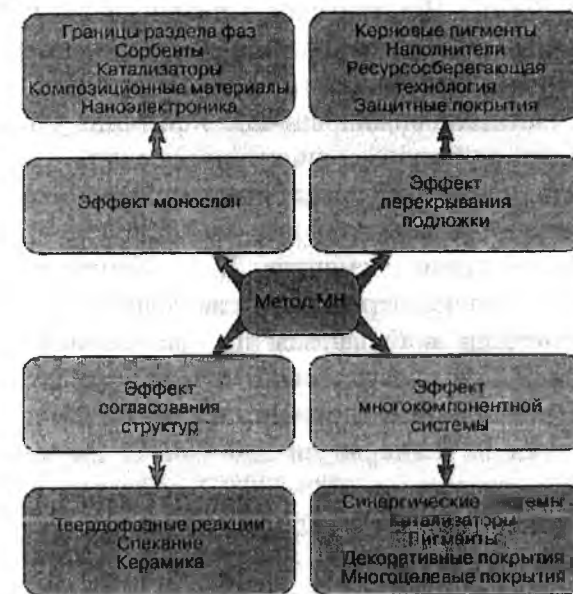


Рис. 15. Особливості застосування методу молекулярного напарування

**2.6. Методи колоїдної хімії.** Отримання квантових точок, які характеризуються виходом нанокристалів без внутрішніх напруг, заснований на методах колоїдної хімії [17]. Це один із найстаріших способів: ще 1857 року М. Фарадей так одержував колоїдне золото. За цим способом можливо отримувати нанокристали елементів II – IV (наприклад, CdS), або III – V (наприклад, InP, GaP, GaInP<sub>2</sub>, GaAs, InAs) груп Періодичної системи елементів сферичної форми розміром від 1 до 5 нм в органічних розчинниках, які полімеризуються за кімнатної або нижчої температури. Відмінними особливостями цього методу є низька температура (близько 200°C) синтезу колоїдних частинок, можливість широкої зміни концентрації напівпровідникових частинок, невелика концентрація поверхневих дефектів.

Розчин хімічних реагентів, що містять сполуки елементів II і IV груп, вводять у розчинник, що містить молекули, які взаємодіють із поверхнею новостворених наночастинок. Це обмежує їх ріст. Крупніші частинки можна осадити й одержати розчин практично однакових за розміром частинок. У даний час вдається відділити частинки з діаметрами, що відрізняються лише на декілька відсотків.

Синтез у такий спосіб речовин III – V груп Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва ускладнюється: у зоні реакції не повинно міститися ані повітря, ані води; температура реакції в цьому випадку вища, а тривалість більша; доводиться використовувати складніші хімічні сполуки.

Наразі час найкращі результати одержані при синтезі InP. Для цього береться In(C<sub>2</sub>O<sub>4</sub>)<sub>3</sub> і InF<sub>3</sub> або InCl<sub>3</sub>. Ці речовини взаємодіють зі складними сполуками, що містять фосфор. Реакція проходить декілька днів за



температури 270–290°C. Від тривалості реакції залежить розмір одержаних частинок. При описаному способі частинки, покриті зверху шаром молекул із розчину, можуть бути заміщені на інші, наприклад полімерні. Одержані частинки можна вивчати в розчині, у вигляді порошку, або поміщати в прозорий полімер чи органічне скло.

Існує ще досить поширений спосіб приготування неорганічного скла, забарвленого нанокристаллами сполук II – VI (CdS) і I – VII (CuCl, CuBr, CuI) Періодичної системи елементів Д. І. Менделєєва. Цей спосіб пов'язаний із промисловим отриманням світлофільтрів. Ріст напівпровідникових нанокристалів відбувається під час розпаду перенасиченого розчину іонів у склі. При цьому способі можна отримати стабільне твердотільне скло із вкрапленими нанокристаллами. Ріст кристалів у скляній матриці відбувається за температури 550–700°C. Ця температура перевищує температуру плавлення (400–500°C) об'ємних напівпровідникових кристалів. Зі зменшенням розміру нанокристала до 1–2 нм температура плавлення знижується до 200–250°C. До недоліків такого нарощування відносяться широкий розкид розмірів частинок, неможливість впливати на параметри межі розділу скло–нанокристал.

**2.7. Осадження з газодинамічного потоку пари.** Альтернативним до МВЕ є запропонований нами технологічний процес вирощування наноструктур із газодинамічного потоку пари.

**2.7.1. Елементи теорії газодинамічного потоку пари.** На рис. 16 представлено схему реактора для реалізації газодинамічного потоку пари. Профілі газодинамічних змінних розраховуються в безрозмірному вигляді як функції від безрозмірної координати  $\xi = (x - x_{кр}) / (L - x_{кр})$ . Нормування параметрів пари проводиться за їх значеннями в початковому газодинамічному перерізі або, що те ж саме, за їх значеннями в критичному перерізі конденсації [18]. В інтервалі  $x_0 \leq x \leq x_{кр}$  параметри пари, що рухається в циліндрі, не змінюються.

Задаючи різні значення  $\xi$  (від 0 до 1), можна обчислити відповідні їм значення числа Маха, що їм відповідають

$$M(\xi) = 1 + 1,91\xi - 1,325\xi^2 + 1,48\xi^3 + \dots \quad (9)$$

Обчислення коефіцієнта конденсації  $\alpha$ , нормованих значень густини ( $\rho/\rho_1$ ), температури ( $T/T_1$ ), витрати ( $G/G_1$ ), швидкості потоку пари, ( $u/u_1$ ) швидкості результуючої конденсації ( $\omega^* = \omega/\omega_1$ ), ступеня перенасичення парової фази ( $\psi$ ) проводимо за такими виразами:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{1 + 0,2M^2}{1,2} \right)^3 \exp\left( -\frac{6,88\xi}{1 - 0,242\xi} \right); \quad (10)$$

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \left( \frac{1,2}{1 + 0,2M^2} \right)^{2,5}; \quad (11)$$

$$\frac{p}{p_1} = \left( \frac{1,2}{1 + 0,2M^2} \right)^{3,5}; \quad (12)$$

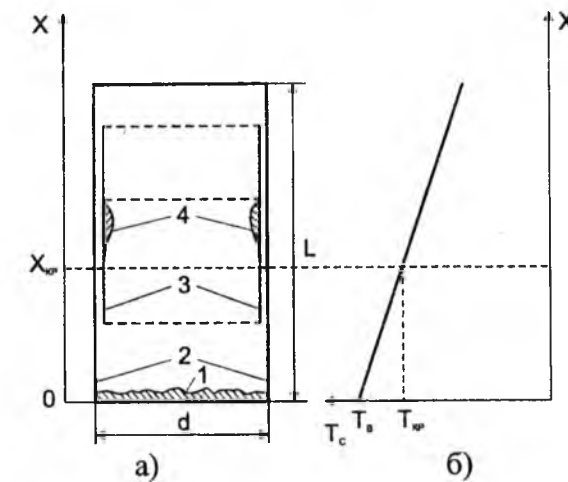
$$\frac{T}{T_1} = \frac{1,2}{1 + 0,2M^2}; \quad (13)$$

$$\frac{G}{G_1} = M \left( \frac{1,2}{1 + 0,2M^2} \right)^3; \quad (14)$$

$$\frac{u}{u_1} = M \sqrt{\frac{1,2}{1 + 0,2M^2}}; \quad (15)$$

$$\omega^* = \frac{\omega}{\omega_1} = 1,6 \left[ \left( \frac{1,2}{1 + 0,2M^2} \right) - \exp\left( -\frac{6,68}{1 - 0,242\xi} \right) \right]; \quad (16)$$

$$\psi = \frac{\rho(T)}{\rho_H(T_C)}. \quad (17)$$



**Рис. 16.** Схема реалізації газодинамічного потоку пари у квазізамкнутому об'ємі (а) і розподіл температури  $T_C$  вздовж стінки камери (б): 1 – наважка для випаровування; 2 – стінки камери; 3 – підкладка; 4 – конденсат

Нормуючий параметр  $\omega_1$  являє собою потік частинок пари, що падає на стінку в початковому газодинамічному перерізі:

$$\omega_1 = \frac{u_1 \rho_1 d}{4 \rho_{тв} (L - x_{кр})}, \quad (18)$$

де  $\rho_{тв}$  – густина масивного матеріалу для телуриду кадмію. У виразі для ступеня перенасичення парової фази чисельник дорівнює густині пари в деякому перерізі  $\rho(T)$ , а знаменник – густині насиченої пари  $\rho_H(T_C)$  за температури стінки камери в цьому ж перерізі.

Результати комп'ютерного розрахунку залежностей профілів термодинамічних параметрів пари ( $\psi$ ,  $\alpha$ ,  $\omega^*$ ) для ізольованої витратної дії від безрозмірної координати  $\xi$  чи  $T_{кр}$  і градієнта температури вздовж стінок  $\frac{dT_C}{dx}$  для телуриду олова представлено на рис. 17. Межі зміни те-

хнологічних параметрів:  $0 \leq \xi \leq 1,0$ ;  $900 \text{ K} \leq T_{кр} \leq 1400 \text{ K}$ ;  $\frac{dT_C}{dx} = 5 \dots 80 \text{ K/cm}$ ;

$L = 8$  см;  $d = 3$  см.

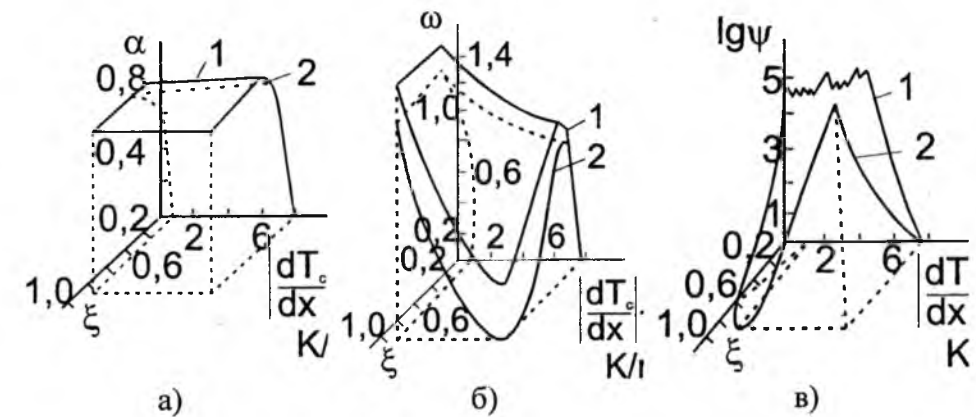
Аналіз діаграм дозволяє зробити ряд важливих висновків про характер зміни параметрів пари, а також оптимальних режимів отримання плівок. Так, довжина ділянки конденсуючої підкладки  $x_{кр}$ , на якій відсутній шар конденсату, зростає як у разі збільшення температури випаровування  $T_B$ , так і зменшення градієнта температури  $\frac{dT_c}{dx}$ . Зменшення абсолютного значення градієнта температури сприяє більш різкому зростанню  $x_{кр}$ , ніж збільшення температури випаровування. При достатньо малих значеннях градієнта  $\frac{dT_c}{dx} = 5$  К/см для  $T_B = 900 \dots 1400$  К відстань критичного перерізу перевищує довжину камери ( $x_{кр} > L$ ) і рівноважна конденсація матеріалу проходить за межами випарної камери.

Коефіцієнт конденсації  $\alpha$ , як і швидкість конденсації  $\omega^*$  та перенасичення  $\psi$ , залежить, у першу чергу, від температури випаровування  $T_B$ , градієнта температури вздовж стінок  $\frac{dT_c}{dx}$ , а також визначається місцем розміщення конденсуючої підкладки  $\xi$ . На ділянці  $x = x_{кр}$ ,  $\xi = 0$  конденсація пари відсутня ( $\alpha = 0$ ). При  $0,0 \leq \xi \leq 0,4$  спостерігається різке зростання коефіцієнта конденсації  $0,0 \leq \alpha \leq 0,9$ . Для безрозмірної координати  $0,0 \leq \xi \leq 1,0$  внесок ревіпарування зменшується, і коефіцієнт наближається до одиниці ( $\alpha \approx 1,0$ ) (рис. 17, а).

Результуюча швидкість конденсації пари  $\omega^*$  на стінки камери залежить від технологічних параметрів  $\xi$ ,  $\frac{dT_c}{dx}$ ,  $T_B$ . Початкове збільшення нормованої швидкості конденсації обумовлене деяким зменшенням ревіпарування пари (рис. 17, б). Подальший, більш плавний спад  $\omega^*$  визначається зменшенням тиску пари в камері. Пара може настільки розрідитися, що газодинамічний потік перетвориться в молекулярний. Положення максимуму швидкості конденсації відповідає умовам синтезу плівок найбільшої товщини. Зменшення  $\frac{dT_c}{dx}$  призводить до зсуву  $\xi_{max}$ , що відповідає максимальним значенням швидкості конденсації в області великих значень безрозмірної координати. Так само діє збільшення температури випаровування (рис. 17).

**2.7.2. Структура і процеси росту нанокристалів телуриду олова.** На підкладках зі сколів слюди, розташованих у напрямі руху пари, у області критичного перерізу ( $x = x_{кр}$ ) при  $\psi = 1,8 \dots 6,2$ ;  $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ ;  $\omega^* = 0,2 \dots 0,4$ , незважаючи на наявність переважних напрямів газового потоку, відбувається ріст окремих структурно досконалих тривимірних частинок-тетраєдрів (рис. 18, а, б, в, г). В умовах зростання, близьких до нормальних, не спостерігається викривлення ребер, які обмежують форми кристалів; грані, ребра і вершини переміщуються узгоджено. Поверхнева густина кристалографічних форм складає  $2 \cdot 10^6$  м<sup>-2</sup>, що в  $10^7 \dots 10^9$  разів менше за густини зародків у випадку отримання плівок

відкритим випаровуванням у вакуумі. На гранях  $\{111\}$  кристалів-зародків при сильних збільшеннях помітна шарова будова. У ряді випадків спостерігається також утворення пірамід 3m-симетрії, але з усіченими вершинами (рис. 18, б).



**Рис. 17.** Залежність розрахованих значень коефіцієнта конденсації  $\alpha$ , результуючої швидкості конденсації  $\omega^*$  та ступеня перенасичення парової фази  $\psi$  SnTe від градієнта температури  $\frac{dT_c}{dx}$  та безрозмірної координати  $\xi$  (температура випаровування  $T_B$ , К: 1 – 900; 2 – 1200;  $L = 8$  см,  $d = 3$  см)

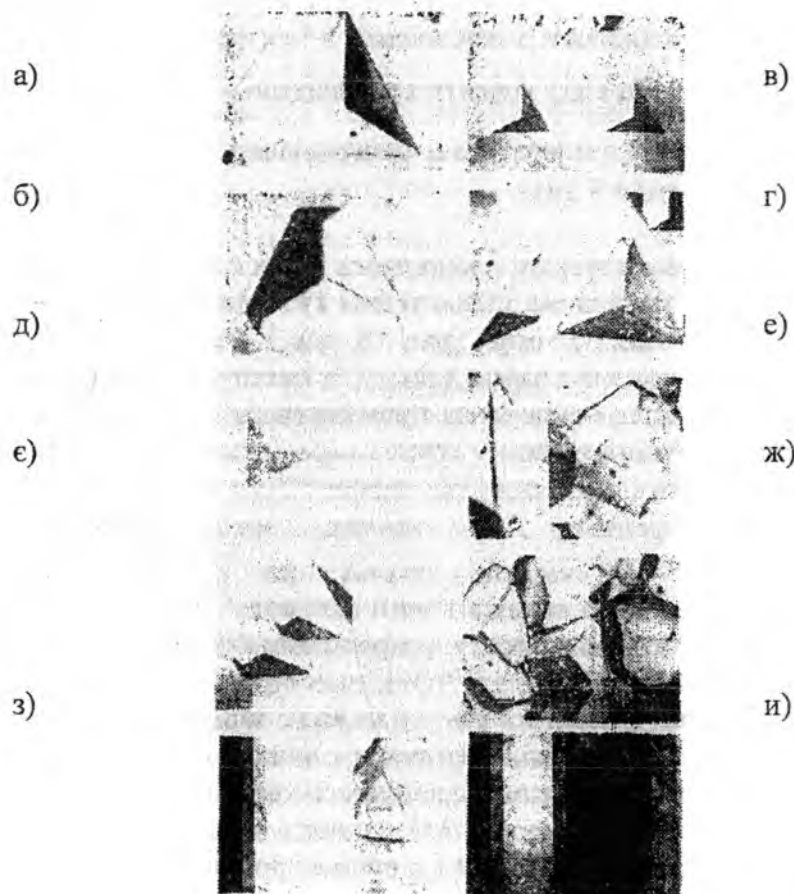
При віддаленні від поверхні випарника вздовж осі камери й зростанні перенасичення пари значно збільшується густина кристалів-зародків, зменшуються їх лінійні розміри (рис. 18, е, ж). У цих умовах кристалізації змінюється топологія пірамід росту, їх симетрія знижується від 3m до m і до 1. Найчастіше виявляється трансформація основ пірамід. Причиною спостережуваних явищ у групах пірамід може бути зокрема те, що вони закривають одна одну від спрямованих потоків пари, яка підживлює ріст кристалів. При значних перенасиченнях  $\psi > 10^2$ ;  $\alpha = 0,9 \dots 1,0$ ;  $\omega^* = 0,9$  симетрія пірамід ще більше погіршується (рис. 18, ж). У більшості випадків вони втрачають тригональну форму. Переважаючим механізмом росту є розростання й зрощення тривимірних острівців первинних зародків. Зрощення острівців без злиття частинок спричиняє появу дефектів і пор на межах зрощення. Легко зростаються тетраедри, розташовані вершинами один до одного в напрямку  $\langle 112 \rangle$ . Значно важче спікаються двійникові кристали з протилежною орієнтацією. При цьому утворюються канали вздовж напрямів  $\langle 110 \rangle$ . Округлення кутів, що відбувається в процесі зростання, полегшує процес спікання.

Після утворення суцільної плівки на її поверхні виникають нові центри зародження (рис. 18 и). У ряді випадків на поверхні можна спостерігати своєрідні фігури зростання, що є усіченими тетраедрами або їх комплексами, а також кристали з гексагональною симетрією. У таких епітаксійних плівках виникає перехідна область порядку середніх роз-

мірів острівців, що утворюються з окремих зародків до моменту їх спікання в суцільний шар. При автоепітаксії спостерігається “проростання” дислокацій, двійникових меж, дефектів упаковки з нижнього шару у верхній, а також прояв принципу “еволюційної селекції”.

Результати, наведені для телуриду олова, відображають загальну закономірність процесів зростання епітаксійних плівок, отриманих у квазізамкнутому об’ємі з температурно-градієнтними стінками.

**2.7.3. Топологія поверхні і процеси росту нанокристалічних структур телуриду свинцю.** Деякі результати дослідження морфології поверхонь наноструктур PbTe методом АСМ та її розрахунки представлено на рис. 19. Аналіз цих результатів дає можливість встановити певні закономірності у формуванні епітаксійних наноструктур залежно від температури зростання (рис. 19) [19] та їх товщини. Так, зокрема, низькі температури осадження  $T_n=353$  К (рис. 19, а) сприяють формуванню нанокристалів із переважанням швидкості росту в тангенціальному напрямку до поверхні підкладки.



**Рис. 18.** Кристалічна структура SnTe, осадженого на слюді, розміщений паралельно потоку пари при  $\frac{dT_c}{dx} = -5 \cdot 10^3$  К/м і перенасиченні пари  $\psi$ : а, б – 2, 4; в, г, д, е – 12; е – 34, ж –  $2 \cdot 10^2$ ; з, и –  $3 \cdot 10^4$

На це вказує те, що їх лінійні розміри в площині підкладки по азимуту (0,2–1,4 мкм) значно переважають розміри в нормальному напрямку – висота нанокристалів  $\sim 100$  нм. Підвищення температури росту до  $T_n = (380–408$  К) призводить до формування більш однорідних нанокристалів як за формою (рис. 19, б, в), так і за лінійними розмірами в азимутальному та нормальному напрямках до поверхні підкладки. Хоча лінійні розміри кристалів у площині підкладки (0,1–0,7 мкм) для цих умов осадження значно перевищують їх висоту (100–350 нм).

Подальше значне підвищення температури осадження до ( $T_n = 633$  К) призводить до росту на фоні добре сформованих кристалів діаметром 0,2–0,8 мкм і висотою 100–400 нм окремих “гігантів” із діаметром (1,6–1,8 мкм) в основі і висотою до (300–1200 нм) (рис. 19, г).

Зауважимо, що з підвищенням температури росту  $T_n$  шорсткість поверхні нанокристалічних структур зростає й складає  $\sim 33$  нм (353 К),  $\sim 49$  нм (383 К) і  $\sim 86$  нм (633 К) відповідно.

Цікавою є залежність топології епітаксійних структур від їх товщини. Для тонких плівок характерним є формування наноструктур з округленими гранями й без чіткої огранки, висота яких сягає до  $\sim 200$  нм, а інші лінійні розміри перебувають у межах 0,1–0,6 мкм.

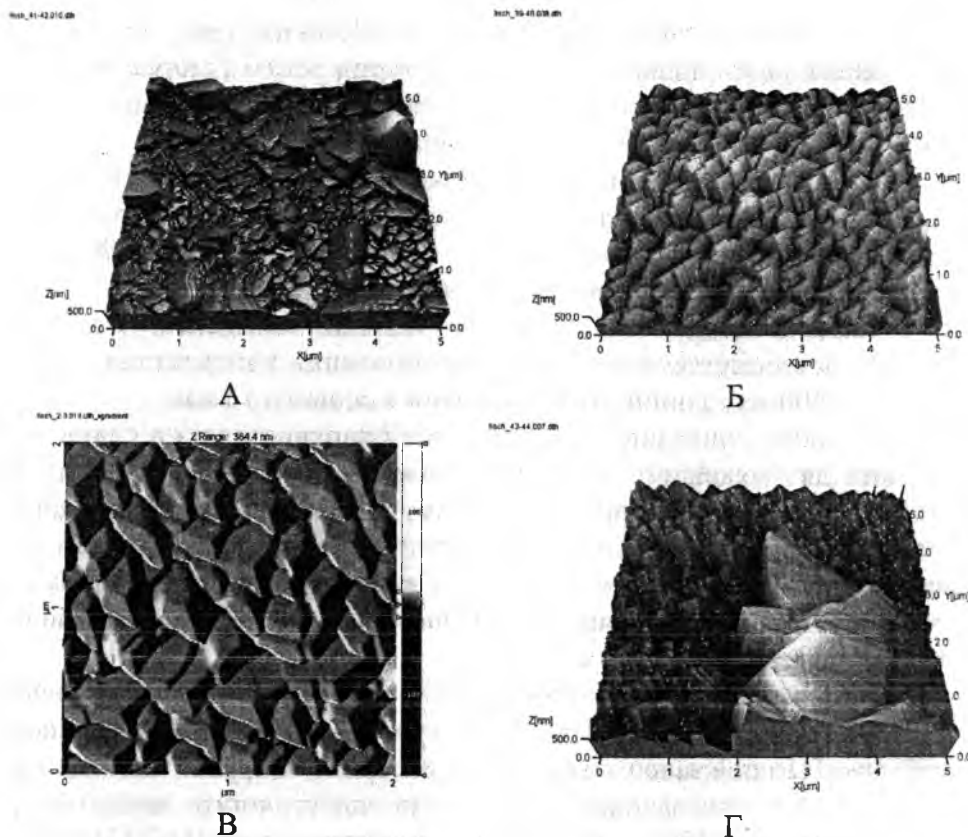
Зі збільшення часу осадження й товщини конденсату до (5,4–6,5 мкм) спостерігається ріст добре сформованих нанокристалів різної висоти (50–400 нм) з лінійними розмірами в основі до 1 мкм.

Таким чином, описаний характер росту нанокристалів на слюді характерний для механізму епітаксії Фольмера–Вебера [18]. Тривимірні кристали зароджуються при незначному перенасиченні, коли адшар надзвичайно розріджений, що характерно для слабкої адгезії, яка обумовлює орієнтаційно виражений зв’язок кристала-конденсату з підкладкою. Після утворення (спікання) суцільного шару з нанокристалів виникають нові центри зародження.

Утворення тетраєдрів із нахиленими до поверхні підкладки гранями (рис. 19, б, в) має також енергетичне підґрунтя – зменшення поверхневої енергії меж. Це пов’язано з тим, що їх поверхня “покрита” іонними рядами із щільним упакуванням, які не несуть електричного заряду (особливість напрямків  $\langle 100 \rangle$  у кристалах зі структурою типу NaCl [3]). Кристалографічно такі межі добре описуються моделлю за Бренденом [18].

Результати дослідження процесів формування нанокристалів PbTe на свіжих сколах (111) кристалів BaF<sub>2</sub> представлені на рис 20 [20]. Встановлено, що температура підкладки має визначальний вплив на механізм їх формування. За низької температури підкладки ( $\sim 570$  К) ріст наноострівків подібний до тривимірного утворення зародків згідно з механізмом Вольмера–Вебера, де практично весь матеріал переходить у наноострівці (рис. 20). Збільшення температури приблизно до 619 К викликає виникнення двовимірних фрагментів, які можуть покрити значну область підкладки. У даному випадку наноострівці з’являються як на чистій підкладці, так і на плато (рис. 20, б). Тут, ймовірно, слід розглядати комбінацію механізмів росту Вольмера–Вебера й утворення псев-

доморфного двовимірного шару, які супроводжуються зародкоутворенням нанострівців згідно з механізмом Странського–Крастонова. Подальше відносно мале збільшення  $T_p$ , аж до температур близько 623 К, означає утворення аномально великих нанострівців з явним кристалографічним гранеутворенням (трикутна піраміда) (рис. 20, в). Підвищення температури стінки до 763 К за середньої температури підкладки (близько 616 К) призводить до істотного збільшення щільності й розмірів нанострівців і відсутності двовимірних фрагментів плато (рис. 20, г). Іншими словами, механізм зростання нанострівців знову переходить у механізм Вольмера–Вебера.



**Рис. 19.** Топологія поверхні нанокристалічних структур PbTe на сколах (0001) слюди – мусковіт, вирощених за температур  $T_p$ , К: 353 (а), 380 (б), 408 (в), 633 (г)

Процеси зародкоутворення, поверхневої дифузії й міграція центрів утворення зародків поверхнею росту можна прослідкувати поетапно з використанням різного часу осадження. На початковому етапі осадження є багато (понад  $350 \mu\text{m}^2$ ) малих нанострівців діаметром 20–40 нм і висотою до 2 нм. Подальше осадження матеріалу, поверхнева дифузія і мала міграція нанострівців призводить до істотного зменшення густини нанострівців (близько  $200 \mu\text{m}^2$ ) і нерегулярного збільшення їх роз-

мірів. Як згадано вище, на цьому етапі з'являються великі пірамідальні нанострівці.

### 3. Штучні атоми і кристали

Квантові точки іноді образно називають “штучними атомами”. Якщо існують штучні атоми, чому б не спробувати “зібрати” з них штучні кристали? Технологія вирощування напівпровідникових квантових точок істотно полегшує це завдання. Як уже було відзначено, спонтанне формування масиву квантових точок відбувається під час нанесення дуже тонкого (товщиною в декілька атомних шарів) шару матеріалу В на поверхню матеріалу А в разі, коли постійні кристалічних ґраток матеріалів розрізняються на декілька відсотків. При зростанні першого мономолекулярного шару сполуки В на поверхні плівки зі сполуки А через відмінність сталих кристалічних ґраток матеріалів виникають пружні напруги, у разі продовження осадження речовини вони збільшуються, і стає вигідним уже не рівномірний розподіл речовини по поверхні (тобто не продовження зростання суцільного шару), а утворення окремих “крапель” речовини (квантових точок) на поверхні першого шару (його називають “змочуючим шаром”). Це сприяє мінімізації напруг в утвореній структурі. Тобто ми спочатку одержуємо не окремі “атоми”, а відразу цілий шар “штучних атомів” (“атомну площину”). Наростивши зверху на утворену “атомну площину” шар матеріалу А певної товщини (яку, звичайно, можна варіювати), можна знову повторити процедуру – виростити наступну площину “штучних атомів” і т. д. (утворені структури по аналогії зі звичними надрешітками часто називають “надрешітками квантових точок”).

За рахунок підбору оптимальних умов росту (на процес формування квантових точок впливає безліч чинників: температура підкладки, швидкість росту, кількість облягаючого матеріалу, властивості використовуваних матеріалів, кристалічна досконалість підкладки і т. д.) досягнуто великих успіхів у вирішенні завдання формування однорідних масивів квантових точок. Але, мабуть, ще більш інтригуючими виявилися результати, одержані при зростанні багат шарових структур квантових точок. Були знайдені такі цікаві ефекти, як поява спонтанного впорядкування в розташуванні квантових точок не тільки у вертикальному напрямі (напрямі росту), але і в площині шару, а також зменшення розкиду розмірів квантових точок.

Так, зокрема, досліджено вплив товщини шару матеріалу, з якого утворюються нанорозмірні острівці (PbSe в даному випадку) і температури підкладки, за якої відбувається ріст структури, на формування впорядкованих масивів квантових точок у системі PbSe/Pb<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>Te [21]. Показано, що в структурах може реалізуватися декілька різних ситуацій (рис. 21): нерегульоване розташування квантових точок; упорядковане розташування квантових точок, відповідне гранецентрованим кубічним ґраткам; наявність тільки вертикальної кореляції в розташуванні квантових точок. Причому тривимірне впорядковане розташування “штуч-

них атомів” має місце лише у досить вузькому діапазоні номінальної ростової товщини шару PbSe (номінальна товщина шару відповідає товщині однорідного шару речовини, яка б вийшла, якби матеріал розподілювався по поверхні рівномірно) і температур (рис. 22 і 23).

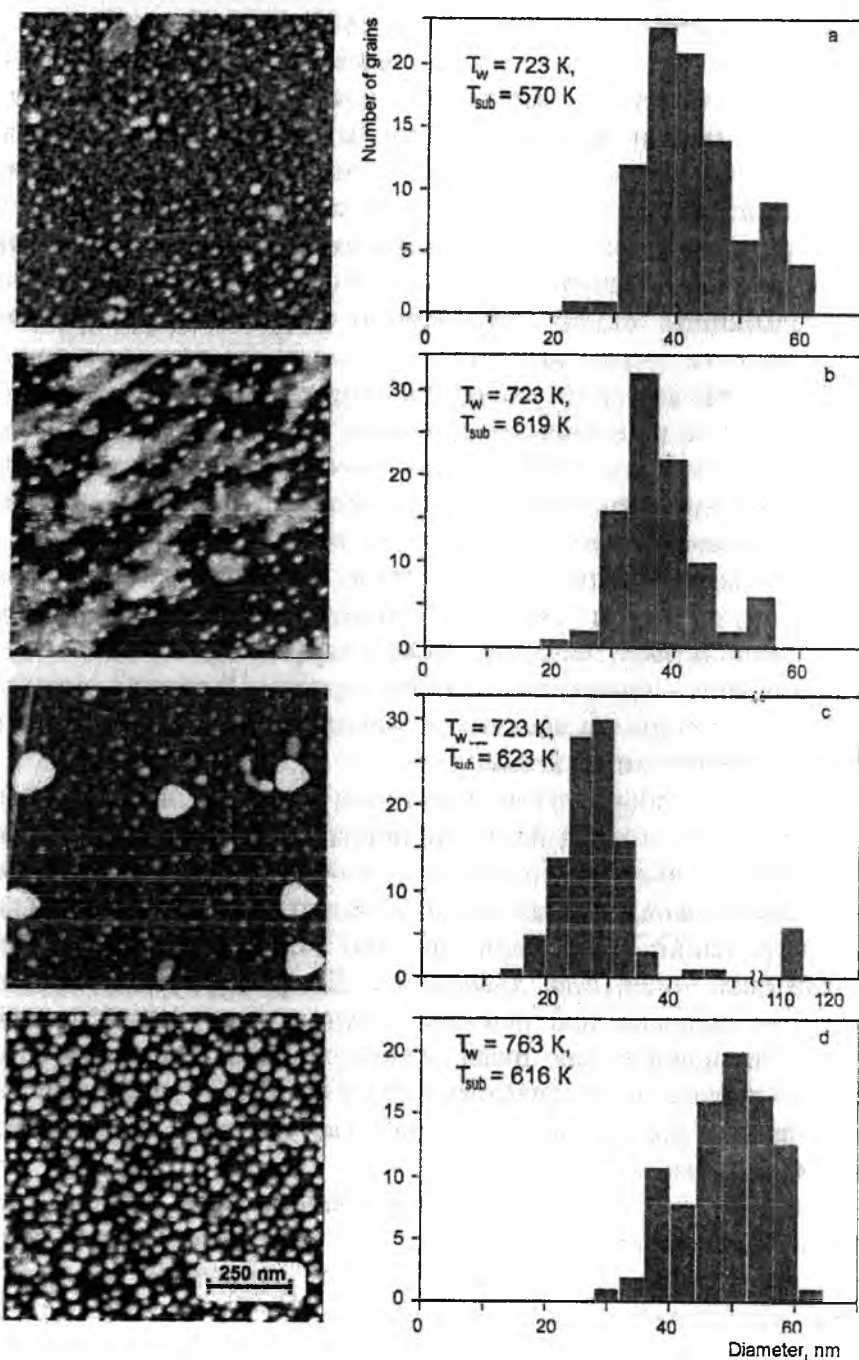


Рис. 20. АСМ процесів росту PbTe/BaF<sub>2</sub> N1 у методі гарячої стінки від температури підкладки і гістограми залежності діаметра наночастинок

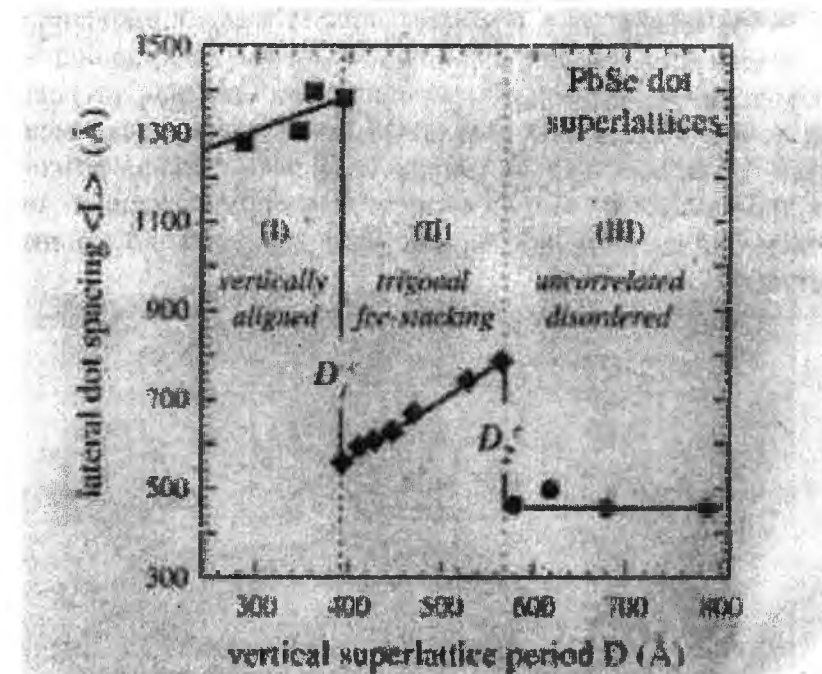
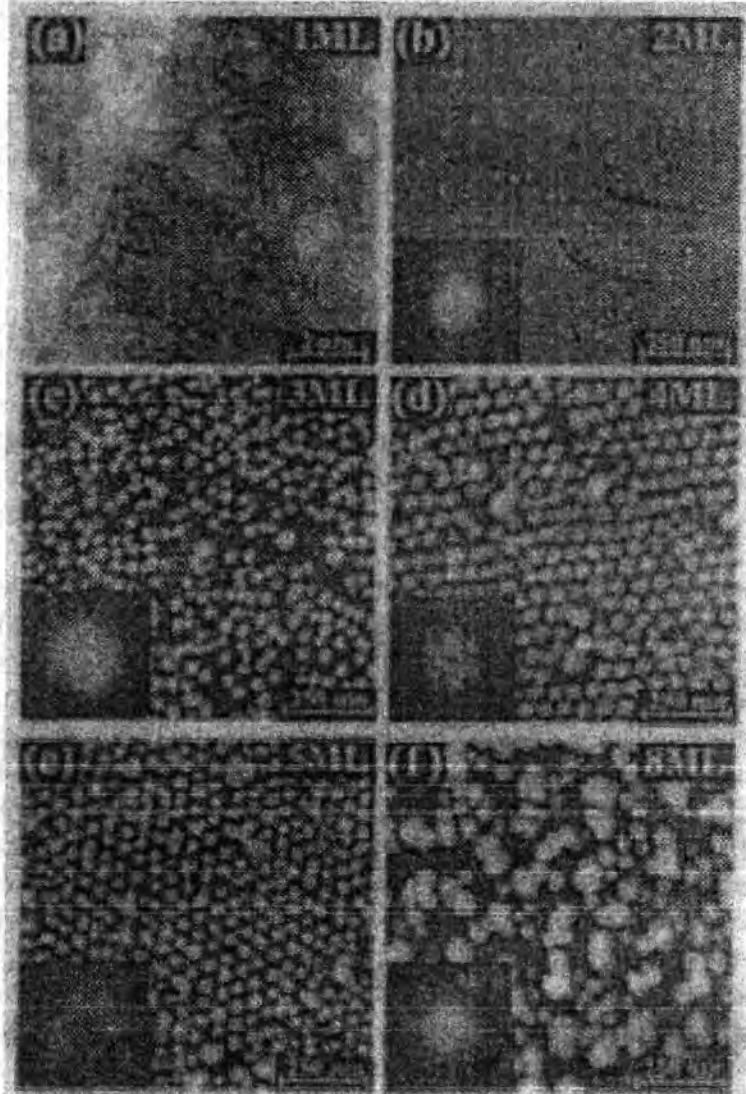


Рис. 21. Залежність середньої відстані між квантовими точками (у площині шару) у надрешітках квантових точок PbSe від товщини шару Pb<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>Te між шарами PbSe. Видно три режими: I – вертикальне впорядкування, II – утворення ГЦК ґратки, III – некорельований ріст.

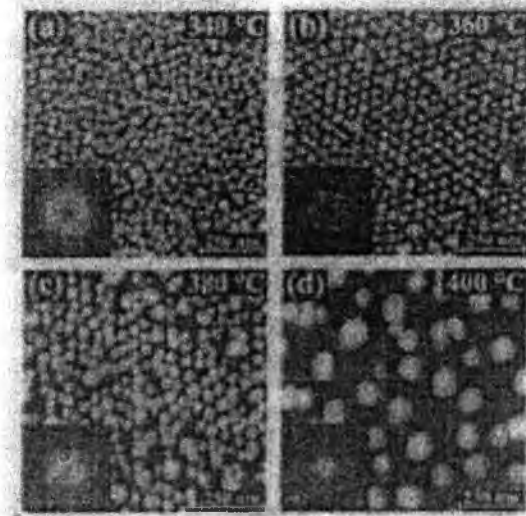
Можна також спостерігати: при появі тривимірного впорядкування зменшується розкид розмірів квантових точок (рис. 24). Це пов'язано з тим, що після вирощування першого шару квантових точок кристалічні ґратки матеріалу, яким він зарощується, шар квантових точок деформовані, причому, внаслідок анізотропії пружних властивостей кристалічних ґраток, напруги розподілені в матеріалі неоднорідно. Ці напруги й визначають пріоритетні місця для формування квантових точок при рості наступного шару квантових точок – місця, де напруги мінімальні. Зокрема, для системи PbSe/Pb<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>Te в певному діапазоні розмірів квантових точок існує три пріоритетні позиції (зміщені щодо тієї, що знаходиться під ними, квантової точки в площині, перпендикулярній напрямку росту) для утворення квантових точок при рості чергового шару. Результатом такої кореляції в розташуванні квантових точок у сусідніх шарах і в площині шару і є формування гранецентрованої кубічної ґратки (у даній системі) і, відповідно, гексагональна двовимірна ґратка квантових точок рис. 22 і 23.

Розрахунки вказують на існування нижнього і верхнього критичних розмірів квантових точок, при яких спостерігається тривимірне впорядкування масивів квантових точок. За малої номінальної ростової товщини шару квантові точки або взагалі не утворюються (рис. 22 а), або утворюються квантові точки з розміром, меншим за критичний (рис. 22 в, 22 с), а створювані ними напруги виявляються надто малими, для “прив’язання” квантових точок у наступному шарі до певних місць.

Якщо ж розміри квантових точок перевищують верхній критичний розмір, то внаслідок збільшення розмірів квантових точок і зменшення відстані між місцями на поверхні, де напрути мінімальні, ріст декількох квантових точок у сусідніх мінімумах виявляється вже неможливим; залишається тільки вертикальне впорядкування – точка над точкою (цієї ситуації відповідає рис. 22 г). Залежність розміру квантових точок, що утворюються, від температури підкладки призводить до виникнення схожої ситуації.



**Рис. 22.** Одержані за допомогою атомно-силової мікроскопії зображення верхнього (незарощеного) шару квантових точок PbSe при різних номінальних ростових товщинах шару PbSe (від одного до восьми моносарів) для надрешітки квантових точок (100 періодів); квантові точки вирощувалися за температури 360 С. На вставці – результат математичної обробки (спектр потужності) одержаних зображень. Видно появу шести чітких піків у разі впорядкування ґратки розташування квантових точок у площині шару (гексагональна ґратка)



**Рис. 23.** Одержані за допомогою атомно-силової мікроскопії зображення верхнього (незарощеного) шару квантових точок PbSe для надрешітки квантових точок (30 періодів) за номінальної товщини шару PbSe п'ять мономолекулярних шарів для ростових температур від 340°C до 400°C. На вставці – результат математичної обробки (спектр потужності) одержаних зображень; видно появу шести чітких піків у разі впорядкування ґратки розташування квантових точок у площині шару (гексагональна ґратка)

Однією з найважливіших є задача, пов'язана зі створенням напівпровідникових лазерів на квантових точках, де використання багатошарових структур і зменшення розкиду розмірів квантових точок гарантує збільшення ефективності роботи лазера (за рахунок збільшення числа “працюючих” штучних атомів). Крім того, за наявності зв'язку між шарами квантових точок іноді вдається отримати зі структур те, що за звичайних умов одержати не вдається. За рахунок росту двошарових структур квантових точок, в яких перший шар є “приманкою” для другого, і відповідного підбору технологічних параметрів у процесі росту кожного шару вдалося зсунути лінію люмінесценції квантових InAs/GaAs точок у довгохвильову область (до 1,4 мкм) за кімнатної температури при збереженні досить високої ефективності люмінесценції (довжини хвиль 13 мкм і 1,55 мкм оптимальні для роботи з оптоволоконними системами передачі інформації) [22].

#### IV. Елементи наноелектроніки

Розроблені останніми роками наноелектронні елементи завдяки своїм мініатюрності, швидкодії і низькій споживаній потужності складають серйозну конкуренцію традиційним напівпровідниковим транзисторам та побудованим на їх основі інтегральним мікросхемам як головним елементам інформаційних систем. Уже сьогодні техніка впритул наблизилася до теоретичної можливості запам'ятовування й передавання 1 біт інформації (0 і 1) за допомогою одного електрона, локалізація якого в просторі може бути задана одним атомом [12].

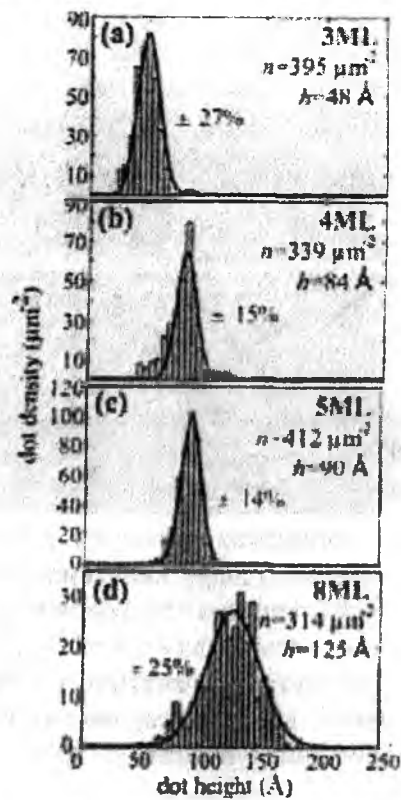


Рис. 24. Розподіл квантових точок по висоті залежно від номінальної ростової товщини шару PbSe

Напівпровідникові квантові точки, тобто кристали з розмірами в декілька десятків нанометрів, по суті, є гігантськими молекулами (що складаються з  $10^3 - 10^5$  атомів), сформованими зі звичайних напівпровідникових матеріалів, таких, як InAs, Si, InP, CdSe і т. д. Вони істотно менші за традиційні для сучасної електроніки структури з характерними розмірами від мікрона і більше. У багатьох випадках властивості нанокристалів відповідають властивостям атома. Наприклад, нижчий за величиною енергії стан електрона в нанокристалі відповідає s-стану електрона в атомі, а наступний – р-стану. Заповнення станів двома або шістьма електронами в квантовій точці найбільш вигідне енергетично; в атомі це відповідає повністю заповненим електронним оболонкам.

**4.1. Наноласери.** Структури з квантовими точками перспективні для створення напівпровідникових лазерів [23]. Електрон у квантовій точці переходить з одного рівня в зоні провідності на інший у валентній зоні з випуском фотона з величиною енергії  $h\nu$ , рівної різниці енергій рівнів розмірного квантування. Якщо в структурі з безліччю однакових квантових точок ініціювати узгоджені переходи електронів, то виникає лазерне випромінювання. На вищі рівні електрони потрапляють після пропускання струму через структуру. Оскільки пониження розмірності кристала зменшує ширину зон розмірного квантування, у квантовій точці існують тільки дискретні рівні енергії (як і в атомі), що призводить до звуження оптичних спектрів. Як приклад, на рис. 25 зображено спектр випромінювання

від однієї квантової точки GaAs із переходами між чотирма різними рівнями. Окрім надзвичайно вузького спектра випромінювання ще видно поляризацію світла у двох взаємно перпендикулярних площинах.

У структурах напівпровідникових квантових точок відбувається пониження порогового струму лазерної генерації, можливі великі швидкості модуляції випромінювання. Уже одержана лазерна генерація від структур із квантовими точками. Перед ученими нині постало технологічне завдання – зменшити розкид розмірів квантових точок при зростанні структур.

**4.2. Одноелектронні транзистори.** Схематичне зображення транзистора з нанокристалом CdSe, як активним елементом, наведене на рис. 26. Зазвичай на приготувану структуру осідають нанокристали, і один з них стає активним елементом, як показано на рис. 26. Прилад виготовляється на кремнієвій підкладці, на яку можна подати напругу  $V_g$  для зміни положення рівня енергії в нанокристалі. Підкладка відокремлена шаром оксиду кремнію  $\text{SiO}_2$  від золотих електродів, на які висаджені нанокристали. Один із нанокристалів замикає електроди. Опір такого приладу зазвичай складає близько 10 МОм. Для сферичного нанокристала радіусом  $R$ , який поміщено в середовище з діелектричною проникністю  $\epsilon$ , ємність буде  $C = \epsilon R$ , а потенціал  $U = q/C$ , де  $q$  – електричний заряд. Для  $R$  у декілька нанометрів величина ємності складає приблизно  $10^{-18}$  Ф. Якщо помістити в нього один електрон (заряд  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл), то потенціал зміниться на  $\sim 0,1$  В і збільшиться пропорційно  $1/R$ . Цього потенціалу цілком достатньо, щоб перешкодити рухові інших електронів.

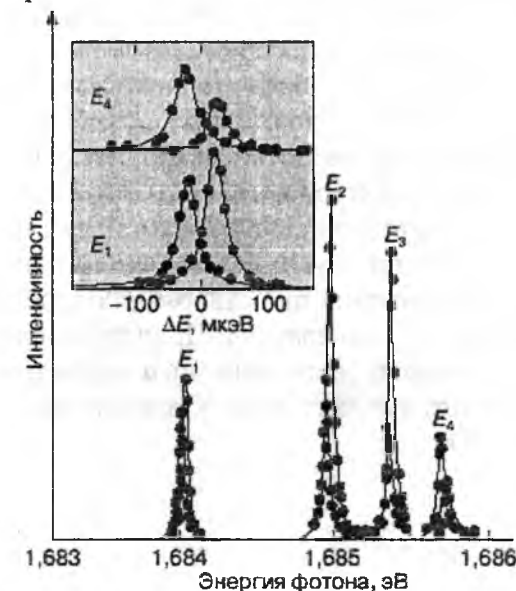


Рис. 25. Спектри випромінювання однієї квантової точки. Енергії  $E_i$  відповідають переходам між різними рівнями. На вставці показано переходи  $E_1$  і  $E_4$  в більшому масштабі.

На структурі з одиночною квантовою точкою добре демонструються атомні властивості квантових точок. Якщо прикласти невелику (декілька мілівольт) напругу  $V$  між електродами, то за певної напруги  $V_g$  (рис. 26) електрон може потрапити в нанокристал. Електрон потрапить на рівень у квантовій точці, якщо його енергія збігатиметься з ене-

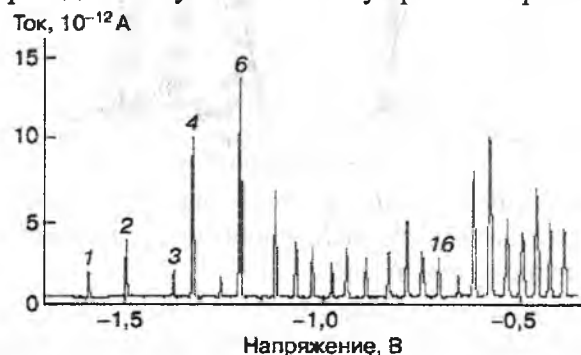
ргією рівня. Число електронів у квантовій точці можна змінювати поодиноці. При цьому спостерігається сплеск струму, що становить 10–12 А. При зміні  $V_g$  далі знову відбудеться сплеск струму. Кількість таких сплесків залежить від числа рівнів розмірного квантування  $i$ , в принципі, визначається розмірами нанокристалла. Описаний тут прилад поки що добре працює тільки за дуже низьких температур.



**Рис. 26.** Схематичне зображення одноелектронного транзистора з нанокристалом CdSe як активним елементом

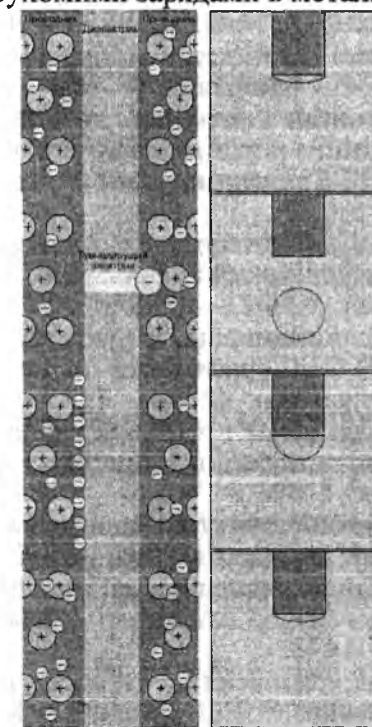
На рис. 27 зображено залежність струму, що проходить через квантову точку, від напруги  $V_g$ , яка змінює положення рівня енергії в точці. Кожен пік відповідає проходженню одного електрона. Спостерігаються дві істотні особливості: відстані між піками не рівні й амплітуди піків різні. Амплітуди піків визначають рівень енергії; тут найбільша енергія відповідає двом і шести електронам, як і в атомі в момент заповнення електронами оболонки (в атомі повністю заповненим електронним оболонкам відповідає число електронів: два або вісім в атомах гелію і неону; у точці – повністю заповненим станам двох рівнів відповідають шість електронів). Взаємодія електронів призводить до того, що їх енергія (положення рівня) залежить від числа електронів, які знаходяться на рівнях розмірного квантування, що веде до зміни відстані між піками на рис. 27. Без взаємодії електронів рівні повинні бути розташовані на однаковій відстані.

Уже з'явилися повідомлення про створення одноелектронної пам'яті, що працює за кімнатної температури. Прилад заснований на транзисторі, в якому один електрон, захоплюваний у нанокристал, призводить до замикання провідності вузького каналу транзистора.



**Рис. 27.** Залежність струму від напруги при послідовному заповненні електронами (по одному) однієї квантової точки. Числа на піках – число електронів, які пройшли

**4.3. Одноелектронне тунелювання.** Іншим специфічним проявом квантового обмеження є одноелектронне тунелювання в умовах кулонівської блокади (рис. 28) [12]. Щоб пояснити цей термін, розглянемо ілюстрований (рис. 28) приклад проходження електронем структури “метал – діелектрик – метал”. Як наочна ілюстрація паралельно проводиться аналогія із краплею, що відривається від краю трубки. Первинно межа розділу між металом і діелектриком електрично нейтральна. Після подання до металевих областей потенціалу, на цій межі починає накопичуватися заряд. Це продовжується до тих пір, поки його величина не виявиться достатньою для відриву й тунелювання через діелектрик одного електрона. Після акту тунелювання система повертається в первинний стан. У разі збереження зовнішньої прикладеної напруги все повторюється знову. Таким чином, перенесення заряду в такій структурі здійснюється порціями, рівними заряду одного електрона. Процес же накопичення заряду й відриву електрона від межі металу з діелектриком визначається балансом сил кулонівської взаємодії цього електрона з іншими рухомими і нерухомими зарядами в металі.



**Рис. 28.** Одноелектронне тунелювання в умовах кулонівської блокади

Транзистори на резонансному тунелюванні являють собою двобар'єрний діод на квантових ямах, у якого потенціал ям і відповідні резонансні умови контролюються третім електродом. Ці транзистори мають частоти перемикування порядку  $10^{12}$  Гц, що в 100 – 1000 разів вище, ніж у найкращих кремнієвих транзисторів із сучасних інтегральних мікросхем. Є пропозиції щодо створення на таких транзисторах елементів статичної пам'яті та інших елементів для обчислювальних систем.



**Висновки**

Огляд стану з проблем наноструктур дає можливість визначити такі актуальні питання, які необхідно розв'язати:

1. Які нові несподівані квантові властивості в наноструктур можна відкрити?

2. У чому полягають відмінності між властивостями поверхонь розділу наноматеріалів (у тому числі й гібридних типів) та характеристиками звичайних об'ємних станів?

3. Якого поширення може набути розвиток техніки самоскладання для елементів нанорозмірних пристроїв з урахуванням можливих помилок при комплектуванні?

4. Які технологічні процеси можуть бути економічно вигідними для виготовлення наноматеріалів із регульованими та заданими параметрами форми, складу, структури та властивостей?

1. H.Gleiter In: Defarmation of Polycrystals : prog. of 2<sup>nd</sup> RISO Symposium on Metallurgy and Materials Science (Eds. N. Hansen. T. Leffers, H. Lithold). Roskilde. RISO Nat. Lab., 1981. – P.15–21.
2. R. Birringer, H. Gleiter, H.P. Klein, P. Marguard // Phys. Lett. B. – 1984. – V.102. – P. 365–369; Z. Metallkunde. – 1984. – Bd.75.– S. 263–267.
3. Фізика і технологія тонких плівок та наносистем : матеріали XI Міжнародної конференції : у 2 т. / під. заг. ред. Фреїка Д. М. – Івано-Франківськ : ВДВ ЦІТ Прикарпатського університету. – 2007. – Т. 1.– С. 240; Т.2. – 276 с.
4. Андриевский Р. А. Наноматериалы : концепция и современные проблемы / Р. А. Андриевский // Рос. хим. ж-л (Рос. хим. общ-ва им. Д. М. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 5. – С. 50–55.
5. Герасименко Н. Н. Наноразмерные структуры в имплантированных полупроводниках / Н. Н. Герасименко // Рос. хим. ж-л (Рос. хим. общ-ва им. Д. М. Менделеева). – 2002. – Т. XLVI, № 5. – С. 30–41.
6. Андриевский Р. А. Основные проблемы наноструктурного материаловедения / Р. А. Андриевский // Наноструктурное материаловедение. – 2005. – № 1. – С. 5–13.
7. Андриевский Р. А. Наноструктурные материалы / Р. А. Андриевский, А. В. Погул. – М. : Академия, 2005. – 1952 с.
8. Andrievski R. A. Films as nanostructured materials with characteristic mechanical properties / R. A. Andrievski // Mater. Trans. – 2001. – Т. 42, No 8. – P. 1471–1473.
9. Молекулярно-лучевая эпитаксия и гетероструктуры / пер. с англ. ; под. ред. Ж. И. Алферова, Ю. В. Шмарцева. – М. : Мир, 1989.
10. Нанотехнология в ближайшем десятилетии. Прогноз направления исследований / под. ред. М. С. Роко, В. С. Уильямса, П. Аливисатоса ; пер. с англ. Р. А. Андриевского. – М. : Мир, 2002.
11. Белявский В. Н. Физические основы полупроводниковой нанотехнологии / В. Н. Белявский // Соросовский образовательный журнал. – 1998. – № 10. – С. 92–98.
12. Борисенко В. Е. Нанoeлектроника – основа информационных систем XXI века / В. Е. Борисенко // Соросовский образовательный журнал. – 1977. – № 5. – С. 80–86.

13. Миколайчик А. Г. Получение эпитаксиальных пленок халькогенидов олова / А. Г. Миколайчик, Я. И. Дубчак, Д. М. Фреик // Кристаллография. – 1968. – Т. 13. – С. 574–577.
14. S. Fasko, T. Dekorsy, C. Koerdт e.a. // Science. – 1999. – V. 285. – P. 1551–1553.
15. Brongersma S. H. In: Abstr. Int. Conf. Of Ion Beem Modifikation of Materials / S. H. Brongersma. – Amsterdam. – 1998.
16. Gerasimenko N. N. XIII Int. Conf. on Ion Implatation Texnology / N. N. Gerasimenko, Yu V. Troitskij. – Alpbach. Austria. – 2001.
17. Малыгин А. А. Химия поверхности и нанотехнология: взаимосвязь и перспективы / А. А. Малыгин // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 30–37.
18. Фреик Д. М. Физика и технология полупроводниковых пленок / Д. М. Фреик, М. А. Галушак, Л. И. Межиловская. – Львів : Вища школа, 1988. – 152 с.
19. Топология поверхні і процеси росту нанокристалічних структур РbТе на сколах слюди-мусковіт / Д. М. Фреїк, І. М. Ліщинський, П. М. Литвин, В. В. Бачук // Фізика і хімія твердого тіла. – 2008. – Т. 9, № 4. – С. 721–732.
20. Peculiarities of the PbTe nanoislet formation on BaF<sub>2</sub> substrate at “hot wall” epitaxy method investigated by atomi force microscopy / T. I. Sheremeta, I. V. Prokopenko, P. M. Lytvyn, O. S. Lytvyn, V. M. Vodop'yanov, A. P. Baktinov, E. I. Slynko // Functional Materials. – 2007. – V. 14, No 1. – P. 1–6.
21. Phys. Rev. B. / A. Raab, R.T. Lechner, G. Sprigholz. – 2003. – V. 67.
22. Phys. Rev. B. / E. C. Le.Ru, P. Howe, T. S. Jones, R. Murray. – 2003. – V. 67.
23. Кульбачинский В. А. Полупроводниковые квантовые точки / В. А. Кульбачинский // Соросовский образовательный журнал. – 2001. – Т. 7, № 4. – С. 98–104.

**Semiconductor Nanomaterials, Nanotechnology and Nanoelectronic****D.M. Freik**

*Physical-Chemical Institute at PreCarpathian National University  
by V. Stefanic, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine,  
e-mail: freik@pu.if.ua*

*There are the review of science papers, devoted research of classic size effect in lead chalkogenide thin films with a different structural completeness. The influence of inter-phase and inter-grain boundaries, and dislocations of disparity and on the transport phenomena and current carriers mobility within the framework of characteristic lengths, and diffuse scattering, and Petrits model are considered.*

**Key words:** nanostructure, semiconductors, nanoelectronic.

## МЕХАНІЗМИ ДЕФЕКТОУТВОРЕННЯ У НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДІВ СВИНЦЮ Й ОЛОВА

**М.О. Галушак**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [public@nuing.edu.ua](mailto:public@nuing.edu.ua)*

*Розглядається вплив внутрішніх механічних напружень, а також залишкового кисню на процеси дефектоутворення у плівках халькогенідів свинцю, осаджених на різні підкладки. З'ясовано механізм утворення металічної фази при вирощуванні плівок із парової фази. Розглянуто кінетику поверхневої концентрації електронів з урахуванням комплексоутворення власних дефектів із киснем.*

**Ключові слова:** тонкі плівки, халькогеніди свинцю, атомні дефекти, комплексоутворення.

### Зміст

1. Вступ.
2. Внутрішні механічні напруження і власні атомні дефекти у плівках.
  - 2.1. Розрахунки внутрішніх механічних напружень у плівках.
  - 2.2. Залежність парціального тиску пари халькогену від роду підкладок.
  - 2.3. Концентрація носіїв заряду й атомні дефекти у плівках
3. Утворення металічної фази при вирощуванні плівок із парової фази.
  - 3.1. Експериментальні результати.
  - 3.2. Квазіхімічний опис виділення металічної фази.
4. Вплив залишкового кисню на процеси дефектоутворення у плівках.
5. Комплекси власних дефектів з участю кисню у плівках.
6. Висновки.
7. Література.

### 1. Вступ

Халькогеніди свинцю і олова – вузькощілинні напівпровідники [1]. З одного боку, вони незмінні модельні об'єкти для наукових досліджень [1; 2], а з іншого, – базові матеріали для створення пристроїв електроніки [3; 4]. Це, зокрема, термоелектричні перетворювачі, які функціонують в інтервалі температур 300–950 К, а також фотоприймальні й ви-

промінювальні структури інфрачервоного діапазону оптичного спектра. Високі значення оптичного коефіцієнту поглинання ( $10^3 - 10^4 \text{ см}^{-1}$ ) та статичної діелектричної проникності (декілька сотень) дають можливість використовувати тонкі плівки для створення багатоелементних матриць.

Халькогеніди свинцю як гомогенна фаза існують як із надлишком металу відносно стехіометричного складу, так із надлишком халькогену [1; 2]. Так, максимальна протяжність області гомогенності телуриду свинцю відмічена за температур 1048 К від 49,994 до 50,013% атомного вмісту телуру [5]. Халькогеніди свинцю можуть бути як електронної, так і діркової провідності. Велике значення рухливості носіїв у n-PbTe і значна термо-е.р.с., а також сприятливе відношення рухливості носіїв до ґраткової теплопровідності визначають високу термоелектричну добротність матеріалу [5].

Тонкі плівки сполук  $A^{IV}B^{VI}$  привертають увагу дослідників уже тривалий час. Так, зокрема в роботах Земеля [6], Лопес-Отеро [7], Д. М. Фреїка [8; 9] розроблено й систематизовано ефективні вакуумні методи вирощування плівок із парової фази. Монографія Д. М. Фреїка, М. О. Галушака, Л. Й. Межиловської [10] певною мірою підсумовує досягнуті на той час успіхи в технології тонких плівок. Детальні дослідження формування тонких плівок та їх структури проведені Л. С. Палатніком, В. М. Косевичем, В. К. Сорокіним [11–13], а також С. О. Семілетовим [14]. Спектр практичного використання плівок халькогенідів свинцю розкрито в оглядах Холлоуея [15], Ф. Ф. Сизова [4], М. М. Берченка [3].

Основним фактором, що визначає робочі характеристики приладових структур, є дефекти кристалічної будови базового матеріалу. Тут слід відмітити серію робіт, виконаних Д. М. Фреїком, М. А. Рувінським, М. О. Галушаком, В. В. Прокопівим [16–40] у Прикарпатському університеті імені Василя Стефаника та Івано-Франківському національному технічному університеті нафти і газу, результати яких підсумовані в монографії [41] та огляді [42].

Зауважимо, що на даний час недостатньо вивчена природа атомних дефектів у тонкоплівковому матеріалі. Так, зокрема, при вивченні процесів дефектоутворення у плівках  $A^{IV}B^{VI}$  виникає необхідність в одночасному врахуванні більш широкого спектра зарядових станів власних точкових дефектів [17]. Науковий бік питання потребує належної систематизації експериментальних результатів та їх теоретичного обґрунтування.

Таким чином, проблеми, пов'язані з дослідженням дефектоутворення в тонких плівках сполук  $A^{IV}B^{VI}$  і розробкою фізичних основ керування їх видом за умов вирощування, легування, відпалу та радіаційної дії, є актуальними. Їх розв'язання може відкрити нові можливості ефективного використання халькогенідів свинцю й олова в мікрооптоелектроніці.

В огляді проведено аналіз теоретичних і експериментальних дослі-

джень процесів дефектоутворення в плівках сполук  $A^{IV}B^{VI}$  у процесі вирощування та під впливом зовнішніх чинників для напрямленої модифікації властивостей матеріалу, необхідних для потреб опто- і мікроелектроніки.

## 2. Внутрішні механічні напруження і власні атомні дефекти у плівках

Фізичні властивості плівок значною мірою залежать від типу підкладок, які використовуються в процесі вирощування плівок. Це підтверджується в ході дослідження холлівської концентрації носіїв  $n_H$  для плівок PbTe, вирощених із парової фази методом “гарячої стінки” на підкладках NaCl і BaF<sub>2</sub> [7] (рис. 2.1). Ці особливості можна пояснити впливом внутрішніх механічних напружень, які виникають у процесі вирощування плівок на різних підкладках. Кількість інформації про вплив підкладки на деформаційні ефекти в плівках AIVBVI є невеликою.

У праці [43] запропоновано якісну модель зміни зонної структури плівок PbTe на поверхні (111) BaF<sub>2</sub> за низьких температур, а в [44] вплив підкладки пов’язано з утворенням недосконалостей ґратки (групи вакансій, дефектів за Шоттки і Френкелем і т. п.) через відмінність температурних коефіцієнтів розширення. Авторами [45] розглянуто механічні напруження в гетероепітаксialьних плівках  $Pb_{1-x}Sn_xTe_{1-z}Dz$  ( $D = Se$  і  $S$ ), зумовлені взаємодифузиею елементів і зміною параметрів ґратки. Нами [18] вперше запропонована кількісна теорія, яка враховує особливості процесів дефектоутворення в плівках при осадженні на різні підкладки. Зупинимось більш детально на її основних моментах.

**2.1. Розрахунок внутрішніх механічних напружень у плівках.** Відомо, що повне напруження  $P$ , якого зазнає тіло, складається з так званого “теплого” тиску  $P^{(T)}$  [46; 47], який відповідає вільному тепловому розширенню тіла, і статичного (пружного) напруження  $P^{(e)}$ . Для плівки повне напруження

$$P_f = P_f^{(T)} + P_f^{(e)}, \quad (2.1)$$

для підкладки –

$$P_s = P_s^{(T)} + P_s^{(e)}, \quad (2.2)$$

причому на межі “плівка–підкладка”  $P_s^{(e)} = P_f^{(e)}$ . Як правило, товщина підкладки значно перевищує товщину плівки, тож деформацією підкладки можна знехтувати. Тому приймаємо, що повне напруження підкладки  $P_s = 0$ ,  $P_s^{(e)} = P_f^{(e)}$  по всій товщині плівки, при цьому повне напруження плівки виявляється однорідним і визначається різницею “теплових” тисків плівки і підкладки

$$P_f = P_f^{(T)} - P_s^{(T)}. \quad (2.3)$$

За температур, які значно перевищують температури Дебая матеріалів плівки і підкладки згідно з [46; 47], маємо

$$P_i^{(T)} \approx \frac{\gamma_i k T}{\beta_i r_i^2}, \quad i = f, s, \quad (2.4)$$

де  $\beta_i$  – коефіцієнт квазіпружної сили,  $\gamma_i$  – коефіцієнт ангармонічності відповідно для плівки ( $i = f$ ) і підкладки ( $i = s$ );  $r_i$  – відстань між найближчими сусідніми атомами в ґратках;  $k$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура. Коефіцієнт лінійного теплового розширення [46]

$$\alpha_i \approx \frac{\gamma_i k}{r_i \beta_i^2}, \quad (2.5)$$

звідки з урахуванням (2.4) маємо

$$P_i^{(T)} = \frac{\alpha_i \beta_i}{r_i} T. \quad (2.6)$$

Із (2.3) і (2.6) випливає, що повне напруження плівки визначається внутрішнім тиском

$$P_f = \left( \frac{\alpha_f \beta_f}{r_f} - \frac{\alpha_s \beta_s}{r_s} \right) T, \quad (2.7)$$

здатним спричинити, наприклад, зміну ширини забороненої зони

$$\Delta E_g \approx \frac{\partial E_g}{\partial P_f} P_f \quad (2.8)$$

і вплив на рівноважні концентрації носіїв струму і дефектів у плівці.

У випадку плівок PbTe для знаходження коефіцієнта квазіпружної сили  $\beta_f$  скористаємося потенціалом Леннарда–Джонса

$$V_f(r) = 4\epsilon \left[ \left( \frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left( \frac{\sigma}{r} \right)^6 \right], \quad (2.9)$$

який відповідає характеру хімічного зв’язку в PbTe [48]. Параметр  $\sigma$  визначається з умови мінімуму  $V_f(r)$ ;  $\epsilon$  можна знайти з експериментальних значень енергії зв’язку, причому

$$\beta_f = \frac{72\epsilon}{r_f^2}. \quad (2.10)$$

В якості підкладок розглянемо іонні кристали NaCl і BaF<sub>2</sub>, для яких використовуємо модельний потенціал [48; 49]

$$V_s(r) = -\frac{A(e^*)^2}{r} + \frac{C}{r^9}, \quad (2.11)$$

звідки

$$\beta_s = \frac{8A(e^*)^2}{r_s^3}, \quad (2.12)$$

де  $e^*$  – ефективний найменший заряд іона в ґратці,  $A$  – стала Маделунга [49,50].

Оцінимо внутрішнє напруження  $P_f$  у плівках, вирощених на підкладках NaCl і BaF<sub>2</sub>, і відповідні зміни ширини забороненої зони  $\Delta E_g$  плівок. Для підкладки NaCl за  $T_s = T_f = 653$  К,  $\alpha_s = 45 \cdot 10^{-6}$  К<sup>-1</sup>,

$r_s = 2,82 \cdot 10^{-10}$  м, [51],  $A = 1,7476$  [50],  $e^* = 0,893e$  [52],  $\alpha_f = 19,8 \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>,  $r_f = 3,226 \cdot 10^{-10}$  м,  $\epsilon \approx 4,085 \cdot 10^{-19}$  Дж [51,53], згідно з (2.7), (2.10) і (2.12), маємо  $P_f = -6,125 \cdot 10^8$  Па, що відповідає розтягу плівки PbTe. Із (2.8) випливає, що при  $(\partial E_g / \partial P_f) \approx -8,163 \cdot 10^{-11}$  еВ/Па [1] ширина забороненої зони зростає за рахунок деформації плівки на величину  $\Delta E_g \approx 0,05$  еВ. Неважко показати, що за подальшого охолодження плівки (напр., до кімнатних температур) на підкладках із NaCl вона підлягатиме додатковому стиску, встановленому експериментально [44]. Але при цьому плівка залишатиметься розтягнутою: за  $T=300$ К, величина  $P_f \approx -2,814 \cdot 10^8$  Па і  $\Delta E_g \approx 0,023$  еВ.

Для випадку підкладки BaF<sub>2</sub> за тієї ж температури (653К),  $\alpha_s = 18,4 \cdot 10^{-6}$  K<sup>-1</sup>,  $r_s = (\sqrt{3}/4) a_s$ ,  $a_s = 6,196 \cdot 10^{-10}$  м [51; 53; 54] (стала ґратки BaF<sub>2</sub>),  $A = 5,0387$  [50],  $e^* = 0,709e$  [52] і наведених вище значеннях параметрів PbTe отримаємо  $P_f \approx 4,900 \cdot 10^8$  Па і  $\Delta E_g \approx -0,04$  еВ, тобто стиск плівки призводить до зменшення ширини забороненої зони. При охолодженні до температури  $T=300$  К плівка на підкладці BaF<sub>2</sub> зазнає додаткового розтягу, залишаючись при цьому стиснутою:  $P_f \approx 2,251 \cdot 10^8$  Па і  $\Delta E_g \approx -0,018$  еВ.

## 2.2. Залежність парціального тиску пари халькогену від роду підкладок

Оскільки в методі гарячої стінки [7–10] використовуються два незалежних джерела, то результуючий тиск парів телуру

$$P_{Te_2} = P_n + P_{c_j}, \quad (2.13)$$

де  $P_{c_j}$  – парціальний тиск Te<sub>2</sub> біля підкладки  $j$ , створений лише наважкою PbTe;  $P_n$  – номінальний тиск парів телуру, який визначається незалежним джерелом чистого Te. Покажемо, що у квазірівноважних умовах за тих самих температур випаровування наважки T<sub>e</sub> і підкладки T<sub>s</sub> значення  $P_{c_j}$  залежать від матеріалу підкладки  $j$ . Константа рівноваги “пара–конденсат”, де єдиним первинним джерелом парів є наважка PbTe, рівна

$$K_{PbTe}(T_s) = P_{Pb_j} P_{c_j}^{1/2}. \quad (2.14)$$

Відношення парціальних тисків парів свинцю біля підкладок ( $j = 1,2$ ), що знаходяться в однакових умовах, визначиться як

$$\frac{P_{Pb1}}{P_{Pb2}} = \frac{\delta_1}{\delta_2} = \lambda, \quad (2.15)$$

де  $\delta_1$  і  $\delta_2$  – коефіцієнти відбивання (або “випаровування”) атомів свинцю від різних підкладок ( $\delta_1 \neq \delta_2$ ,  $\lambda \neq 1$ ). При однаковому сумарному тиску, створеному наважкою PbTe біля підкладок,

$$P_{Pb1} + P_{c1} = P_{Pb2} + P_{c2}. \quad (2.16)$$

Із (2.14)–(2.16) випливає, що

$$P_{c1} = (K_{PbTe} / (\lambda + 1))^{2/3} \lambda^{-2/3}, \quad (2.17)$$

$$P_{c2} = (K_{PbTe} / (\lambda + 1))^{2/3} \lambda^{4/3}. \quad (2.18)$$

У формулах (2.17) і (2.18) враховано можливу відмінність коефіцієнтів відбивання Pb ( $\delta_1$ ) і Te<sub>2</sub> ( $\Delta_j$ ). Завдяки (2.14) і (2.16) в (2.17), (2.18) можна ввести лише одну величину  $\lambda = \delta_1 / \delta_2$ , пов’язану з Pb. З (2.14), (2.15) випливає рівність  $\delta_1 \Delta_1^{1/2} = \delta_2 \Delta_2^{1/2}$ , яка не припускає обов’язкової рівності  $\delta_j = \Delta_j$ . Визначення  $\delta_1$  і  $\delta_2$  являє собою дуже складну й незалежну задачу мікроскопічної теорії взаємодії газу з поверхнею твердих тіл [55], ще далекої від свого завершення, головним чином унаслідок нестачі відомостей про структуру поверхневих шарів, потенціал взаємодії атомів або молекул газу з молекулами твердого тіла і багатоманітні процеси на поверхні.

Для достатньо тонких плівок товщиною  $d_f$ , які задовільняють нерівність  $n_f \sigma_f d_f \ll 1$ , де  $\sigma_f$  – поперечний переріз розсіювання атомів газу плівкою,  $n_f$  – концентрація центрів розсіювання в плівці, можна вважати, що плівка екрана є потенціал взаємодії атомів газу з поверхнею підкладки. Тобто для оцінювання можна використати наближення твердих сфер, яке вже застосовувалось у теорії взаємодії газу з поверхнею твердих тіл (див., напр. [55]).

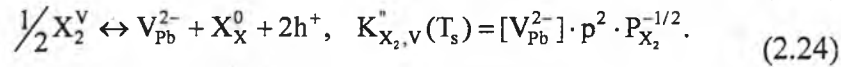
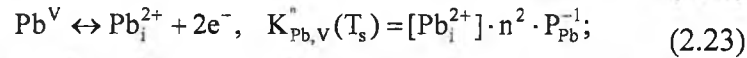
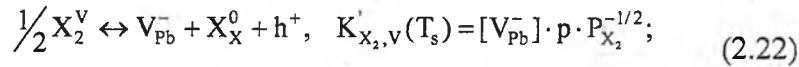
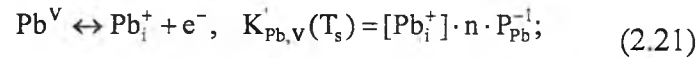
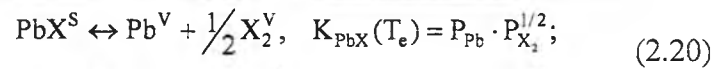
Оцінимо відносну величину коефіцієнтів відбивання атомів свинцю  $\lambda = \delta_1 / \delta_2$  як відношення поперечних перерізів пружного розсіювання твердих сфер із радіусом нейтрального атома свинцю  $R_{Pb} = 1,75 \cdot 10^{-10}$  м [52] на сфері з сумарним іонним радіусом  $R_1 = R_{Na^+} + R_{Cl^-}$  для підкладки NaCl ( $j = 1$ ) ( $R_{Na^+} = 0,95 \cdot 10^{-10}$  м,  $R_{Cl^-} = 1,81 \cdot 10^{-10}$  м [48, 49, 53]) і на сфері з радіусом  $R_2 = R_{Ba^{2+}} + 2R_F$  для підкладки BaF<sub>2</sub> ( $j = 2$ ) ( $R_{Ba^{2+}} = 1,47 \cdot 10^{-10}$  м [53],  $R_F = 1,36 \cdot 10^{-10}$  м [49]). Тоді отримаємо  $\lambda \approx 0,576$ . Використовуючи (2.17) і (2.18), неважко оцінити тиск телуру, створений наважкою PbTe, біля різних підкладок. За температури випаровування наважки T<sub>e</sub> = 833К і температури конденсації (підкладки) T<sub>s</sub> = 653К, які використані в [56], знаходимо:

$$P_{c1} \approx 7,492 \cdot 10^{-3} \text{ Па}, \quad P_{c2} \approx 2,490 \cdot 10^{-3} \text{ Па}. \quad (2.19)$$

Отже, за одного й того ж контрольованого експериментально номінального тиску  $P_n$  парів телуру фактичний парціальний тиск  $P_{Te_2}$  залежить від типу підкладки  $j$ . Зі зростанням товщини плівки ця залежність повинна суттєво зменшуватись. Повне й детальне дослідження цього питання є утрудненим при сучасному стані теорії та експерименту.

## 2.3. Концентрація носіїв заряду й атомні дефекти у плівках.

При одержанні плівок PbX (X = Te) з парової фази в технології гарячої стінки рівновагу систем “наважка–пара” і “пара–конденсат” можна описати згідно із законом діючих мас системою квазіхімічних реакцій [57, 16–20]:



Тут  $n$  – концентрація електронів;  $p$  – концентрація дірок; квадратними дужками [...] позначено концентрацію дефектів, індекс “s” відноситься до твердої фази, “v” – до парової;  $P_{\text{Pb}}$  і  $P_{\text{X}_2}$  – парціальні тиски парів свинцю і халькогену відповідно:  $e^-$  – електрони,  $h^+$  – дірки;  $K$  – константи рівноваги. Рівняння (2.20) визначає рівновагу системи “наважка–пара” у процесі розкладання твердого  $\text{PbX}$  у випарнику за температури випаровування  $T_e$ . Реакції (2.21)–(2.24) характеризують рівновагу “пара–конденсат”, відповідальну за утворення власних атомних дефектів за температури осадження (підкладок)  $T_s$ . Прояви власної провідності й різних процесів іонізації та рекомбінації дефектів описуються рівняннями:

$$“0” = e^- + h^+, \quad K_i = n \cdot p; \quad (2.25)$$

$$\text{Pb}_{\text{Pb}}^0 = \text{V}_{\text{Pb}}^- + \text{Pb}_i^+, \quad K_F'(T_s) = [\text{V}_{\text{Pb}}^-][\text{Pb}_i^+]; \quad (2.26)$$

$$\text{Pb}_{\text{Pb}}^0 = \text{V}_{\text{Pb}}^{2-} + \text{Pb}_i^{2+}, \quad K_F''(T_s) = [\text{V}_{\text{Pb}}^{2-}][\text{Pb}_i^{2+}]; \quad (2.27)$$

$$\text{Pb}_i^0 \leftrightarrow \text{Pb}_i^+ + e^-, \quad K_a(T_s) = [\text{Pb}_i^+]n / [\text{Pb}_i^0]; \quad (2.28)$$

$$\text{V}_{\text{Pb}}^0 \leftrightarrow \text{V}_{\text{Pb}}^- + h^+, \quad K_b(T_s) = [\text{V}_{\text{Pb}}^-]p / [\text{V}_{\text{Pb}}^0]; \quad (2.29)$$

$$\text{Pb}_i^0 \leftrightarrow \text{Pb}_i^{2+} + 2e^-, \quad K_a'(T_s) = [\text{Pb}_i^{2+}]n^2 / [\text{Pb}_i^0]; \quad (2.30)$$

$$\text{V}_{\text{Pb}}^0 \leftrightarrow \text{V}_{\text{Pb}}^{2-} + 2h^+, \quad K_b'(T_s) = [\text{V}_{\text{Pb}}^{2-}]p^2 / [\text{V}_{\text{Pb}}^0]. \quad (2.31)$$

Загальна умова електронейтральності має вигляд:

$$p + [\text{Pb}_i^+] + 2[\text{Pb}_i^{2+}] = n + [\text{V}_{\text{Pb}}^-] + 2[\text{V}_{\text{Pb}}^{2-}]. \quad (2.32)$$

Із (2.20)–(2.32) одержимо рівняння для визначення концентрації носіїв ( $n$ ) через константи рівноваги квазіхімічних реакцій  $K$  і парціальний тиск пари халькогену  $P_{\text{X}_2}$ :

$$\text{An}^4 + \text{Bn}^3 - \text{Cn} - \text{D} = 0, \quad (2.33)$$

де

$$\begin{aligned} A &= 2K_{\text{X}_2,v}^* K_F' \cdot P_{\text{X}_2}^{1/2} \cdot (K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v} K_{\text{X}_2,v} K_i)^{-1}; \\ B &= 1 + K_F' \cdot P_{\text{X}_2}^{1/2} \cdot (K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v})^{-1}; \\ C &= K_i + K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v} \cdot P_{\text{X}_2}^{-1/2}; \\ D &= 2K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v}^* \cdot P_{\text{X}_2}^{-1/2}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Експериментально визначена з ефекту Холла концентрація носіїв струму складає:

$$n_H = n - p = n - K_i \cdot n^{-1}. \quad (2.35)$$

Рівноважні концентрації заряджених й електронейтральних дефектів дорівнюють:

$$\begin{aligned} [\text{Pb}_i^+] &= K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v}^{-1} P_{\text{X}_2}^{-1/2}; \\ [\text{Pb}_i^{2+}] &= K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v}^{-2} P_{\text{X}_2}^{-1/2}; \\ [\text{V}_{\text{Pb}}^-] &= K_F' \cdot n \cdot P_{\text{X}_2}^{1/2} (K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v})^{-1}; \\ [\text{V}_{\text{Pb}}^{2-}] &= K_{\text{X}_2,v}^* K_F'' \cdot n^2 \cdot P_{\text{X}_2}^{1/2} (K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v} K_{\text{X}_2,v} K_i)^{-1}; \\ [\text{Pb}_i^0] &= K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v} K_a^{-1} P_{\text{X}_2}^{-1/2}; \\ [\text{V}_{\text{Pb}}^0] &= K_F K_i P_{\text{X}_2}^{1/2} (K_{\text{PbX}} K_{\text{Pb},v} K_b)^{-1}. \end{aligned} \quad (2.36)$$

Отримані загальні формули (2.33), (2.34) і (2.36) дають можливість розрахувати концентрації носіїв струму і дефектів залежно від технологічних чинників. У константі власної провідності  $K_i$  для плівок  $\text{PbTe}$  (в рівнянні (2.25)) слід урахувати не тільки відомі температурні залежності ширини забороненої зони  $E_g(T)$  й ефективної маси густини станів  $m(T)$  [1; 58]

$$K_i = N_c \cdot N_v \cdot e^{-E_g/kT}. \quad (2.37)$$

$$\begin{cases} N_c = N_v = 2(mkT/2\pi\hbar^2)^{3/2}, \\ \left\{ \begin{aligned} m(T) &= g_c^{2/3} \bar{K}^{1/3} \cdot 0,048 \cdot m_0 \sqrt{T/300}, \\ g_c &= 4, \bar{K} = m_{\parallel}/m_{\perp} = 9 \quad (T \geq 300\text{K}), \end{aligned} \right. \end{cases} \quad (2.38)$$

$$E_g(T) = 0,217 + 4,5 \cdot 10^{-4} (T - 77) (\text{eV}), \quad (T \geq 77\text{K}),$$

але й отриману вище залежність (2.8) ширини забороненої зони від внутрішнього напруження плівки  $P_f$ , яке виначається за формулою (2.26). У (2.38)  $\bar{K}$  – константа анізотропії ефективних мас електронів у зоні провідності і легких дірок у валентній зоні,  $m_0$  – маса вільного електрона.

Константу  $K_F'$  знаходимо з умови рівноваги

$$K_F' = K_{\text{PbTe}}(T_s) K_{\text{Pb},v}'(T_s) K_{\text{Te},v}'(T_s) K_i^{-1}(T_s). \quad (2.39)$$

Ураховуючи, що при розглянутих тисках пару можна вважати ідеальним газом, для квазірівноважного стану “пара–конденсат” отримаємо:

$$K_{\text{PbTe}}(T_s) = K_{\text{PbTe}}(T_e) \cdot \left( \frac{T_s}{T_e} \right)^{3/2}. \quad (2.40)$$

Використані константи реакцій наведено в таблиці 2.1 і взято з раніше визначених для кристалів  $\text{PbTe}$  [59; 60], а парціальний тиск пари телуру  $P_{\text{Te}_2}$  визначали згідно із (2.32), (2.38) для кожної підкладки.

Результати розрахунку залежності концентрації носіїв струму  $n_H = n - p$  і дефектів у плівках  $\text{PbTe}$  від номінального тиску пари телуру  $P_n$  при осадженні на підкладках  $\text{NaCl}$  і  $\text{BaF}_2$  за методом гарячої стінки при  $T_s = 653\text{K}$  наведено на рис. 2.1 і 2.2. Видно (рис. 2.1), що достатнє збільшення  $P_n$  призводить до суттєвого зменшення концентрації електронів. За деякого значення  $P_n^*$  і фіксованої температури підкладки  $T_s$  відбувається зміна типу провідності з  $n$ - на  $p$ -тип і подальше зростання

концентрації дірок. Слід відзначити, що вказана зміна концентрації носіїв струму (рис. 2.1) супроводжується зміною концентрації вакансій і міжвузловинних атомів свинцю (рис. 2.2). Значення тиску телуру  $P_n^*$ , при якому  $n = p$  на рис. 2.1 цілком відповідає цьому випадку на рис. 2.2 (уявна невідповідність пов'язана з урахуванням різних зарядових станів дефектів). Зі збільшенням  $P_n$  зростає концентрація однозарядних вакансій свинцю (рис. 2.2, криві 1) і зменшується концентрація однозарядних міжвузловинних атомів свинцю (рис. 2.2, криві 2). Двократно заряджені дефекти виявляються сильно компенсованими. За розрахунками (рис. 2.2, криві 3, 4) їх концентрація є досить великою й складає  $\sim (1-6) \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$ , що на один-два порядки перевищує концентрацію однозарядних дефектів, яка, у свою чергу, переважає концентрацію електронейтральних дефектів (рис. 2.2, криві 5, 6). Це узгоджується із припущенням про тенденцію переважання багатозарядних вакансій і міжвузловинних атомів, здатних до іонізації різної кратності за наявності досить дрібних акцепторних і донорних рівнів [61]. Унаслідок сильної, але не повної компенсації двозарядних дефектів (рис. 2.2, криві 3, 4) суттєву та співмірну з ними роль у зміні концентрації носіїв струму в плівках відіграють також однозарядні дефекти. Наведені результати отримано з урахуванням впливу деформаційних ефектів, що виникають у процесі вирощування плівок на різних підкладках NaCl і BaF<sub>2</sub>.

Таблиця 2.1. Константи рівноваги  $K$  і ентальпії  $\Delta H$  квазіхімічних реакцій утворення дефектів  $K = K_0 \exp(-\Delta H/kT)$  для PbTe [59; 60; 61]

Константа	$K_0$	$\Delta H, \text{eV}$
1	2	3
$K_{\text{PbTe}}, \text{Па}^{3/2}$	$1,4 \cdot 10^{18}$	3,51
$K'_{\text{Pb},V}, \text{см}^{-6} \text{Па}^{-1}$	$5,5 \cdot 10^{30}$	-1,01
$K'_{\text{Te}_2,V}, \text{см}^{-6} \text{Па}^{-1/2}$	$1,2 \cdot 10^{38}$	0,25
$K''_{\text{Pb},V}, \text{см}^{-9} \text{Па}^{-1}$	$1,2 \cdot 10^{51}$	-0,87
$K''_{\text{Te}_2,V}, \text{см}^{-9} \text{Па}^{-1/2}$	$1,5 \cdot 10^{59}$	0,39
$K_a, K_b, \text{см}^{-3}$	$6,5 \cdot 10^{20}$	0,14

Експериментальні вимірювання  $n_H$  в [56] для плівок, вирощених за  $T_s = 653\text{K}$ , виконані за кімнатних температур. Порівняння з розрахунковими залежностями має зміст лише в межах застосовності концепції заморожених дефектів, коли  $n_H = n - p$  за  $T = 300\text{K}$  визначається концентраціями дефектів, які виникли за  $T_s = 653\text{K}$  (див. (2.1.13)). З рис. 2.1 видно, що узгодження з експериментальними залежностями [56] концентрації носіїв струму від номінального тиску парів телуру  $P_n$  у процесі осадження плівок PbTe на підкладках NaCl і BaF<sub>2</sub> є можливим лише у випадку врахування внутрішніх напружень плівок. Деформація розтягу

плівки, вирощеної на NaCl, призводить до зменшення рівноважної концентрації носіїв струму. Стиск плівки на BaF<sub>2</sub> збільшує концентрацію носіїв струму. Криві 1', 2' (рис. 2.1) отримано без урахування деформаційних ефектів. Зауважимо, що оцінка впливу внутрішніх напружень на зміну  $\Delta E_g$  з урахуванням різниці температур синтезу плівки та температури вимірювань призводить до невеликого розходження з експериментом [56], що свідчить на користь заморожування дефектів.

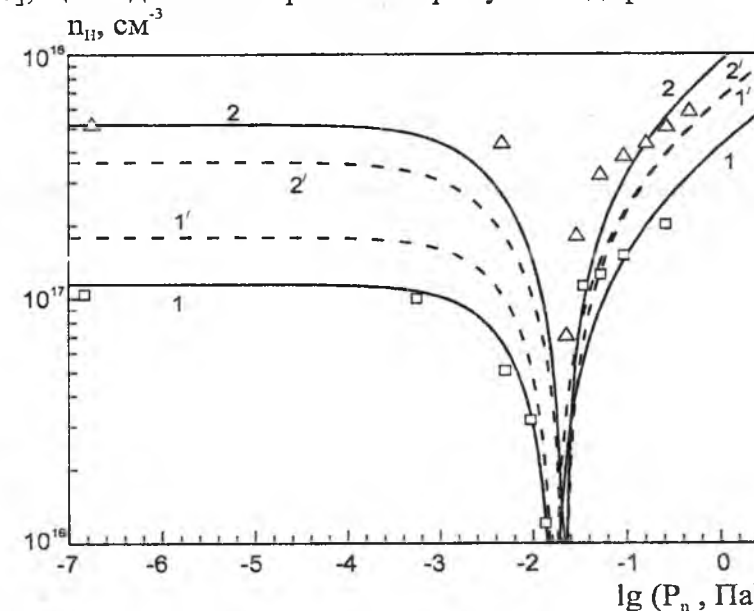


Рис. 2.1. Залежності концентрації носіїв струму  $n_H$  у плівках PbTe від номінального тиску пари телуру ( $T_s = 653\text{K}$ ,  $T_r = 833\text{K}$ ); підкладки:  $\square$ , 1, 1' – NaCl (100);  $\Delta$ , 2, 2' – BaF<sub>2</sub> (111);  $\square$ ,  $\Delta$  – експеримент; 1, 2 – розрахунок з урахуванням внутрішнього напруження плівок, 1', 2' – без нього [18].

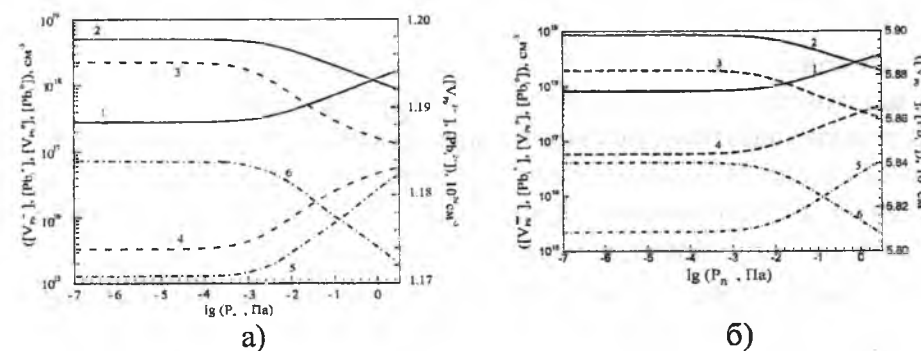


Рис. 2.2. Залежності розрахованих значень концентрацій дефектів у плівках PbTe, вирощених на підкладках BaF<sub>2</sub> (а) і NaCl (б) від номінального тиску пари телуру ( $T_s = 653\text{K}$ ,  $T_r = 833\text{K}$ ); 1 і 2 – однозарядні дефекти  $[V_{\text{Pb}}^-]$  і  $[Pb_i^+]$ , 3 і 4 – двократно заряджені дефекти  $[V_{\text{Pb}}^{2-}]$  і  $[Pb_i^{2+}]$ , 5 і 6 – електронейтральні дефекти  $[V_{\text{Pb}}^0]$  і  $[Pb_i^0]$  відповідно [18]

З рис. 2.2 випливає, що концентрація точкових дефектів у плівці, осадженої на NaCl, виявляється більшою, ніж на BaF<sub>2</sub>, за одних і тих же фіксованих умов вирощування плівок. Ця обставина також пов'язана з відмінністю в характеристиках деформації плівок на двох підкладках. При розтягу (на NaCl) збільшується об'єм плівки, а при стиску (на BaF<sub>2</sub>) – зменшується. При будь-якому механізмі швидкість іонізації не залежить від об'єму, в той час як швидкість рекомбінації обернено пропорційна об'єму (див., напр., [62]). У межах розглянутої термодинамічної і кристалохімічної моделі, що враховує процеси іонізації і рекомбінації дефектів, приходимо до результатів, які цілком відповідають уявленням фізичної кінетики про швидкість іонізації та рекомбінації. Це свідчить про правильний вибір констант квазіхімічних реакцій [59; 60].

Отже, урахування внутрішніх напружень у плівках і складного спектра зарядових станів точкових дефектів, а також відмінності парціального тиску парів компонентів біля різних підкладок призводять до кількісного узгодження з експериментальними результатами.

### 3. Утворення металічної фази при вирощуванні плівок із парової фази

У працях [63; 64] теоретично досліджувалася можливість існування рівноважної дисперсної фази напівпровідникових систем, яка містить металічні частинки. Гетерогенні стани такого типу пов'язувались із флуктуаційною неоднорідністю неідеальних кристалів, з перерозподілом електронів та іонів й виділенням їх у просторово розділені області в напівпровіднику, в якому стає можливим фазовий перехід першого роду. У напівпровідниках із великими статичними діелектричними проникностями (до яких, зокрема, відносяться халькогеніди свинцю) зміна кулонівської енергії при перерозподілі заряджених частинок може бути невеликою, й області утвореної металічної фази є достатньо малими.

#### 3.1. Експериментальні результати

Експериментально виділення фази вільного свинцю в процесі вирощування плівок халькогенідів свинцю методом гарячої стінки у квазірівноважних умовах спостерігалось в [10; 56] за низьких парціальних тисків пари халькогену (або підвищених тисків пари свинцю).

Тонкі плівки халькогенідів свинцю вирощували з парової фази методом гарячої стінки [10]. Наважками для випаровування були наперед синтезовані кристали n-типу провідності з концентрацією носіїв  $n = (2 - 4) \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ . Як підкладки використовувалися свіжі сколи (111) і (100) монокристалів BaF<sub>2</sub> і NaCl відповідно. Парціальні тиски сполук PbX (X = Te, Se, S), а також складових компонентів P<sub>X<sub>2</sub></sub>, PPb у зоні осадження задавалися температурами основного T<sub>e</sub> = 820 K і додаткових T<sub>a</sub> = 400–600 K джерел із наважками сполук та чистих елементів відповідно. Осадження плівок проводилося при температурах T<sub>S</sub> = 400–700 K. Температура стінок камери складала T<sub>w</sub> = 850 K. Швидкість росту плівок була ~3 нмс-1, а їх товщина – 5–8 мкм.

Проведені дослідження засвідчили, що для плівок телуриду свинцю

за температур T<sub>s</sub> = 400–620 K і парціальних тисків телуру P<sub>Te<sub>2</sub></sub> = 10<sup>-7</sup>–1,3·10<sup>-2</sup> Па на сколах (111) BaF<sub>2</sub> осаджується матеріал тільки n-типу провідності (рис. 3.1, а). При цьому виявлено, що плівки n-PbTe, одержані з наважок після п'ятигодинного випаровування, мають на поверхні вкраплення металу (рис. 3.2, а) [7]. Додаткове підживлення пари свинцем призводить до збільшення вільного металу на поверхні плівок (рис. 3.2, б). Зауважимо також, що за температур осадження T<sub>s</sub> > 660 K навіть значні пересичення пари телуром не призводять до зміни n-типу провідності плівок. На поверхні плівок n-PbTe при цьому з'являється вільна фаза чистого телуру (рис. 3.2, в) [7].

Аналогічна картина характерна й для процесу осадження плівок селеніду свинцю (рис. 3.1, б, 3.3). Слід зауважити, що плівки при зміні температури осадження, за умови мінімального тиску пари селену, можуть мати як n-, так і p-тип провідності (рис. 3.1, б), що пояснюється впливом залишкового кисню P<sub>O<sub>2</sub></sub> = 10<sup>-4</sup> Па (рис. 3.1). В області значень технологічних чинників, що відповідають осадженню плівок n-PbSe (рис. 3.1, б) у ряді випадків на їх поверхні спостерігаються вкраплення металу (рис. 3.3, а). Збільшення частки свинцю в наважці сприяє росту розмірів областей вільної фази свинцю на поверхні основної матриці (рис. 3.3, б). Вирощування плівок при значному пересиченні пари селену призводить до зменшення металічної фази, а також повного її зникнення на поверхні плівок. Це характерно при осадженні за умов, що відповідають термодинамічній n-r-інверсії (рис. 3.1, б). При цьому поверхня плівок має чітко виражену морфологічну структуру з границями росту зерен (рис. 3.3, в), і плівки характеризуються високою рухливістю носіїв струму (рис. 3.1, б)

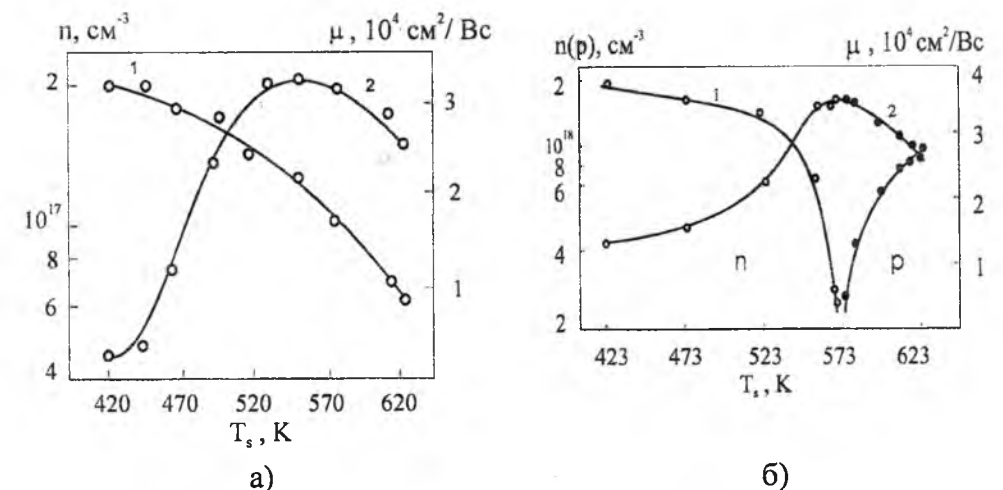


Рис. 3.1. Залежність концентрації n (1) і рухливості μ (2) носіїв струму від температури осадження T<sub>s</sub> (метод гарячої стінки; підкладка – сколи (111) BaF<sub>2</sub>; T<sub>e</sub> = 820 K; T<sub>w</sub> = 850 K: (а) – для плівок PbTe, P<sub>Te<sub>2</sub></sub> = 1,3·10<sup>-2</sup> Па, (б) – для плівок PbSe, P<sub>Se<sub>2</sub></sub> = 10<sup>-3</sup> Па [10]

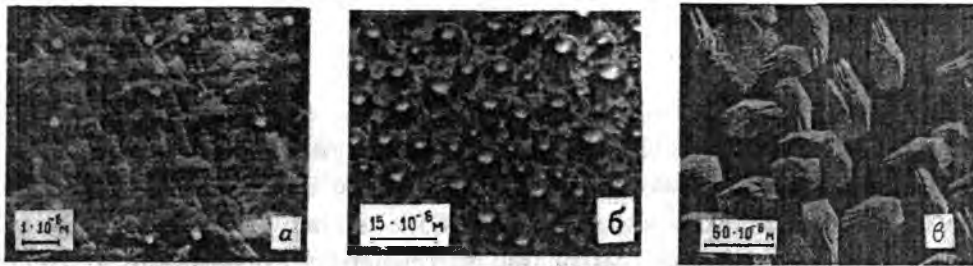


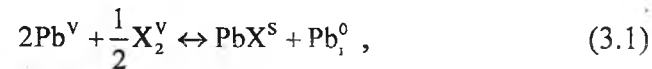
Рис. 3.2. Морфологія поверхні плівок PbTe, осаджених: а – з наважки стехіометричного складу; б – при пересиченні пари свинцем; в – при пересиченні пари телуrom [10]



Рис. 3.3. Морфологія поверхні плівок PbSe, осаджених: а – з наважки стехіометричного складу; б – при пересиченні пари свинцем; в – при пересиченні пари телуrom [10]

### 3.2. Квазіхімічний опис виділення металічної фази

Для опису фізико-хімічних процесів у плівці PbX (X = Te, Se) у процесі парофазної епітаксії використано квазіхімічний підхід [57]. Оскільки область можливого утворення фази металу просторово відділена від конденсату сполуки PbX<sup>S</sup>, то можна розглянути квазіхімічну реакцію для системи із зародком початкової флуктуаційної неоднорідності:



де один з атомів пари Pb осідає на підкладку з утворенням сполуки PbX<sup>S</sup> плівки, а другий – попадає в область локалізації майбутнього комплексу атомів Pb, або виділення цілої фази металу (у міжвузловину ґратки PbX<sup>S</sup>, на місце вакансії халькогену у вигляді антиструктурних дефектів, нещодавно виявлених у PbTe [65]; у мікропорожнину – агрегат вакансій Pb і X). За достатньо великої концентрації [Pb<sub>i</sub><sup>O</sup>] в локальній області ймовірно може стати незворотна реакція [49]



і концентрація вільних електронів у цій області

$$n = 4[\text{Pb}_i^{\text{O}}]. \quad (3.3)$$

Реакція (3.2) є характерною для утворення металічної фази за відповідної для металу концентрації [Pb<sub>i</sub><sup>O</sup>].

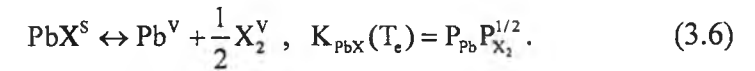
Константа рівноваги квазіхімічної реакції (3.1)

$$K_0(T_s) = [\text{Pb}_i^{\text{O}}] \cdot P_{\text{Pb}}^{-2} \cdot P_{\text{X}_2}^{-1/2}, \quad (3.4)$$

звідки

$$[\text{Pb}_i^{\text{O}}] = K_0(T_s) \cdot P_{\text{Pb}}^2 \cdot P_{\text{X}_2}^{1/2}, \quad (3.5)$$

де T<sub>s</sub> – температура осадження (підкладки), P<sub>Pb</sub> і P<sub>X<sub>2</sub></sub> – парціальні тиски пари свинцю і халькогену біля підкладки, зумовлені в квазірівноважних умовах випаровуванням наважки PbTe. Для реакції рівноваги “наважка-пара” при розкладанні твердого PbX у випаровувачі з температурою T<sub>e</sub> маємо:



Ураховуючи, що за розглянутих тисків пару можна вважати ідеальним газом, для квазірівноважного стану “пара-конденсат” маємо

$$\bar{K}_{\text{PbX}}(T_s) = K_{\text{PbX}}(T_e) \left( \frac{T_s}{T_e} \right)^{3/2}. \quad (3.7)$$

Парціальні тиски P<sub>Pb</sub> і P<sub>X<sub>2</sub></sub> в (3.5) (біля підкладки) визначаються сталою (3.7). При цьому

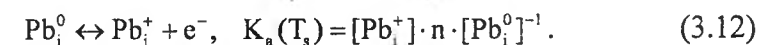
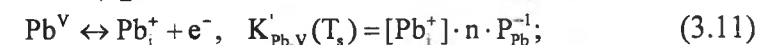
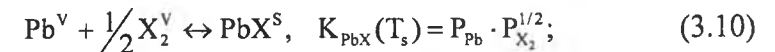
$$P_{\text{Pb}} = \bar{K}_{\text{PbX}}(T_s) P_{\text{X}_2}^{-1/2}. \quad (3.8)$$

З (3.8) і (3.5) одержимо, що

$$[\text{Pb}_i^{\text{O}}] = K_0(T_s) \bar{K}_{\text{PbX}}^2(T_s) P_{\text{X}_2}^{-1/2}, \quad (3.9)$$

тобто концентрація [Pb<sub>i</sub><sup>O</sup>] зростає за малих тисків халькогену P<sub>X<sub>2</sub></sub>.

Стан рівноваги “пара-конденсат” за температури T<sub>s</sub> описується квазіхімічними реакціями [18]:



Із (3.10)–(3.12) випливає, що

$$K'_{\text{Pb,V}} K_{\text{PbX}}^{-1} K_a^{-1} = [\text{Pb}_i^{\text{O}}] P_{\text{Pb}}^{-2} P_{\text{X}_2}^{-1/2} = K_0. \quad (3.13)$$

Отже, константу K<sub>0</sub> реакції (3.1) можна визначити через відомі квазіхімічні сталі [59; 60], значення яких для PbTe [59; 60] і PbSe [66–68] наведено в таблиці 2.1. З (3.9) і (3.13) маємо шукану концентрацію свинцю у вільній фазі

$$[\text{Pb}_i^{\text{O}}] = \bar{K}_{\text{PbX}}^2(T_s) K_{\text{PbX}}^{-1}(T_s) K'_{\text{Pb,V}}(T_s) K_a^{-1}(T_s) P_{\text{X}_2}^{-1/2}. \quad (3.14)$$

У разі виконання (3.2) і (3.3)

$$[\text{Pb}_i^{4+}] = [\text{Pb}_i^{\text{O}}] = \frac{1}{4} n. \quad (3.15)$$

Оцінимо концентрації іонів і вільних електронів виділеної фази для випадку плівок PbTe [56], вирощених на підкладці BaF<sub>2</sub>. За температури випаровування наважки T<sub>e</sub> = 833 K, температурі конденсації (підкладки) T<sub>s</sub> = 653 K і парціального тиску телуру P<sub>T<sub>e</sub></sub> = 2,9 · 10<sup>-3</sup> Па [18]

$$[\text{Pb}_i^{4+}] = 3,29 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}, \quad n = 1,32 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}, \quad (3.16)$$

що відповідає осадженню фази вільного свинцю [56]. За тих же температурних умов і тиску P<sub>T<sub>e</sub></sub> = 7,5 · 10<sup>-3</sup> Па [18] для плівок, вирощених на



підкладці NaCl [56], одержимо:

$$[\text{Pb}_i^{4+}] = 2,05 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}, n = 8,20 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}. \quad (3.17)$$

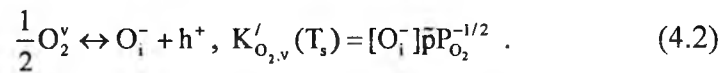
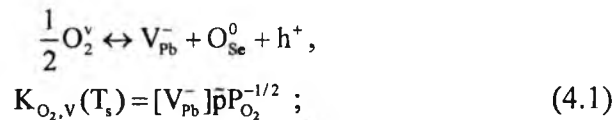
Для випадку плівок PbSe за тих же температур  $T_e$ ,  $T_s$  і тиску  $P_{\text{Se}_2} = 4,7 \cdot 10^{-2} \text{ Па}$  одержимо оціночні значення параметрів металічної фази свинцю:

$$[\text{Pb}_i^{4+}] = 3,30 \cdot 10^{22} \text{ см}^{-3}, n = 1,32 \cdot 10^{23} \text{ см}^{-3}. \quad (3.18)$$

#### 4. Вплив залишкового кисню на процеси дефектоутворення у плівках

Кисень відноситься до активних газів, який може суттєво впливати на механізми дефектоутворення як у процесі вирощування плівок, так і в ході експлуатації чи збереження. У літературі відомі численні публікації з питань вивчення взаємодії плівок із киснем [69–77]. Але на даний час достатньої ясності в цій проблемі не існує. Авторами [32; 78; 79] запропоновано моделі дефектів, які враховують як складний спектр власних, так і домішкових центрів з участю кисню.

При вирощуванні плівок у вакуумі  $10^{-3} - 10^{-2} \text{ Па}$ , як у нашому випадку, парціальний тиск залишкового атмосферного кисню складає  $\sim 10^{-4} \text{ Па}$ . Останній може суттєво впливати на стан дефектної та електронної підсистем плівок. Серед можливих основних механізмів такого впливу розглянемо квазіхімічні реакції, пов'язані з двома типами взаємодії кисню з матеріалом плівок. Для плівок селеніду свинцю будемо мати:



Тут (4.1) – реакція непрямого впливу, коли утворюються вакансії свинцю й носії струму (дірки) при заміщенні селену киснем. Реакція (4.2) пов'язана з прямою акцепторною дією кисню (легуванням плівки домішкою кисню), у момент входження в міжвузля іонів кисню  $\text{O}_i^-$ , радіус яких є меншим за розміри міжвузлового простору в PbSe. Механізм реакції (4.2), пов'язаний із дисоціацією молекули кисню, стимулюється впливом залишкових у технологічній камері водяних парів. У прийнятому наближенні будемо вважати, що зміна дефектної структури плівки PbSe пов'язана з додатковим утворенням вакансій  $V_{\text{Pb}}^-$  і міжвузловинних іонів  $\text{O}_i^-$  за механізмом реакцій (4.1) і (4.2), що призводить до встановлення нового рівноважного стану в електронній підсистемі (з концентрацією електронів  $\bar{n}$  і дірок  $\bar{p}$ ).

Унаслідок утворення додаткових дефектів концентрація дірок у плівці зростає на величину  $\Delta p = \bar{p} - p$ , а концентрація електронів зменшується на величину  $\Delta n = n - \bar{n} > 0$ , де  $\bar{p} = K_i / \bar{n}$ .

Тоді умова електронейтральності має простий вигляд:

$$[V_{\text{Pb}}^-] + [\text{O}_i^-] = \Delta n + \Delta p. \quad (4.3)$$

Концентрація носіїв струму, яку експериментально можна знайти за ефектом Холла, дорівнює

$$\bar{n}_H = \bar{n} - \bar{p} = n y - K_i (n y)^{-1}, \quad (4.4)$$

де

$$y \equiv \bar{n} / n, \quad (4.5)$$

$n$  – рівноважна концентрація електронів за відсутності кисню, визначена з рівнянь (2.33), (2.34) моделі зі складним спектром зарядових станів дефектів при  $X = \text{Se}$ .

Концентрації дефектів, зумовлених киснем, дорівнюють

$$[V_{\text{Pb}}^-] = K_{\text{O}_2, v} n y P_{\text{O}_2}^{1/2} / K_i, \quad (4.6)$$

$$[\text{O}_i^-] = K'_{\text{O}_2, v} n y P_{\text{O}_2}^{1/2} / K_i. \quad (4.7)$$

Величину  $y$  знаходимо з (4.3), враховуючи (4.5)–(4.7):

$$y = \left\{ n - K_i n^{-1} + \left[ (n - K_i n^{-1})^2 + 4(x + K_i) \right]^{1/2} \right\} / 2n (x K_i^{-1} + 1), \quad (4.8)$$

де

$$x = (K_{\text{O}_2, v} + K'_{\text{O}_2, v}) P_{\text{O}_2}^{1/2}. \quad (4.9)$$

З умови  $\bar{n} = \bar{p}$  можна знайти співвідношення, яке задовольняють шукані квазіхімічні сталі реакцій (4.1), (4.2):

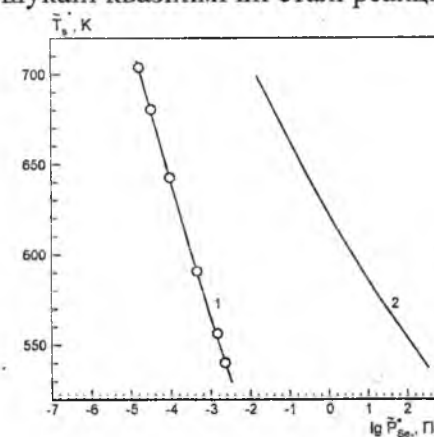


Рис. 4.1. Залежність температури  $\bar{T}_s^*$  термодинамічної п-р-інверсії від парціального тиску пари селену в плівках PbSe.  $T_e = 820 \text{ K}$ ,  $P_{\text{O}_2} = 10^{-4} \text{ Па}$ .  $\circ$  – експериментальні результати; 1 і 2 – розрахункові криві відповідно з урахуванням і без урахування кисню [22; 78]

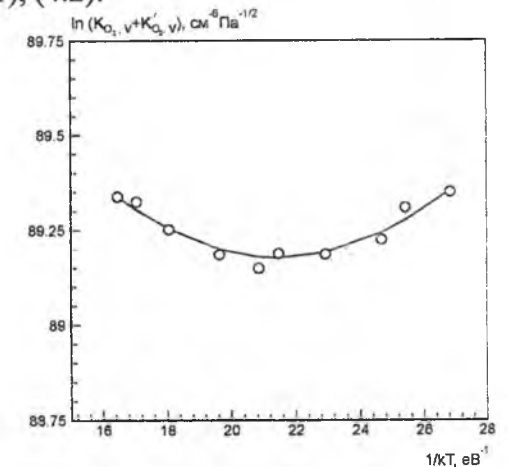


Рис. 4.2. Залежність логарифма суми квазіхімічних сталих  $K_{\text{O}_2, v}$  та  $K'_{\text{O}_2, v}$  від  $1/kT$ .  $\circ$  – експериментальні результати [22; 78]

$$K_{\text{O}_2, v}(\bar{T}_s^*) + K'_{\text{O}_2, v}(\bar{T}_s^*) = \left[ K_i(\bar{T}_s^*) / P_{\text{O}_2} \right]^{1/2} n_H(\bar{T}_s^*, \bar{P}_{\text{Se}_2}, T_e), \quad (4.10)$$

де  $\bar{T}_s^*$  і  $\bar{P}_{Se_2}^*$  – температура підкладки і парціальний тиск селену, для яких відбувається “киснева” n-p-інверсія за фіксованих значень тиску кисню  $P_{O_2}$  і температури випаровування наважки  $T_e$ ;  $n_H$  визначається теоретично з (2.33)–(2.35).

На рис. 4.1 наведено експериментальну залежність  $\bar{T}_s^*$  від  $\bar{P}_{Se_2}^*$  (за  $T_e = 820\text{K}$  і  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ ), на основі якої, а також формул (4.10), (2.33)–(2.35) можна відтворити дослідну температурну залежність суми  $K_{O_2,v} + K'_{O_2,v}$  (рис. 4.2). Апроксимуючи цю залежність гладкою кривою за методом найменших квадратів, знайдемо, що

$$K_{O_2,v}(T) + K'_{O_2,v}(T) = K_0 e^{\frac{\Delta H}{kT}} + K'_0 e^{\frac{\Delta H'}{kT}}, \quad (4.11)$$

де  $K_0 = 3,38 \cdot 10^{39} \text{см}^{-6} \text{Па}^{-1/2}$ ,  $\Delta H = 0,12 \text{eV}$ ,  $K'_0 = 2,63 \cdot 10^{37} \text{см}^{-6} \text{Па}^{-1/2}$ ,  $\Delta H' = -0,11 \text{eV}$ . Перший доданок у цій сумі з додатним значенням  $\Delta H$  природно розглядати як константу реакції (4.1), відповідальну за утворення вакансій  $V_{Pb}^-$ , а другий – із від’ємним значенням  $\Delta H'$  – як константу реакції (4.2) для міжвузловинних домішкових центрів  $O_i^-$ . Подібна інтерпретація для вакансій і міжвузловин є характерною для більшості квазіхімічних сталей халькогенідів свинцю [59]. Залежності концентрації дефектів  $[O_i^-]$  і  $[V_{Pb}^-]$ , індукованих киснем, від температури осадження  $T_s$  показані на рис. 4.3, звідки видно, що за  $T_s > 550\text{K}$  ( $P_{Se_2} = 10^{-2}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ ,  $T_e = 820\text{K}$ ) переважає механізм утворення вакансій  $V_{Pb}^-$ , а за більш низьких температур – механізм упровадження в плівку міжвузловинних іонів  $O_i^-$ . Теоретична крива для залежності холлівської концентрації  $\bar{n}_H$  від парціального тиску селену  $P_{Se_2}$  здебільшого добре узгоджується з експериментом (рис. 4.4), як і розрахункова крива  $\bar{T}_s^*(\bar{P}_{Se_2}^*)$  для температури і тиску n-p-переходу з урахуванням кисню (рис. 4.1 – крива 1). На рис. 4.5 показані теоретичні залежності  $\bar{n}_H$  від температури осадження при різних фіксованих значеннях парціальних тисків пари селену і кисню для випадку температури випаровування  $T_e = 820\text{K}$ . Акцепторна дія кисню зумовлює зміщення області n-p-інверсії на бік менших значень парціальних тисків селену  $P_{Se_2}$  (рис. 4.4 – крива 1). В області низьких значень тиску селену  $10^{-8}\text{Па} < P_{Se_2} < 10^{-5}\text{Па}$  переважаючий вплив на процеси дефектоутворення має кисень. На це, зокрема, вказує збіг результатів експерименту з теоретичними розрахунками (рис. 4.4 – крива 1). При значних тисках пари селену ( $P_{Se_2} > 10^{-4}\text{Па}$ ) вплив залишкового кисню на процеси дефектоутворення в плівках PbSe незначний. За цих умов переважаючий внесок у формуванні дефектної підсистеми дає надстехіометричний селен (рис. 4.4 – крива 2). Зауважимо, що механізм взаємодії кисню з тонкоплівковим матеріалом визначається і температурою осадження  $T_s$ . Встановлено,

що за  $T_s > 550\text{K}$  ( $P_{Se_2} = 10^{-2}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ ,  $T_e = 820\text{K}$ ) переважає механізм заміщення селену киснем й утворення вакансій свинцю згідно з квазіхімічним рівнянням (4.2). за нижчих значень температур осадження переважає механізм упровадження кисню в міжвузля (4.3).

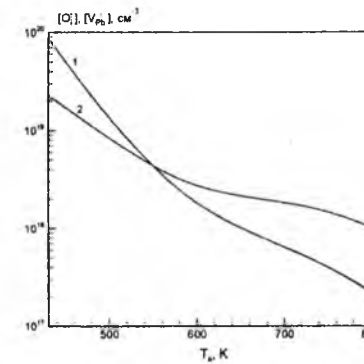


Рис. 4.3. Залежність концентрації дефектів  $[O_i^-]$ ,  $[V_{Pb}^-]$  від температури осадження при врахуванні наявності кисню у плівках PbSe.  $T_e = 820\text{K}$ ,  $P_{Se_2} = 10^{-2}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ . (1) і (2) – концентрації  $[O_i^-]$  та  $[V_{Pb}^-]$  відповідно [22]

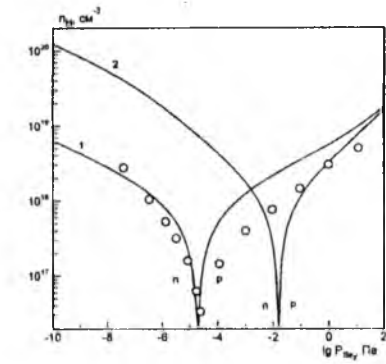


Рис. 4.4. Залежність концентрації  $n_H$  від тиску пари селену при врахуванні наявності кисню в плівках PbSe.  $T_e = 820\text{K}$ ,  $T_s = 700\text{K}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ .  $\circ$  – експериментальні результати; 1 і 2 – розрахункові криві відповідно з врахуванням і без врахування кисню [22]

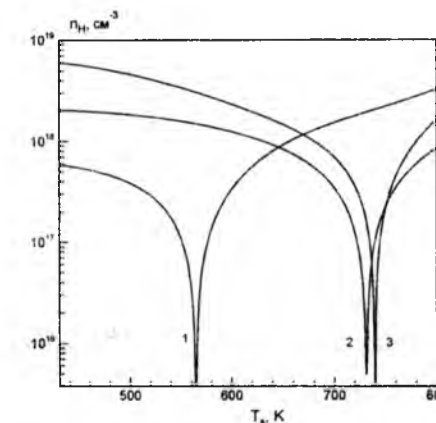


Рис. 4.5. Залежність концентрації  $n_H$  від температури осадження при врахуванні наявності кисню у плівках PbSe.  $T_e = 820\text{K}$

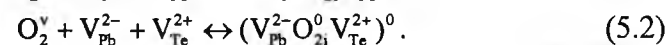
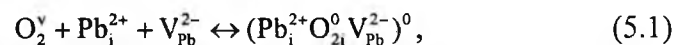
- (1) –  $P_{Se_2} = 10^{-3}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ .
- (2) –  $P_{Se_2} = 10^{-5}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-4}\text{Па}$ .
- (3) –  $P_{Se_2} = 10^{-3}\text{Па}$ ,  $P_{O_2} = 10^{-6}\text{Па}$  [22]

## 5. Комплекси власних дефектів з участю кисню у плівках

У праці [74] проведено детальне експериментальне дослідження кінетики поверхневої концентрації електронів у плівках PbTe за низьких тисків кисню і кімнатної температури. Плівки PbTe товщиною 50 нм

виросували у вакуумі  $2,7 \cdot 10^{-8}$  Па на слюдяних підкладках [74]. При швидкості росту більше за 0,1 нм/с плівки мали концентрацію носіїв, близьку до власної. Унаслідок зменшення швидкості росту нижче 0,1 нм/с отримували плівки n-типу провідності. Регулюючи швидкість росту, можна отримати плівки (з концентрацією електронів  $1 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ) для використання в дослідах з адсорбції кисню. Кіне-тику адсорбції визначали за зміною концентрації носіїв у плівках під час експозиції в кисні за кімнатної температури. За низьких тисків ( $10^{-7} - 10^{-2}$  Па) в систему напускали спеціально очищений кисень. Легувальний вплив кисню в цьому діапазоні тисків автори [74] описували за допомогою моделі “мобільних дефектів”, згідно з якою міжвузловинні атоми свинцю (донори) дифундують (за наявності кисню) з об’єму плівки до поверхні, де вони взаємодіють з атомами кисню. При цьому для випадку кімнатних температур припускалося достатньо велике значення коефіцієнта дифузії міжвузловинних атомів свинцю, яке суттєво перевищує дійсні значення коефіцієнта самодифузії свинцю в PbTe [1].

Розглянемо кінетику електронів з урахуванням складного спектра зарядових станів власних атомних дефектів у плівках PbTe і сучасних уявлень про комплексоутворення у напівпровідниках [80–82]. Переважаючі дефекти в плівці – двозарядні вакансії і міжвузловинні атоми свинцю ( $V_{Pb}^{2-}$ ,  $Pb_i^{2+}$ ); їх концентрації сягають  $\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$ . В аніонній підгратці важливу роль відіграють вакансії телуру  $V_{Te}^{2+}$  [80]. У процесі легування домішкою кисню в цих умовах досить імовірним є утворення й розпад комплексів власних атомних дефектів із киснем, що може призвести до виникнення процесів з аномально великим ефективним коефіцієнтом дифузії [83]. Для дослідження кінетики електронів і комплексів, які будемо вважати взаємопов’язаними, використовуємо метод квазіхімічних реакцій. Це дасть змогу описати експериментальні результати, не звертаючись до моделі “мобільних дефектів” із нереальним коефіцієнтом дифузії. Припустимо, що в разі взаємодії кисневого газу  $O_2$  з плівкою n-PbTe утворюються нейтральні комплекси переважаючих власних дефектів плівки з молекулою кисню  $O_{2i}^0$  у міжвузловині  $(Pb_i^{2+}O_{2i}^0V_{Pb}^{2-})^0$  і  $(V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+})^0$  – згідно з реакціями [84]:

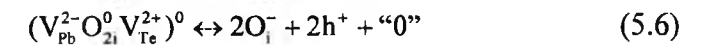
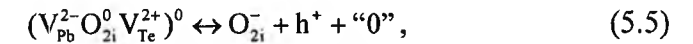
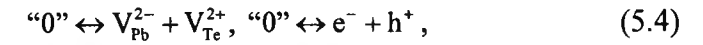


Відтак, при зіставленні результатів розрахунку кінетики електронів з експериментом, виявляється, що реакції (5.2) з утворенням кисневих комплексів, що містять дві вакансії (по одній від кожної підгратки), характерні для області найнижчих тисків кисню  $P_{O_2} \ll 10^{-4}$  Па, а за тисків  $10^{-4} \text{ Па} < P_{O_2} < 10^{-2} \text{ Па}$  домінують реакції (5.1) з утворенням комплексів, що містять пару Френкеля в катіонній підгратці.

Розглянемо спочатку випадок найнижчих тисків кисню, що відповідає реакції (5.2). Кінетика цієї реакції визначається рівнянням

$$\frac{d}{dt} [V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}] = k_1 P_{O_2} [V_{Pb}^{2-}][V_{Te}^{2+}] - [V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}] \tau_1^{-1}, \quad (5.3)$$

де  $k_1$  і  $\tau_1^{-1}$  – константи реакції. Врахуємо також квазіхімічні реакції, які відбуваються в самій плівці



і пов’язані з рекомбінацією вільних вакансій і носіїв струму (5.4), а також із процесами розпаду комплексів за двома каналами (5.5) і (5.6). Будемо вважати, що концентрації компонентів у (5.4)–(5.6) у кожний момент часу дорівнюють їх стаціонарним або навіть термодинамічно рівноважним значенням за даної температури:

$$[V_{Pb}^{2-}][V_{Te}^{2+}] = K_s; \quad (n_0 - \Delta n)(p_0 + \Delta p) = K_i; \quad (5.7)$$

$$\frac{[O_{2i}^-](p_0 + \Delta p)}{[V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}]} = K_v; \quad \frac{[O_i^-]^2(p_0 + \Delta p)^2}{[V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}]} = K'_v, \quad (5.8)$$

де  $K_i = n_0 p_0$ ;  $K_s$ ,  $K_v$  і  $K'_v$  – константи реакцій (5.4)–(5.6);  $n_0$  і  $p_0$  – значення концентрацій носіїв струму до взаємодії плівки з киснем. Унаслідок акцепторної дії (5.5), (5.6) кисневих комплексів концентрація електронів у плівці зменшується на величину  $\Delta n > 0$ , а концентрація дірок збільшується на  $\Delta p$ .

Ураховуючи умову електронейтральності, маємо:

$$[O_{2i}^-] + [O_i^-] = \Delta n + \Delta p. \quad (5.9)$$

Із (5.7) випливає, що

$$\Delta p = p_0 \Delta n / (n_0 - \Delta n). \quad (5.10)$$

Підставляючи з (5.8) значення  $[O_{2i}^-]$ ,  $[O_i^-]$  і (5.10) в (5.9), отримаємо:

$$\frac{\Delta n (n_0 + p_0 - \Delta n)}{(n_0 - \Delta n)^2} = \frac{K_v}{K_i} [V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}] + \frac{(K'_v)^{1/2}}{K_i} [V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}]^{1/2}, \quad (5.11)$$

звідки видно, що кінетика електронів  $\Delta n(t)$  визначається кінетикою комплексів. Покладаючи, що за  $t=0$  (початок експозиції плівки в кисні), концентрація комплексів  $[V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}]_{t=0} = 0$ , знаходимо:

$$[V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+}] = \bar{k}_1 P_{O_2} \tau_1 (1 - e^{-t/\tau_1}), \quad (5.12)$$

де  $\bar{k}_1 = k_1 K_s$ . Тоді з (5.11) і (5.12) випливає, що за тисків кисню  $P_{O_2} \ll 10^{-4}$  Па

$$\Delta n(t) = \frac{1}{2} [1 + f(t)]^{-1} \{ n_0 [1 + 2f(t)] + p_0 - [(n_0 + p_0)^2 + 4n_0 p_0 f(t)]^{1/2} \}, \quad (5.13)$$

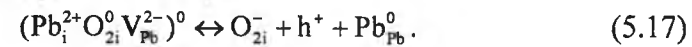
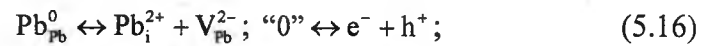
де

$$f(t) = A_v P_{O_2} \tau_1 (1 - e^{-t/\tau_1}) +$$

$$+ B_v (P_{O_2} \tau_1)^{1/2} (1 - e^{-t/\tau_1})^{1/2}, \quad (5.14)$$

$$A_v = K_i^{-1} K_v \bar{k}_1, \quad B_v = K_i^{-1} (K_v \bar{k}_1)^{1/2}. \quad (5.15)$$

За більших тисків кисню  $10^{-4} \text{ Па} < P_{O_2} < 10^{-2} \text{ Па}$ , коли утворюються комплекси з парою Френкеля в катіонній підгратці, достатньо врахувати, замість (5.4)–(5.6), такі квазіхімічні реакції в плівці:



Тоді для концентрацій учасників реакцій (5.16), (5.17) маємо:

$$[Pb_i^{2+}][V_{Pb}^{2-}] = K_F; \quad (n_0 - \Delta n)(p_0 + \Delta p) = K_i; \quad (5.18)$$

$$\frac{[O_{2i}^-](p_0 + \Delta p)}{[Pb_i^{2+} O_{2i}^0 V_{Pb}^{2-}]} = K; \quad [O_{2i}^-] = \Delta n + \Delta p; \quad (5.19)$$

$$\frac{d}{dt} [Pb_i^{2+} O_{2i}^0 V_{Pb}^{2-}] =$$

$$= k_2 P_{O_2} [Pb_i^{2+}][V_{Pb}^{2-}] - [Pb_i^{2+} O_{2i}^0 V_{Pb}^{2-}] \tau_2^{-1};$$

$$[Pb_i^{2+} O_{2i}^0 V_{Pb}^{2-}]|_{t=0} = 0,$$

де  $K_F$ ,  $K$ ,  $k_2$  і  $\tau_2^{-1}$  – константи реакцій. З (5.18)–(5.20) неважко отримати, що у вказаному діапазоні тисків кінетика електронів  $\Delta n(t)$  визначається також формулою (5.13) із заміною тільки  $f(t) \rightarrow g(t)$ , де

$$g(t) = A P_{O_2} \tau_2 (1 - e^{-t/\tau_2}), \quad A = K_i^{-1} K \bar{k}_2, \quad (5.21)$$

$$\bar{k}_2 = k_2 K_F.$$

На рис. 5.1 наведено експериментальні дані з кінетики зменшення поверхневої концентрації електронів  $\Delta N(t) = \Delta n(t) \cdot d$  при взаємодії плівок n-PbTe з киснем, які відносяться до зразків із вихідною концентрацією електронів  $n_0 = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  за температури  $T = 300 \text{ К}$ .

За тисків  $P_{O_2} \ll 10^{-4} \text{ Па}$ ,  $p_0 \ll n_0$ ,  $4p_0 f(t) \ll n_0$  формула (5.13) сильно спрощується:

$$\Delta N(t) = N_0 f(t) [1 + f(t)]^{-1}, \quad (5.22)$$

де  $N_0 = n_0 \cdot d = 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-2}$ . Для достатньо великих часів релаксації  $\tau_1 \gg t$  з (5.22) і (5.14) знаходимо:

$$\Delta N(t) \approx N_0 \cdot \frac{A_v P_{O_2} t + B_v P_{O_2}^{1/2} t^{1/2}}{1 + A_v P_{O_2} t + B_v P_{O_2}^{1/2} t^{1/2}}. \quad (5.23)$$

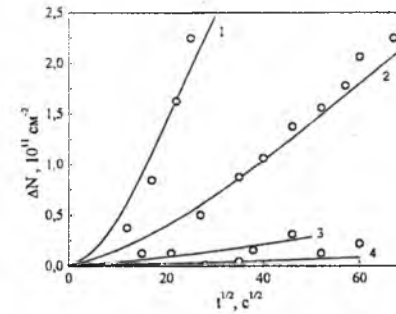


Рис. 5.1. Зменшення поверхневої концентрації електронів у плівці n-PbTe за різних тисків кисню: 1 –  $1,333 \cdot 10^{-4}$ , 2 –  $1,333 \cdot 10^{-5}$ , 3 –  $1,333 \cdot 10^{-6}$ , 4 –  $1,333 \cdot 10^{-7}$  Па; о – експериментальні результати, суцільні лінії – розрахункові криві. Вихідна концентрація електронів  $n_0 = 1,6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$  [84]

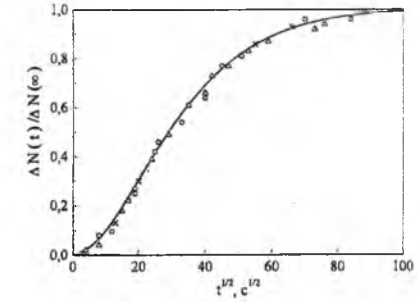


Рис. 5.2. Зменшення приведеної поверхневої концентрації електронів у плівках n-PbTe до рівня, що відповідає власній концентрації за тиску кисню  $1,333 \cdot 10^{-4}$  Па; концентрація електронів  $n_0$ : 1–4 –  $5 \cdot 10^{16}$ ;  $8 \cdot 10^{16}$ ;  $9 \cdot 10^{17}$ ;  $1,5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ ; Δ–1, □–2, ×–3, о–4. Суцільна лінія – розрахункова крива [84]

Розрахункові криві 2, 3 і 4 рис. 5.1 добре узгоджуються за різних тисків з експериментальними даними при значеннях кінетичних параметрів  $A_v = 4,432 \text{ Па}^{-1} \text{ с}^{-1}$ ,  $B_v = 0,386 \text{ Па}^{-1/2} \text{ с}^{-1/2}$ ,  $\tau_1 = 7 \cdot 10^4 \text{ с}$ .

У діапазоні тисків  $10^{-4} \text{ Па} < P_{O_2} < 10^{-2} \text{ Па}$  при  $p_0 \ll n_0$ ,  $4p_0 g(t) \ll n_0$  кінетика поверхневої концентрації електронів визначається формулою

$$\Delta N(t) = N_0 g(t) [1 + g(t)]^{-1} \quad (5.24)$$

з урахуванням (5.21). Крива 1 (рис. 5.1), що відповідає тиску кисню  $P_{O_2} = 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ , задовільно описує експериментальні результати при значеннях кінетичних параметрів  $A = 4,432 \text{ Па}^{-1} \text{ с}^{-1}$  і  $\tau_2 = 2408 \text{ с}$ . Зменшення концентрації електронів відбувається доти, поки вона не стає близькою до власної, незалежно від концентрації електронів у вихідних зразках (рис. 5.2,  $P_{O_2} = 1,333 \cdot 10^{-4} \text{ Па}$ ). Це також впливає з отриманих нами формул (5.24) і (5.21):

$$\frac{\Delta N(t)}{\Delta N(\infty)} = \frac{(1 + g_\infty)(1 - e^{-t/\tau_2})}{[1 + g_\infty(1 - e^{-t/\tau_2})]}, \quad (5.25)$$

де  $g_\infty = A P_{O_2} \tau_2$ . Завершується процес у розглянутій області низьких тисків кисню досягненням власної провідності в зразках у випадку збереження значень рухливості носіїв струму, що свідчить про електронейтральність утворених комплексів і відсутність помітної локалізації електронів і дірок на поверхні, обумовлюючих згин зон.

Отже, за великих концентрацій власних атомних дефектів  $V_{Pb}^{2-}$ ,  $V_{Te}^{2+}$ ,  $Pb_i^{2+}$  у плівках телуриду свинцю, що взаємодіють із кисневим газом, процеси утворення й розпаду нейтральних комплексів дефектів із молекулою кисню в міжвузловині можуть призвести до спостережуваної кі-

нетики концентрації електронів у n-PbTe за низьких тисків кисню.

## 6. Висновки

1. Запропоновано кристалохімічну й термодинамічну модель дефектоутворення за механізмом Френкеля в катіонній підгратці з одночасним урахуванням складного спектра зарядових станів власних точкових дефектів, внутрішніх механічних напружень плівки й роду підкладок у процесі вирощування методом гарячої стінки плівок халькогенідів свинцю.

2. Досліджено експериментально виділення фази вільного свинцю в процесі вирощування плівок халькогенідів свинцю з парової фази методом гарячої стінки. Показано, що утворення металічної фази пов'язано з дисоціацією сполук під час випаровування й накопичення міжвузловинних атомів свинцю в конденсаті. Для плівок PbTe і PbSe розраховано концентрацію іонів свинцю й електронів у виділеній фазі, які відповідають металічному характеру фази.

3. Встановлено, що для пояснення отриманих баричних і температурних залежностей концентрації носіїв струму та інверсії типу провідності у плівках PbSe, вирощених методом гарячої стінки з парової фази із залишковим киснем, необхідно враховувати як складний спектр зарядових станів, так і вплив кисню з утворенням вакансій свинцю  $V_{Pb}^-$  і домішкових акцепторних центрів  $O_i^-$ .

4. Показано, що за температури осадження  $T_s > 550$  K, парціальних тисків селену  $P_{Se_2} = 10^{-2}$  Па і кисню  $P_{O_2} = 10^{-4}$  Па та температури випаровування  $T_e = 820$  K переважає механізм заміщення селену киснем і утворення вакансій свинцю згідно із квазіхімічною реакцією  $\frac{1}{2}O_2^v \leftrightarrow V_{Pb}^- + O_{Se}^0 + h^+$ . За більш низьких температур осадження переважає механізм  $\frac{1}{2}O_2^v \leftrightarrow O_i^- + h^+$ , який стимулюється залишками водяних парів у технологічній камері. Знайдено константи рівноваги й ентальпії реакцій для обох механізмів взаємодії кисню з тонкоплівковим матеріалом PbSe.

5. На основі уявлень про утворення й розпад у плівках PbTe нейтральних комплексів власних дефектів і легувальної домішки кисню  $(V_{Pb}^{2-}O_{2i}^0V_{Te}^{2+})^0$  і  $(Pb_i^{2+}O_{2i}^0V_{Pb}^{2-})^0$  отримано пояснення кінетики поверхневої концентрації електронів у плівках n-PbTe, спостережуваної за низьких тисків кисню ( $10^{-7}$ – $10^{-2}$  Па) і кімнатної температури. З порівняння теоретичних і експериментальних результатів визначено кінетичні параметри двох різних типів комплексів.

Автор висловлює вдячність професорам Д. М. Фреїку та М. А. Рувінському за надані консультації.

1. Равич Ю. И. Методы исследования полупроводников в применении к халькогенидам свинца PbTe, PbSe, PbS / Ю. И. Равич, В. А. Ефимова, В. А. Смирнова. – М. : Наука, 1968. – 384 с.
2. Абрикосов Н. Х. Полупроводниковые материалы на основе соединений AIV BVI / Н. Х. Абрикосов, Л. Е. Шелимова. – М. : Наука, 1975. – 196 с.
3. Берченко Н. Н. Методы получения p-n переходов и барьеров Шоттки в халькогенидах свинца и твердых растворов на их основе / Н. Н. Берченко, К. И. Гейман, А. В. Матвеев // Зарубежная электронная техника. – 1977. – № 14. – С. 3–70.
4. Сизов Р. Р. Твердые растворы халькогенидов свинца и олова и фотоприемники на их основе / Р. Р. Сизов // Зарубежная электронная техника. – 1977. – № 2. – С. 31–38.
5. Шперун В. М. Термоэлектрика телуриду свинцю та його аналогів / В. М. Шперун, Д. М. Фреїк, Р. І. Запужляк. – Івано-Франківськ : Плай, 2000. – 250 с.
6. Zemel J. N. Recent developments in epitaxial IV–VI films / J. N. Zemel // J. Luminescence, 7. – 1973. – P. 524–541.
7. Lopez-Otero A. High mobility of as-grown PbTe films prepared by the hot-wall technique / A. Lopez-Otero, L. D. Haas // Thin Solid Films. – № 23 (1). – P. 1–6.
8. Фреїк Д. М. Получение пленок соединений AIVBVI / Д. М. Фреїк // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 5. – С. 7–17.
9. Фреїк Д. М. Получение пленок соединений с заданными параметрами методами квазизамкнутого объема / Д. М. Фреїк // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1982. – № 8 (8). – С. 1237–1248.
10. Фреїк Д. М. Физика и технология полупроводниковых пленок / Д. М. Фреїк, М. А. Галушак, Л. И. Межиловская. – Л. : Вища школа, 1988. – 152 с.
11. Палатник Л. С. Тонкие пленки полупроводниковых соединений / Л. С. Палатник, В. К. Сорокин // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1969. – № 5 (5). – С. 822–852.
12. Палатник Л. С. Механизм образования и структура конденсированных пленок / Л. С. Палатник, М. Я. Фукс, В. М. Косевич. – М. : Наука, 1972. – 320 с.
13. Палатник Л. С. Основы пленочного полупроводникового материаловедения. Энергия / Л. С. Палатник, В. К. Сорокин. – М. : [б. и.], 1973. – 295 с.
14. Семилетов С. А. Получение, структура и свойства монокристаллических пленок PbTe / С. А. Семилетов, И. П. Воронина // ДАН СССР. – 1963. – № 152 (6). – С. 1350–1355.
15. Holloway H. Thin Films IV–VI semiconductor photodiodes / H. Holloway // Physics thin films. – New York, 1980. – 11. – P. 105–203.

16. О механизме образования и зарядовых состояниях собственных атомных дефектов в пленках теллурида свинца / М. А. Рувинский, Д. М. Фрейк, Б. М. Рувинский, В. В. Прокопів // Письма в ЖТФ. – 2000. – № 26 (15). – С. 6–11.
17. Нові підходи в поясненні механізмів дефектоутворення у кристалах і плівках халькогенідів свинцю / Д. М. Фреїк, М. А. Рувінський, В. В. Прокопів [та ін.] // Фізичний збірник НТШ. – Львів : [б. в.], 2001. – № 4. – С. 135–141.
18. Влияние внутренних напряжений на дефектообразование в пленках теллурида свинца при парофазной эпитаксии / Д. М. Фрейк, Б. М. Рувинский, М. А. Рувинский [та ін.] // Журн. физ. химии. – 2002. – № 76 (2). – С. 362–368.
19. Фреїк А. Д. Атомні дефекти і фізико-хімічні процеси у тонких плівках селеніду свинцю при вирощуванні із парової фази / А. Д. Фреїк, М. А. Рувінський // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – № 3 (4). – С. 675–681.
20. Атомні дефекти у плівках сульфиду свинцю при парофазній епітаксії / Д. М. Фреїк, Б. М. Рувінський, М. А. Рувінський [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – № 4 (1). – С. 43–47.
21. Влияние этапов испарения навески на свойства плёнок соединений АІVВVI / Д. М. Фрейк, Я. В. Солоничний, Н. Т. Масляк, М. А. Галушак // Физика и химия обработки материалов. – 1979. – № 7. – С. 159–161.
22. Дефектна підсистема плівок PbSe при парофазній епітаксії з участю кисню / Д. М. Фреїк, Б. М. Рувінський, О. Я. Довгий, М. О. Галушак // Український фізичний журнал. – 2002. – № 47 (8). – С. 760–772.
23. Thermoelectric properties of solid solutions based on tin telluride / D. M. Freik, M. O. Galushchak, I. M. Ivanyshyn [and others] // Semiconductor Physics. Quantum Electronics. Optoelectronics. – 2000. – № 3 (3). – P. 287–290.
24. Thermoelectric properties and defective subsystem in doped telluride of tin / M. O. Galushchak, D. M. Freik, I. M. Ivanyshyn [and others] // Journal of Thermoelectricity. – 2000. – № 1. – P. 42–50.
25. Особливості реалізації складної дефектної підсистеми у монохалькогенідах свинцю / Д. М. Фреїк, М. О. Галушак, Л. Р. Павлюк [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2000. – № 1 (2). – С. 307–317.
26. Кристалохімія власних атомних дефектів і термодинамічний n-p-перехід у кристалах PbSe / Д. М. Фреїк, В. В. Прокопів, М. О. Галушак [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2000. – № 1 (1). – С. 83–87.
27. Кристалоквазіхімія дефектів у халькогенідах свинцю / С. С. Лісняк, Д. М. Фреїк, М. О. Галушак [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2000. – № 1 (1). – С. 131–134.

28. Фрейк Д. М. Термоэлектрические свойства и кристаллоквазіхімія дефектної підсистеми в сплавах на основі теллуридів олова / Д. М. Фрейк, И. М. Иванишин, М. А. Галушак // Термоелектрика. – 2001. – № 2. – С. 61–67.
29. Процеси окислення плівок телуриду олова в атмосфері кисню / М. О. Галушак, Л. Й. Межиловська, М. В. Пиц [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – № 2 (2). – С. 213–215.
30. Кристалохімія дефектів у легованих талієм плівках PbS / М. О. Галушак, Л. Р. Павлюк, А. Д. Фреїк [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – № 2 (4). – С. 631–639.
31. Дефектна підсистема селеніду свинцю, легованого талієм / М. О. Галушак, А. Д. Фреїк, Л. Р. Павлюк [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – № 2 (3). – С. 421–424.
32. Дефектна підсистема плівок PbSe при парофазній епітаксії з участю кисню / Д. М. Фреїк, Б. М. Рувінський, О. Я. Довгий, М. О. Галушак // Український фізичний журнал. – 2002. – № 47 (8). – С. 760–772.
33. Ефективні і локальні значення електричних параметрів у полікристалічних плівках телуриду свинцю / Д. М. Фреїк, Я. П. Салій, О. Я. Довгий [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – № 2 (4). – С. 711–718.
34. Freik D. M. Crystallochemistry of defects in lead telluride Films / D. M. Freik, M. A. Ruvinskii, M. O. Galushchak // Semiconductor Physics. Quantum Electronics and Optoelectronics. – 2002. – № 4 (1). – P. 5–8.
35. Утворення металічної фази при синтезі плівок халькогенідів свинцю квазірівноважними методами / Б. М. Рувінський, Д. М. Фреїк, М. А. Рувінський, М. О. Галушак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – № 2 (1). – С. 153–159.
36. Вплив випаровування у вакуумі на приповерхневий шар плівок халькогенідів свинцю / Б. М. Рувінський, Д. М. Фреїк, М. А. Рувінський, М. О. Галушак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – № 2 (2). – С. 241–246.
37. Квазіхімія дефектів у телуриді свинцю, легованих талієм / М. О. Галушак, Л. Р. Павлюк, В. М. Бойчук [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – № 3 (1). – С. 131–139.
38. Фреїк Д. М. Атомні дефекти і явище самокомпенсації у кристалічному PbTe<Te>:In / Д. М. Фреїк, Л. Р. Павлюк, М. О. Галушак // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – № 3 (3). – С. 429–437.
39. Атомні дефекти і електричні властивості епітаксійних плівок PbTe<Te>:In / Д. М. Фреїк, Л. Р. Павлюк, М. О. Галушак [та ін.] // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – №3(2). – С. 31–40.
40. Вакуумний відпал і напрямлені неоднорідності електричних параметрів плівок n- і p-PbTe / Д. М. Фреїк, О. Я. Довгий, М. О. Галушак [та ін.] // Оптоелектроника и полупроводниковая техника. – 2002. – № 37. – С. 99–105.

41. Кристалохімія і термодинаміка дефектів у сполуках  $A^{IV}B^{VI}$  / Д. М. Фреїк, В. В. Прокопів, М. О. Галушак [та ін.]. – Івано-Франківськ : Плай, 1999. – 164 с.
42. Фреїк А. Д. Атомні дефекти і фізико-хімічні процеси у тонких плівках халькогенідів свинцю (огляд) / А. Д. Фреїк // Фізика і хімія твердого тіла. – 202. – № 4 (2). – С. 191–212.
43. Плёночные термоэлементы : физика и применение / под. ред. Лидоренка Н. С. – М. : Наука, 1985. – 232 с.
44. Земел Дж. Н. / Под ред. Грина М. Эпитаксиальные пленки халькогенидов свинца и родственных соединений / Дж. Н. Земел ; под ред. М. Грина // Поверхностные свойства твердых тел. – М. : Мир, 1972. – С. 317–428.
45. Механические напряжения в гетероэпитаксиальных пленках  $A_4B_6$  / Ю. В. Кочетков, В. М. Никифоров, О. Н. Васильева, А. М. Гаськов // Вестник Моск. ун-та. Сер. 3. Физика. Астрономия. – 1994. – № 35 (2). – С. 68–74.
46. Френзель Я. И. Введение в теорию металлов / Я. И. Френзель. – М. : ГИФМЛ, 1958. – 368 с.
47. Лейбфрид Г. Микроскопическая теория механических и тепловых свойств кристаллов / Г. Лейбфрид. – М.-Л. : ГИФМЛ, 1963. – 312 с.
48. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / А. И. Ансельм. – М. : Наука, 1968. – 419 с.
49. Ашкрофт Н. Физика твердого тела / Н. Ашкрофт, Н. Мерин. – М. : Мир, 1979. – Т. 2. – 424 с.
50. Борн М. Динамическая теория кристаллических решеток / М. Борн, Х. Кунь. – М. : ИЛ, 1958. – 488 с.
51. Акустические кристаллы / А. А. Блистанов, В. С. Бондаренко, Н. В. Переломова и др. ; под ред. М. П. Шаскольской. – М. : Наука, 1982. – 632 с.
52. Физическая энциклопедия / гл. ред. А. М. Прохоров. – М. : Советская энциклопедия, 1990. – Т. 2. – 704 с.
53. Таблицы физических величин : справочник / под ред. И. К. Кикоина. – М. : Атомиздат, 1976. – 1007 с.
54. Стоунхэм А. М. Теория дефектов в твердых телах : электронная структура дефектов в диэлектриках и полупроводниках / А. М. Стоунхэм. – М. : Мир, 1978. – Т. 1. – 571 с.
55. Черчиньяни К. Теория и приложения уравнения Больцмана / К. Черчиньяни. – М. : Мир, 1978. – 496 с.
56. Lopez-Otero A. The use of a phase diagram as a guide for the growth of PbTe films / A. Lopez-Otero // Appl. Phys. Lett. – 1975. – № 26 (8). – P. 470–472.
57. Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов / Ф. Крегер. – М. : Мир, 1969. – 654 с.
58. Мосс Т. Полупроводниковая оптоэлектроника / Т. Мосс, Г. Баррел, Б. Эллис. – М. : Мир, 1976. – 432 с.
59. Зломанов В. П. Р-Т-х-диаграммы состояния системы металл-халькогены / В. П. Зломанов, А. В. Новоселова. – М. : Наука, 1987. – 208 с.
60. Гаськов А.М. Область гомогенности теллурида свинца / А. М. Гаськов, В. П. Зломанов, А. В. Новоселова // Изв. АН СССР. Неорган. материалы. – 1987. – № 15 (8). – С. 1476–1478.
61. Винецкий В.Л. Статистическое взаимодействие электронов и дефектов в полупроводниках / В. Л. Винецкий, Г. А. Холодарь. – К. : Наук. думка, 1969. – 188 с.
62. Пайерлс Р. Сюрпризы в теоретической физике / Р. Пайерлс. – М. : Наука, 1988. – 176 с.
63. Кривоглаз М.А. О возможности существования равновесной дисперсной фазы, содержащей металлические частицы / М. А. Кривоглаз, А. И. Карасевский // ЖЭТ. – 1972. – № 63 (2). – С. 670–683.
64. Кривоглаз М. А. Диффузное рассеяние рентгеновских лучей и нейтронов на флуктуационных неоднородностях в неидеальных кристаллах / М. А. Кривоглаз. – К. : Наук. думка, 1984. – 288 с.
65. Антиструктурные дефекты в полупроводниках типа PbTe / В. Ф. Мастеров, С. И. Бондаревский, Ф. С. Насрединов [и др.] // ФТП. – 1999. – № 33 (7). – С. 772–773.
66. Зломанов В. П. Физико-химическое исследование селенида свинца / В. П. Зломанов, О. В. Матвеев, А. В. Новоселова // Вестник Моск. ун-та. Химия. – 1967. – № 5. – С. 81–89.
67. Зломанов В. П. Определение констант равновесия дефектов в селенида свинца / В. П. Зломанов, О. В. Матвеев, А. В. Новоселова // Вест. Моск. ун-та. – 1967. – № 6. – С. 67–71.
68. Прокопів В. В. Уточнення констант рівноваги квазіхімічних реакцій утворення власних атомних дефектів в селеніді свинцю / В. В. Прокопів // Укр. хім. журн. – 2001. – № 67 (6). – С. 81–83.
69. Egerton P. F. The effect of oxygen on epitaxial PbTe, PbSe and PbS films / P. F. Egerton, C. Juhasz // Thin Solid Films. – 1969. – № 4 (4). – P. 239–253.
70. Mclashan S. R. L. Modification to PbTe and their interactions with oxygen produced by localized electron irradiation / S. R. L. Mclashan, R. M. King, E. H. C. Parker // Proc. of Sixth annual Conference on the Physics of Compound Semiconductor Interfaces. Pacific Grove. Calif. 30 Jan. – 1 Febr. – 1979. – № 16 (5). – P. 1174–1177.
71. Mclane G. Surface interaction of H and O<sub>2</sub> on thin PbTe epitaxial films / G. Mclane, J. N. Zemel // Thin Solid Films. – 1971. – № 7 (3–4). – P. 229–246.
72. Бойков Ю. А. Влияние адсорбированного кислорода на электрофизические свойства пленок PbTe / Ю. А. Бойков, В. А. Кутасов // ФТП. – 1983. – № 25 (4). – С. 1248–1251.
73. Влияние кислорода на барьерные эффекты в блочных монокристаллических пленках p-PbTe / В. В. Горбачев, З. М. Дашевский, Т. М. Ерусалименная [и др.] // ФТП. – 1984. – № 18 (6). – С. 1118–1120.
74. Parker E. H. The kinetics and electrical effects of oxygen sorption on uncontaminated PbTe thin films / E. H. Parker, D. Williams // Thin Solid Films. – 1976. – № 35 (3). – P. 373–395.

75. Оже-электронный микроанализ окисленного поликристаллического слоя сульфида свинца / А. М. Гаськов, А. А. Гольденвейзер, И. А. Соколов [и др.] // ДАН СССР. – 1983. – № 26 (3). – С. 607–609.
76. Левченко В. И. Некоторые особенности абсорбции кислорода пленками сульфида свинца / В. И. Левченко, Л. И. Постнова, В. В. Дикарева // ФТП. – 1994. – № 28 (5). – С. 861–866.
77. Joung J. J. Kinetics of the hydrogen effect on PbSe epitaxial films / J. J. Joung, J. N. Zemel // Thin Solid Films. – 1976. – № 31(1). – P. 25–37.
78. Рувінський Б. М. Рівноважні концентрації носіїв струму і дефектів у плівках PbSe при вирощуванні з парової фази і окисненні / Б. М. Рувінський // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – № 2 (4). – С. 565–577.
79. Рувинский Б. М. Влияние технологических факторов на дефектную подсистему пленок PbSe при парофазной эпитаксии с участием кислорода / Б. М. Рувинский, Д. М. Фреик, М. А. Рувинский // Сб. докладов Международного симпозиума “Тонкие пленки в оптике и электронике”. – Х. : Контраст, 2002. – С. 125–129.
80. Lead Chalcogenides: Physics and Applications (Optoelectronic Properties of Semiconductors and Superlattices) ed. by D. Khokhlov. – Taylor & Francis, 2002. – 720 p.
81. Булярский С. В. Термодинамика комплексообразования и кластеризации дефектов в полупроводниках / С. В. Булярский, В. В. Светухин, П. Е. Львов // ФТП. – 2000. – № 34 (4). – С. 385–388.
82. Бабич В.М. Кислород в монокристаллах кремния / В. М. Бабич, Н. Н. Блецкан, Е. Ф. Венгер. – К. : Интерпрес ЛТД, 1997. – 240 с.
83. Фистуль В. И. Новые материалы. Состояние, проблемы, перспективы / В. И. Фистуль. – М. : МИСИС, 1995. – 141 с.
84. Рувінський Б. М. Вплив технологічних факторів на дефектну підсистему і електронні процеси у плівках халькогенідів свинцю PbTe, PbSe і PbS / Б. М. Рувінський // Дис. на здобуття наукового ступеня канд. ф.-м. наук. – Івано-Франківськ : [б. в.], 2002. – 138 с.

#### MECHANISMS OF DEFECTMAKING IN SEMICONDUCTOR TAPES OF HALCOGEN LEAD AND TIN

**M.O. Galushchak,**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,*

*15, Carpat'ska street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine,*

*e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*Influence of inlying mechanical tensions, and also remaining oxygen on processes of defect formation in films of lead chalcogenides, grown on different substrates is considered. It is cleared up mechanism of formation of metallic phase in case of films growing from the vapour phase. A kinetics of surface concentration of electrons taking into account the complex formation of own defects with oxygen is considered.*

**Key words:** *thin tapes, halogen lead, atomic defects, semiconductor.*

УДК 538.975 539.26, 669-17

#### ПРОЦЕСИ СТАРІННЯ ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ МОНОКРИСТАЛІВ ГТГ, МОДИФІКОВАНИХ ІМПЛАНТАЦІЄЮ ІОНІВ HE<sup>+</sup>

**Б.К. Остафійчук, В.Д. Федорів, І.П. Яремій, С.І. Яремій**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76000, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57*

*На основі аналізу результатів рентгеноструктурних досліджень вивчалися зміни кристалічної структури, які відбулися через три роки після імплантації іонів He<sup>+</sup> в приповерхневі шари монокристалів ГТГ. Представлено розраховані з експериментальних КДВ профілі відносної деформації. На основі змін у часі їх параметрів запропоновано пояснення механізмів утворення та релаксації дефектів із погляду сучасних уявлень про перебіг даних процесів.*

**Ключові слова:** *монокристал, іонна імплантація, динамічна теорія, профілі деформації, аморфізація, відносна деформація.*

Розробка довговічних і надійних приладів, виготовлених на основі модифікованих іонною імплантацією епітаксійних гетероструктур, має важливе значення для радіоелектроніки. Зміна з часом фізичних властивостей характерна для всіх матеріалів, у тому числі й таких радіаційно стійких, як ферит-гранати, а перебудова та міграція дефектів кристалічної ґратки в процесі експлуатації – основні чинники, що призводять до змін експлуатаційних характеристик пристроїв з імплантованими епітаксійними ферит-гранатовими плівками. Це спонукає до вивчення часової стабільності структурних параметрів модифікованого шару, встановлення закономірностей перебудови його кристалічної структури в процесі старіння за кімнатних температур та прогнозування їх поведінки в процесі експлуатації.

В епітаксійних плівках ферит-гранатів завжди існують ростові механічні напруги, які сприяють релаксаційним процесам як у самій плівці, так і в модифікованих іонною імплантацією приповерхневих шарах. Для виключення впливу вказаних вище ростових напруг на релаксаційні процеси в іонно-імплантованому шарі як модельний об'єкт для дослідження було вибрано пластини монокристала гадоліній-галієвого гранату (ГТГ, Gd<sub>3</sub>Ga<sub>5</sub>O<sub>12</sub>), які після опромінення іонами He<sup>+</sup> зберігалися за кімнатної температури протягом трьох років.

Монокристалічні пластинки ГТГ товщиною 0,51 мм було отримано зі зливка, вирощеного методом Чохральського з площиною зрізу (111). Післяростова обробка включала механічне шліфування, механічне, хіміко-механічне та хімічне полірування; поверхня відповідала 14 класу шорсткості. Вирощування проводилося на спеціальному обладнанні НВП



“Карат” (м. Львів) у п’ятизонній печі для рідинно-фазової епітаксії Garnet-3.

Імплантація монокристалів ГГГ проводилася іонами  $He^+$  з енергією  $E = 100$  кеВ у межах доз  $1 \cdot 10^{15}$ – $1 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$  у режимі, що виключає каналування та самовідпал.

Аналіз зміни кристалічної структури іонно-імплантованого шару ГГГ у процесі старіння (відразу після іонної імплантації та через 3 роки) проводився на двокристалльному рентгенівському дифрактометрі ДРОН-2.0 в бездисперсійній схемі з використанням  $Cu_{K\alpha 1}$  випромінювання. Як монохроматор використовувався досконалий монокристал ГГГ із площиною зрізу (111).

Для визначення структурних параметрів іонно-імплантованого шару за експериментальними КДВ проводилося моделювання поширення рентгенівських променів у шаруватій структурі, з використанням засобів динамічної теорії розсіювання рентгенівських променів у формі рівнянь Такагі [1].

Ураховуючи те, що при низьких дозах іонної імплантації легкими іонами профілі відносної деформації пропорційні відповідним профілям радіаційних дефектів [2], їх вигляд задавали сумою двох складових: профілем, зумовленим дефектами, що утворюються за рахунок ядерних втрат, та профілем дефектів, які утворюються за рахунок електронних енергетичних утрат [3]:

$$D(h) = \begin{cases} D_{\max}^Y \exp[-(h-R_p^Y)^2 / \sigma_1^{Y2}], & \text{якщо } h < R_p^Y \\ D_{\max}^E \exp[-(h-R_p^E)^2 / \sigma_2^{E2}], & \text{якщо } h \geq R_p^Y \end{cases} + D_{\max}^E \exp[-(h-R_p^E)^2 / \sigma_2^{E2}],$$

де  $D(h) = \frac{\Delta d}{d}(h)$ ,  $h$  – відстань, яка відраховується від поверхні в глибину кристала,  $R_p^Y$  – точка зшивання асиметричної гаусіани,  $\sigma_1^Y$ ,  $\sigma_2^Y$  і  $\sigma^E$  – параметри гаусіан, які характеризують їх ширину на піввисоті. Верхні індекси  $Y$  і  $E$  означають, що вказані параметри характеризують складові профілю, пов’язані з ядерними та електронними енергетичними втратами відповідно.

Розраховані профілі відносної деформації представлені на рис. 1.

Насамперед, розглянемо поведінку “глибинних” параметрів профілів відносної деформації. Як видно з рис. 1 та 2, відразу після імплантації положення максимуму деформації приповерхневого порушеного шару (характеризується параметром  $R_p^Y$ ) практично не залежить від дози імплантованих іонів  $He^+$  і збігається з одержаним шляхом моделювання за допомогою програми SRIM-2003 положенням максимуму дефектів.

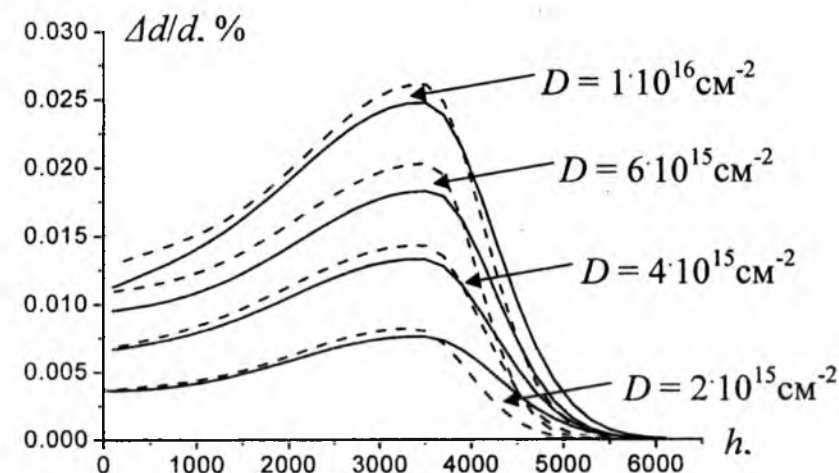


Рис. 1. Профілі відносної деформації приповерхневих шарів монокристалів ГГГ, імплантованих іонами  $He^+$  ( $E = 100$  кеВ) з дозами  $1 \cdot 10^{15}$  –  $1 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$ : (—) – відразу після імплантації, (- - -) – через три роки

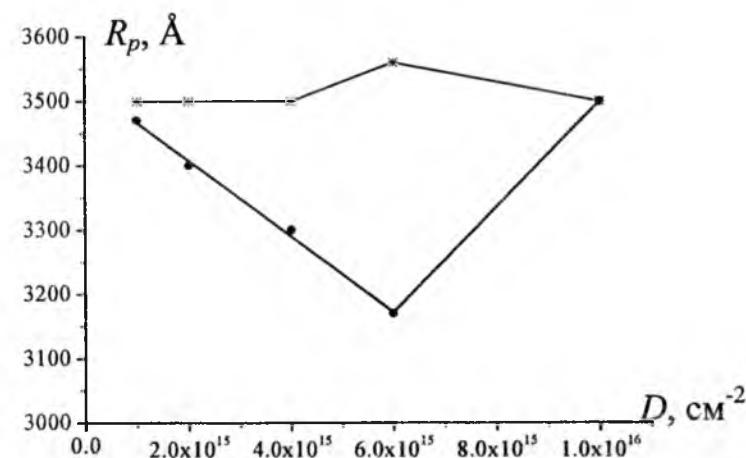


Рис. 2. Зміна глибини знаходження максимально деформованого шару ГГГ від величини дози імплантованих іонів  $He^+$  ( $E = 100$  кеВ): \* – відразу після імплантації; ● – через три роки

У процесі старіння положення максимуму деформації зміщується до поверхні монокристала (рис. 2), причому в інтервалі доз  $1 \cdot 10^{15}$  –  $6 \cdot 10^{15}$   $см^{-2}$  ця зміна має лінійний характер, а зі збільшенням дози від  $6 \cdot 10^{15}$  до  $1 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$  швидкість зміни глибини залягання максимально деформованого шару практично не змінюється. Товщина порушеного приповерхневого шару в інтервалі доз  $1 \cdot 10^{15}$  –  $6 \cdot 10^{15}$   $см^{-2}$  за три роки зменшилася на  $\sim 12$  %, а для дози  $1 \cdot 10^{16}$   $см^{-2}$  – на  $\sim 6,6$  % (рис. 3). Розглянуте зменшення глибини залягання максимально деформованого шару та товщини порушеного приповерхневого шару можна пояснити перебудовою та дифундуванням радіаційних дефектів до поверхні зразка

під дією стимулюючого впливу з боку механічних напруг, що виникли внаслідок іонного опромінення.

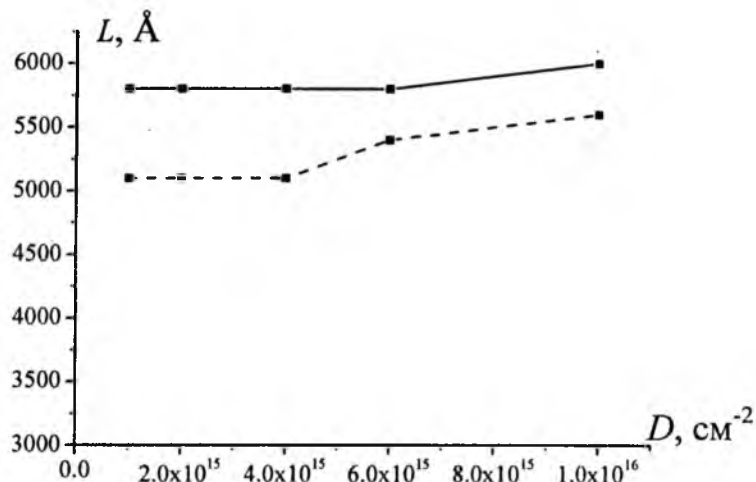


Рис. 3. Залежність товщини порушеного іонно-імплантованого шару монокристалів ГГГ від дози імпантованих іонів  $He^+$  ( $E = 100$  кеВ): (—) – відразу після імпантації, (- - -) – через три роки

Для пояснення поведінки “деформаційних” параметрів профілів відносної деформації в процесі старіння необхідно розглянути процес іонної імпантації детальніше.

Згідно із сучасними уявленнями про процес іонної імпантації, дефекти відразу після виникнення (як за рахунок ударного зміщення атомів з вузлів [4], так і за рахунок збудження електронної підсистеми кристала [5]) мігрують, анігілюють одні з одними, утворюють комплекси різного типу (кластери, дислокаційні петлі) або залишаються одиничними і стійкими. Після генерації пар Френкеля подальша “доля” вакансій і міжвузлових атомів значною мірою залежить від наявності в кристалі хімічних домішок та інших дефектів [6]. Дефекти різних типів утворюються по всій товщині пробігу, однак, якщо точкові дефекти розподілені по товщині іонно-імплантованого шару менш-більш рівномірно, то максимум концентрації кластерів спостерігається в кінцях треків. Сам кластер (область скупчення дефектів) можна умовно поділити на дві зони: центральну сильнодефектну й зовнішню слабкодефектну. Аморфізація матеріалу відбувається у випадку перекриття центральних зон кластерів. Дефекти на периферії кластерів не беруть участі в початковому етапі аморфізації, але вносять вклад у деформацію [7].

Для уточнення процесів, які відбуваються при опроміненні монокристалів ГГГ іонами  $He^+$ , було проведено математичне моделювання процесу іонної імпантації за допомогою програми SRIM-2003 та статистичну обробку одержаних результатів. Енергії зв'язку іонів у кристалі ГГГ бралися згідно з даними, отриманими на основі квантово-механічних розрахунків [8]. Результати проведення розрахунків дають

підстави зробити висновок, що після імпантації легкими іонами середніх енергій утворюються, в основному, точкові дефекти – френкелівські пари (або їх скупчення), а утворення каскадів зіткнень мало ймовірно. Як показано в [9], ріст кількості дефектів і руйнування кристалічної ґратки відбувається підвищенням дози; при низьких дозах опромінення іонна імпантація призводить до утворення ізольованих дефектів (чи областей їх скупчення), що підтверджується лінійністю зростання максимальної деформації і деформації на поверхні при  $D \leq 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  (рис. 4). При  $D > 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  починає відбуватися анігіляція дефектів за рахунок перекриття каскадів зміщень з раніше введеними дефектами, що призводить до часткової релаксації пружних напруг і проявляється в сповільненні зростання максимальної деформації та деформації на поверхні.

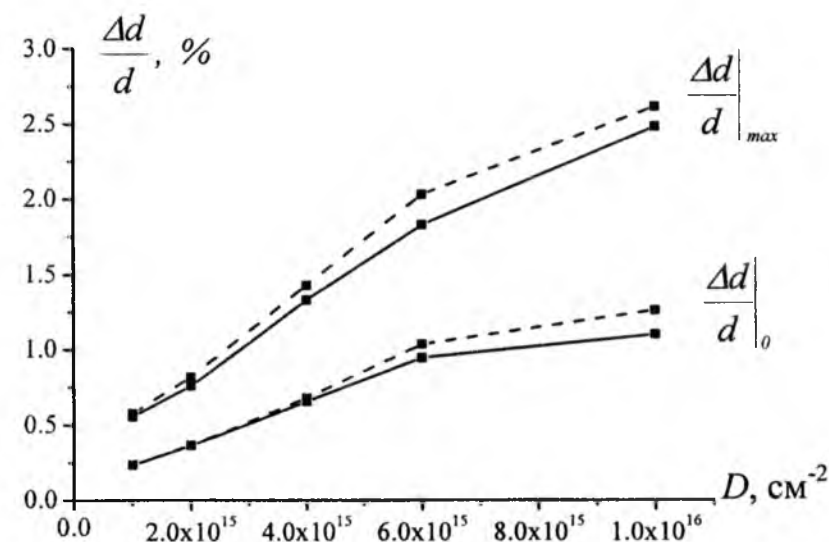


Рис. 4. Залежність величини відносної максимальної деформації  $\frac{\Delta d}{d}_{max}$  в іонно-імплантованому шарі та відносної деформації на поверхні  $\frac{\Delta d}{d}_0$  монокристала ГГГ від дози імпантованих іонів  $He^+$  ( $E = 100$  кеВ): (—) – відразу після імпантації, (- - -) – через три роки

Зауважимо, що під час аналізу результатів моделювання процесу іонної імпантації за допомогою програми SRIM-2003 необхідно враховувати, що воно відбувається в аморфному наближенні й не враховує можливості релаксації дефектів. Імовірність вибивання атомів зі свого положення розраховується зі ступінчастої моделі потенціального бар'єра, що не зовсім відповідає дійсності. Тому результати моделювання за допомогою програми SRIM-2003 можна використовувати для

наближеної оцінки максимального пробігу іонів-імплантантів, глибини, на якій розміщений максимум дефектів і максимум іонів імплантантів, форми профілів імплантації та дефектів, а також максимального можливого значення концентрації дефектів. Оцінка типу радіаційних дефектів, виходячи з вищесказаного та з того, що моделювання проводиться в наближенні бінарних зіткнень, очевидно, буде не коректною.

У сучасних умовах для визначення типів дефектів, у тому числі й радіаційного походження, застосовують рентгенівську дифрактометрію та новітні результати теорії розсіяння рентгенівських променів [10; 11]. При цьому аналізується не тільки когерентна складова розсіяних рентгенівських променів на “квазіідеальній” частині кристала, а й дифузна складова розсіяння на різного типу дефектах. На даний час для опису розсіяння рентгенівських променів у досконалих та модифікованих монокристалах найчастіше застосовують узагальнену динамічну теорію, яка враховує наявність у структурі дефектів різних типів (точкових, кластерів, дислокаційних петель) і їхній вклад у формування когерентної та дифузної складових. Застосування вказаної теорії розсіювання вимагає використання і більш точних експериментальних методів, а тому розрахунки за узагальненою динамічною теорією можна застосовувати тільки до результатів, одержаних за допомогою так званої високо-роздільної рентгенівської дифрактометрії.

У результаті процесу старіння іонно-імплантованих ГГГ характер залежності величини максимальної відносної деформації та відносної деформації на поверхні суттєво відрізняються (рис. 5). В інтервалі доз  $1 \cdot 10^{15} - 6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$  відбувається пропорційне зростання максимальної відносної деформації та відносної деформації на поверхні. За дози  $D = 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$  у зв'язку з початком взаємодії скупчень дефектів між собою відбувається часткове вирівнювання деформації по товщині порушеного шару.

Для якісного опису процесів, які відбуваються з дефектами в іонно-імплантованому шарі під час старіння, і, відповідно, відображаються на параметрах профілів відносної деформації, ми використали результати моделювання дифракції рентгенівських променів на монокристалах ГГГ з порушеним приповерхневим шаром, проведеного на основі узагальненої динамічної теорії за допомогою розробленої нами програми. Дефекти аналізували (не вдаючись до конкретизації типу) за двома параметрами: розміром та концентрацією. Зв'язок між величинами деформацій у порушеному шарі й середніми деформаціями, які виникають через наявність у ньому дефектів, можна задати співвідношенням [12]:

$$\varepsilon = (\varepsilon^{PD} + \varepsilon^C + \varepsilon^L) / 3,$$

де  $\varepsilon^{PD}$ ,  $\varepsilon^C$  і  $\varepsilon^L$  – середні значення відносної деформації, створені точковими дефектами, кластерами і дислокаційними петлями відповідно. Середнє значення відносної деформації, створеної дефектами типу  $\alpha$ , прямопропорційне концентрації дефектів  $n_\alpha$  та об'єму дефекта  $V_\alpha$  [13]. Вважаючи, що  $V_\alpha \sim R^3$  отримаємо:  $\varepsilon_\alpha \sim n_\alpha R_\alpha^3$ , де  $R_\alpha$  – радіус дефекта

типу  $\alpha$ . Отже, середнє значення відносної деформації лінійно залежить від концентрації дефектів і пропорційне кубу їх радіусів. Таким чином, можна зробити висновок, що визначальний вплив на середнє значення відносної деформації буде мати саме радіус дефектів.

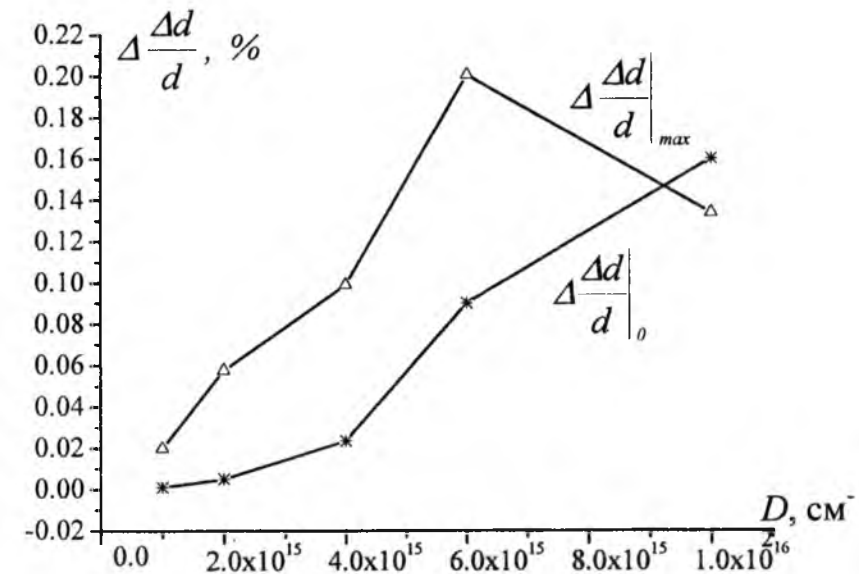


Рис. 5. Залежність середньої швидкості росту величини відносної максимальної деформації в іонно-імплантованому шарі та на поверхні монокристала ГГГ від дози імплантованих іонів  $\text{He}^+$  ( $E = 100 \text{ кеВ}$ ):  $\Delta$  – у максимально деформованому шарі; \* – на поверхні

Одним із можливих шляхів розвитку дефектної підсистеми з часом є освальдівське старіння [14], під час якого в процесі відпалу відбувається ріст радіуса петель та кластерів зі зменшенням їх концентрації. З порівняння результатів рентгеноструктурних досліджень, проведених із різницею в 3 роки (рис. 1) відносна деформація в порушеному шарі монокристалів ГГГ, імплантованих іонами  $\text{He}^+$ , в результаті процесу старіння зростає. Виходячи зі сказаного, можна зробити висновок, що з часом радіус дефектів у порушеному приповерхневому шарі зростає, тобто в імплантованих іонами  $\text{He}^+$  монокристалах ГГГ за кімнатної температури відбувається старіння за Освальдом.

Підтвердженням нашої гіпотези слугує й порівняння поведінки статичного фактора Дебая–Валлера з часом. Результати розрахунків свідчать, що зі збільшенням радіуса дефектів статичний фактор Дебая–Валлера також зростає, тобто  $E = e^{-W}$  зменшується і, відповідно, інтенсивність “хвостів” когерентної кривої дифракційного відбивання спадає, а дифузійної – зростає, що зрештою призводить до зростання загальної інтенсивності на “хвостах” КДВ. Дані теоретичні розрахунки підтверджуються результатами обробки експериментальних КДВ та величиною

визначеного з них максимального значення статичного фактора Дебая–Валлера, зміна з дозою і часом якого показана на рис. 6.

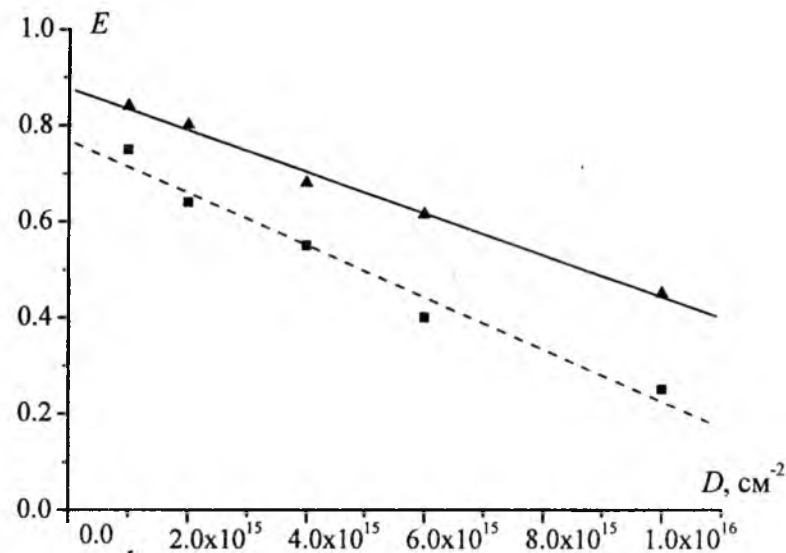


Рис. 6. Залежність величини максимального значення статичного фактора Дебая–Валлера  $E = e^{-W}$  в іонно-імплантованому шарі монокристалу ГГГ від дози імплантованих іонів  $He^+$  ( $E = 100$  кеВ); (—) – відразу після імплантації, (- - -) – через три роки

### Висновки

Аналіз КДВ, профілів відносної деформації та параметрів цих профілів до і після “старіння” свідчить про складні структурні перетворення, що відбулися в імплантованих приповерхневих шарах монокристалів протягом трьох років. Величини максимальної деформації та деформації на поверхні зросли в середньому на  $\sim 10\%$ , при цьому товщина порушеного шару зменшилася. Указані структурні зміни зумовлюються змінами розмірів і концентрації дефектів, а також рухом радіаційних дефектів до поверхні зразка під дією механічних напруг, що виникають унаслідок іонної імплантації.

1. Кон В. Г. Простой метод определения структуры нарушенного поверхностного слоя монокристаллов из рентгенодифракционных данных / В. Г. Кон, М. В. Прилепский, И. М. Суходрева // Поверхность. – 1984. – № 11. – С.122–128.

2. Balestrino G. et al. Reconstruction mechanism in ion implanted yttrium iron garnet films / G. Balestrino, S. Lagomarsino, E. Milani. – 1988. – V. 63(8). – P. 2751–2755.

3. Яремій І. П. Рентгенодифрактометричне дослідження приповерхневих шарів монокристалічних плівок ЗІГ, імплантованих іонами  $B^+$  / І. П. Яремій // Фізика і хімія твердого тіла. – 2003. – № 4 (3). – С. 451–455.

4. Риссел Х. Ионная имплантация / Х. Риссел, И. Руге. – М.: Наука, 1983. – 320 с.

5. Клиггер М. И. и др. Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждений / М. И. Клиггер, Ч. Б. Луцки, Т. Л. Машовец // УФН. – 1985. – Т. 165, В. 3. – С. 523–558.

6. Создание дефектов в твердых телах при распаде электронных возбуждений // М. И. Клиггер, Ч. Б. Луцки, Т. Л. Машовец и др. // УФН. – 1985. – Т. 147, В. 3. – С. 523–558.

7. Вавилов В. С. Ионная имплантация примесей в монокристаллы кремния: эффективность метода и радиационные нарушения / В. С. Вавилов, А. Р. Челябинский // УФН. – 1995. – Т. 165, В.3. – С. 347–358.

8. Квантовомеханический подход к образованию дефектных состояний в гадолиний – галлиевых гранатах / Я. О. Довгий, В. И. Китык, А.О. Матковский // ФТТ. – 1992. – Т. 34, № 4. – С. 1078–1087.

9. О возможном механизме аморфизации поверхности феррит-гранатовых пленок вследствие ионной имплантации / Б. К. Остафийчук, В. М. Ткачук, О. Н. Ворончак, Б. И. Яворский // Металлофизика и новейшие технологии. – 1994. – Т. 16, №8. – С. 51–54.

10. Bragg diffraction of X-rays by single crystals with large microdefects. I. Generalized dynamical theory / V. B. Molodkin, S. I. Olikhovskii, E. N. Kislovskii [and oth.] // Phys. Stat. solidi. B. – 2001. – 227, № 2. – P. 429–447.

11. Bragg diffraction of X-rays by single crystals with large microdefects. II. Dynamical diffuse scattering amplitude and intensity / S. I. Olikhovskii, V. B. Molodkin, E. N. Kislovskii [and oth.] // Phys. Stat. solidi. B. – 2002. – 231, № 1. – P.199–212.

12. Диффузное рассеяние рентгеновских лучей в ионно-имплантированных кристаллах / С. И. Олиховский, В. Б. Молодкин, Е. Н. Кисловский [и др.] // Металлофизика и новейшие технологии. – 2005. – Т. 27, № 5. – С. 653–675.

13. Кривоглаз М. А. Дифракция рентгеновских лучей и нейтронов в неидеальных кристаллах / М. А. Кривоглаз. – К.: Наук. думка, 1983. – 408 с.

14. X-ray diffraction analysis of damage accumulation due to the nuclear energy loss of 50keV and 1-2.2 MeV B ions implanted in silicon / R. Fabbri, G. Lulli, R. Nipoti, M. Servidori // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. – 1993. – В 80/81. –P.624–627.

PROCESSES OF SENESCENCE OF SURFACE LAYERS OF MONOCRISTALIV OF THE GGG IONS NE+ MODIFIED BY IMPLANTATION

**B.K. Ostafiychuc, V.D. Fedoriv, I.P. Yaremiy, S.I. Yaremiy**  
PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000,  
Ukraine

The crystalline structure changes, which happened during 3 years in surface layers of GGG single crystals implanted by He<sup>+</sup> ions, are studied on the basis of the results of X-ray structural analysis. The strange profiles calculated from experimental diffraction reflection curves are presented. The explanation of mechanisms of origin and relaxation of defects is offered from point of modern ideas about given processes passing on the basis time changes of their parameters.

**Key words:** single crystal, ion implantation, dynamic theory, strange profiles, amorphisation, relative deformation.

УДК 621.315.4.539

ДЖЕРЕЛА ІОНІВ ДЛЯ ФОРМУВАННЯ ШАРУВАТИХ СТРУКТУР ВІС

**С.П. Новосядлий, В.М. Бережанський**

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
тел. (0342) 71 48 48  
e-mail: [kre@pu.if.ua](mailto:kre@pu.if.ua)

Наведено характеристики і параметри іонних застосувань в іонно-променевому та реактивному іонно-променевому методах осадження і травлення шаруватих структур ВІС іонних джерел, які стають особливо актуальними як у субмікронній, так і нанотехнології. Крім цього, показано принципову можливість управління такими параметрами, як енергія іонів, густина струму, склад іонного пучка, однорідність та анізотропність процесів осадження і травлення.

**Ключові слова:** джерело іонів, осадження, травлення.

Джерела іонів знаходять усе більш широке застосування в процесі виготовлення структур кристалів ВІС, транзисторів НВЧ, п'єзокварцевих приладів, елементів дифракційної оптики, магнітооптичних дисків, елементів оптоелектроніки. Для цього застосовують метод іонно-променевого й реактивного іонно-променевого травлення (ІПТ, РІПТ), що здійснюються пучками іонів інертних і хімічно активних речовин, а також методи осадження, очищення й активації поверхні пучками іонів перед нанесенням шарів плівок у вакуумі. Принципові схеми таких основних методів подано на рис. 1.

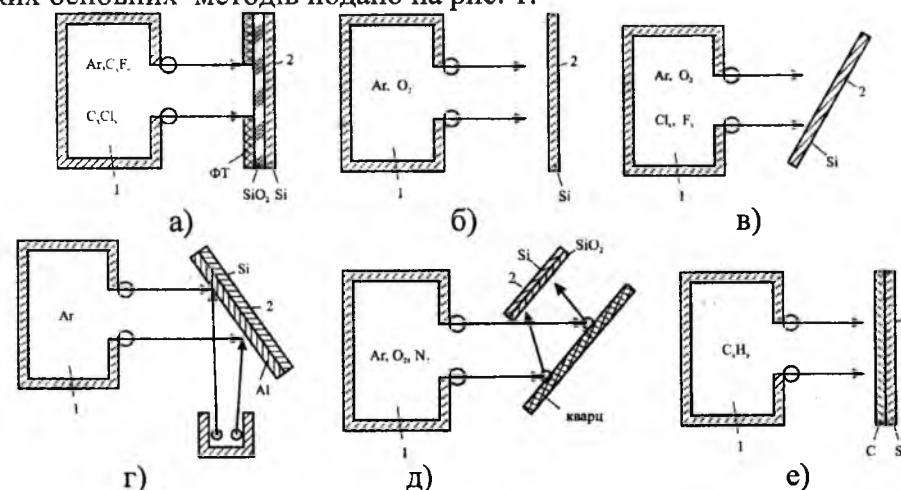


Рис.1. Принципові схеми методів іонно-променевої обробки: а) травлення; б) очищення поверхні; в) полірування; г) активація поверхні; д) нанесення SiO<sub>2</sub>; е) нанесення С

Для реалізації методів іонно-променевої обробки слід прив'язати іонні джерела до плазмового спецтехнологічного обладнання, що реалізувалося Всесоюзним інститутом вакуумної техніки ім. Векшинського (НДІВТ). Тому іонні джерела повинні задовольняти вимоги:

1. Для забезпечення високої продуктивності установок іонно-променевої обробки на рівні технологічного процесу формування шаруватих структур ВІС величина струму пучка іонів повинна бути на рівні сотень міліампер, а густина струму – декілька мА/см<sup>2</sup>. Струм пучка обмежується за двома чинниками: по-перше, в джерелах іонів струм, що відбивається з межі плазми, є струмом насичення й визначається законом Ленгмюра [1; 4]. По-друге, струм пучка іонів пропорційний потоку робочої речовини й обмежений за фіксованого тиску швидкістю відкачування вакуумної системи.

2. Для проведення перерахованих вище процесів (рис.1) необхідно, щоб величина енергії перебувала в межах від 0,05 до 5 кеВ. Оптимальна енергія іонів для процесів іонно-променевого розпилення матеріалів вибирається відповідно до вимог отримання максимальної швидкості осадження за мінімального робочого тиску. Ці величини задовольняються для енергій іонів 3–5 кеВ. Критерієм вибору максимальної енергії іонів для осадження плівок шаруватих структур безпосередньо з пучка іонів є співвідношення  $S(E) < 1$ , де  $S(E)$  – коефіцієнт саморозпилення матеріалу, що осаджується.

Для процесів іонно-променевого травлення енергія іонів вибирається в діапазоні 0,05–1 кеВ. Іони з енергією, меншою за порогову (2–20 еВ) не розпилюють матеріал, тому їх можна використовувати для очищення чи активації поверхні. Максимальна енергія іонів обмежується радіаційними пошкодженнями та аморфізацією оброблюваної поверхні, а також термостійкістю резистивної маски відповідного фоторезисту. Оскільки при травленні через резистивну маску фоторезиста витрата енергії на один видалений атом повинна мати мінімальне значення, оптимальна енергія визначається максимумом функції [2; 3]:

$$f(E) = S(E)/E, \quad (1)$$

де  $E$  – енергія іона.

3. Технологічні джерела іонів повинні формувати пучки іонів із різних речовин, включаючи хімічно активні, наприклад, фтор- або хлорвмісні сполуки, вуглеводні, кисень, азот, аргон. Ці вимоги впливають із багатоваріантності технологічних процесів формування шаруватих структур.

4. Джерела іонів повинні забезпечувати травлення й осадження плівок із заданою рівномірністю та селективністю. Різна форма та субмікронні розміри елементів структур вимагають створення джерел із різною конфігурацією пучка: однорідні за густиною струму пучки великого діаметра під Si-підкладки; смужкові; пучки, які сходяться чи розходяться.

5. Джерела іонів повинні мати катоди нейтралізації для управління величиною поверхневого заряду в процесах травлення чи осадження ді-

електричних плівок. Якнайповніше цій вимозі відповідають джерела іонів із холодним катодом, які формують іонні пучки в схрещених електричному і магнітному полях.

6. Іонізація будь-яких речовин забезпечується високоенергетичними електронами, які прискорюються в спеціально створеній потенціальній ямі і в локалізованих схрещених електричному  $E$  і магнітному  $B$  полях, що забезпечують максимальну зміну енергії електронів на проміжку анод-катод (рис. 2).

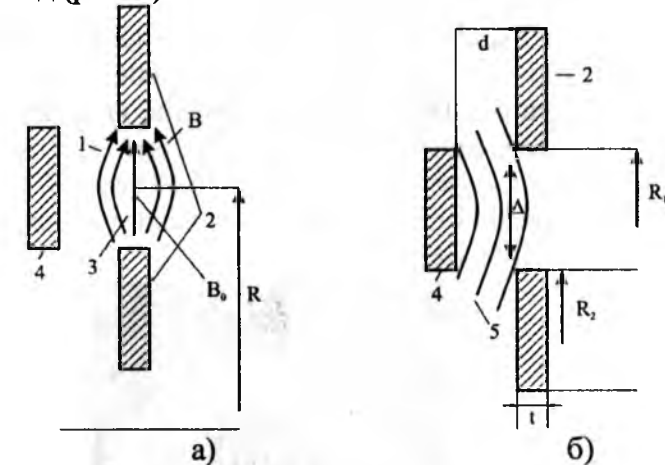


Рис. 2. Прискорюючий проміжок анод-катод джерела іонів, на якому вказані: силові лінії магнітного поля а) й еквіпотенціали електричного поля  $E$  (1 – силові лінії магнітного поля; 2 – катод або прискорюючий електрод; 3 – отвір для електронного пучка; 4 – анод; 5 – еквіпотенціали)

Утримання електронів у проміжку анод-катод здійснюється в схрещених електричному і магнітному полях потенціальною ямою і лінзоподібним магнітним полем певної конфігурації. Рух електрона вздовж магнітних силових ліній може бути описано в дрейфовому наближенні з роботи [2; 3]:

$$\frac{1}{2} m (v_{\parallel}^2 - v_{0\parallel}^2) = -e(V_0 - V) - M(B - B_0), \quad (2)$$

де  $v_{\parallel}$ ,  $v_{0\parallel}$  – паралельні магнітному полю складові швидкості електронів;  $M = m_{0\perp}^2 / 2B_0 = const$  – магнітний момент електронів;  $V$  і  $V_0$  – потенціали.

Відповідно для електронів із малою величиною магнітного моменту  $M$  механізм їх утримання може слугувати лише електричне поле (потенціальна яма), а за досить великого  $M$  – співвідношення  $B/B_0$  ( $B_0$  – магнітна індукція в точці емісії електронів із катода).

Критерії для джерел іонів із холодним катодом можна записати в такому вигляді [2]:

$$r_e/d \approx 1; D_e/D \geq 1; r_i/d \gg 1; \lambda_{e,i} \gg 1; \gamma = \frac{w}{eV_i} \gg 1, \quad (3)$$

де  $d$  – відстань анод-катод;  $r_e, r_i$  – лермюрівський радіус електронів і іонів,  $D_e$  – дебаєвський шар,  $\lambda_{e,i}$  – довжина вільного пробігу електрона та іона;  $V_i$  – потенціал іонізації робочого газу;  $w$  – абсолютне значення кінетичної енергії електрона в проміжку анод-катод;  $\gamma$  – ефективність іонізації.

Розглянемо тепер особливості джерел іонів, які використовуються під час формування шаруватих структур.

1. Джерела радикалів та іонів для прецизійного травлення.

1.1. Джерело радикалів “Істра-1” розроблено спеціально для плазмохімічного травлення (ПХТ) таких матеріалів, як моно-Si і полі-Si та його сполуки, а також Mo, W, V, Nb, Ta, Ti (рис. 3). Джерело встановлюється на фланці оглядового вікна вакуумної камери. До його складу входить два вмонтованих екранованих електроди і колектор (для розподілу подачі газу в зону розряду).



Рис. 3. Джерело радикалів “Істра-1” для плазмохімічного травлення шаруватих структур

У даному джерелі використовується розряд постійного струму, і тут не вимагається складного електроживлення, як для ВЧ розряду. Робочий газ дисоціює в розрядній камері на хімічно-активні незаряджені частинки (радикали) і подається в реакційну камеру, де розміщені підкладки зі структурами.

Основною перевагою такого джерела є відсутність радіаційних пошкоджень і теплової дії на шаруваті структури, що обробляються. Дане джерело монтується в установку ПХТ “Вертикаль”. Технічні характеристики джерела такі:

- робоча напруга – 500 – 1500 В;
- струм розряду – 0,1 – 1,0 А;
- робочий тиск – 5,0 – 50 Па;
- витрати газу – 0,1 – 0,5 см<sup>3</sup>/с;
- швидкість травлення на Si – 0,5 – 10 нм/с;

- робочий газ –  $\text{CF}_4 + \text{O}_2$

Установка “Вертикаль-1” являє собою малогабаритний модуль-напівавтомат індивідуальної обробки підкладок із шаруватою структурою, яка є конструктивною базою для низки спеціалізованих установок вакуумно-плазмової обробки (рис. 4):

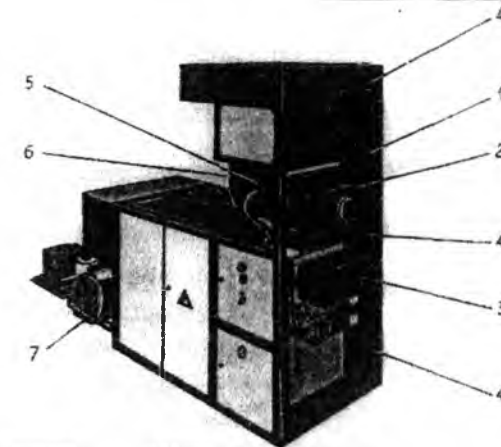


Рис. 4. Установка “Вертикаль-1” для ПХТ кремнію з використанням радикального джерела “Істра-1”. 1 – каркас, 2 – робоча камера; 3 – камера завантаження; 4 – управління; 5 – джерело ХАЧ; 6 – лазерний датчик; 7 – засоби відкачки

1.2. Установка “Радикал” – це джерело іонів із холодним катодом, яке формує трубчастий потік іонів  $\varnothing 100$  мм. Тут катод із кільцевою щільною діаметром 100 мм, виготовлений із магніто-м’якого матеріалу, виконує роль одночасно магнітопровода та прискорюючого електрода (катода). Кільцевий анод для стабілізації температури охолоджується водою. Радіальне магнітне поле з індукцією до 0,15 Тл створюється соленоїдом і системою магнітопроводів. Газоподібна робоча речовина подається через канал у камеру через кільцевий отвір у центральному магнітопроводі й поступає в проміжок анод-катод. Таке джерело іонів також може монтуватися на оглядове вікно будь-якої плазмової установки (вакуумної).

Дослідження показали, що для джерела “Радикал” характерна наявність двох режимів роботи. У випадку збільшення потоку газу спостерігається експоненційне зростання струму пучка. Перехід від одного режиму роботи до іншого відбувається за деякого критичного потоку  $Q_{кр}$ . Режим роботи джерела при  $Q < Q_{кр}$  називають слабкострумовим, а при  $Q > Q_{кр}$  – сильнострумовим (рис. 5).

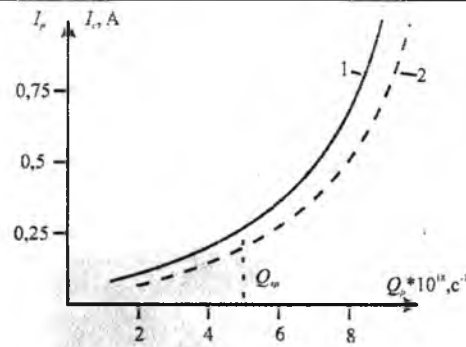


Рис.5. Залежність струму розряду  $I_p$  (1) і струму пучка іонів (2) від потоку газу  $Q$  при  $U_p=1,5$  кВ,  $B=0,1$  Тл для джерела іонів “Радикал”

Джерело “Радикал” використовується в технологічному обладнанні різного типу, в установках активного іонно-променевого травлення типу УРМ 083.0037, 083.0045 та в установках іонно-променевого осадження типу 083.0040, 083.0050, а також в установках вакуумного плазмо-дугового нанесення з очищенням й активацією поверхні перед та в процесі формування шаруватих структур типу 083.0051, 083.0070.

Принциповим рішенням проблеми рівномірності обробки поверхні великого діаметра (200, 250, 300 мм) є використання багатопучкових джерел іонів типу “Радикал М” (рис. 6). Це дозволяє реалізувати перехід на обробку Si-пластин великого діаметра. Тут застосовують іонні пучки великого діаметра: 100, 200, 300, 450 мм відповідно.

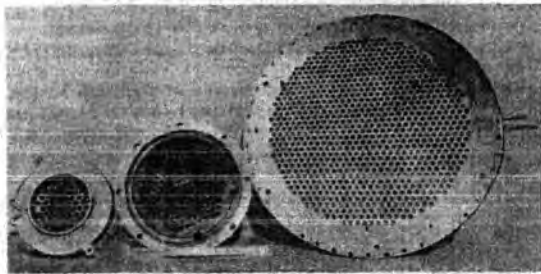


Рис. 6. Багатопучкові іонні джерела “Радикал М-100”, “М-200” і “М-450”

У джерелах “Радикал М-100” максимальний струм пучка іонів  $CF_4$  досягає 650 мА, а густина струму на оброблюваній поверхні Si-пластин діаметром 100 мм – до  $7$  мА/см<sup>2</sup>. Напруга розряду складає 1–3 кВ, що забезпечує середню величину енергії іонів – 200–450 еВ. Такий режим обробки забезпечує травлення шаруватих структур без радіаційних пошкоджень і аморфізації поверхні. Нерівномірність травлення по всій площі кремнієвої пластини діаметром 100 мм складає менше 3,5% при швидкості травлення  $SiO_2$  на рівні 15 нм/с (для  $CF_4$ ), а алюмінію та його сплавів – 3 нм/с із використанням транспортного газу – аргону. Селективність травлення  $SiO_2$  до Si досягає 15:1 у випадку використання хладона 14 ( $CF_4$ ) та 20:1 для хладона 218 ( $C_3F_8$ ).

Джерела іонів “Радикал М200” забезпечують зону обробки діаметром 165 мм із максимальною густиною іонного струму  $2,5$  мА/см<sup>2</sup>, а для

джерел “Радикал М300” і “Радикал М450” –  $1$  мА/см<sup>2</sup>. Принципи конструювання багатопроменевих джерел дає можливість створювати іонні джерела, які формують пучки різних конфігурацій – від прямокутних і стрічкових до кільцевих.

Технічні характеристики джерел іонів типу “Радикал” такі:

- оброблювальні матеріали шаруватих структур –  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $Si_xO_yN_z$ , ФСС, БФСС, TiN,  $Al_2O_3$ , Si, GaAs, Cu, Au, Ti, W, Mo, FeNi, АК-1, АКГо-1-1;
- роздільна здатність, мкм – не більше 0,10;
- точність переносу елемента, мкм – менше 0,05;
- швидкість травлення, нм/с: для  $SiO_2 \leq 15$ ; металів і напівпровідників – менше 5;
- селективність травлення: для  $SiO_2/Si$  – 20:1;  $SiO_2/GaAs$  – 12:1;
- неоднорідність травлення пластин діаметром 350 мм – менше  $\pm 3\%$ ;
- глибина травлення, мкм – менше 150;
- чистота – напівпровідникова.

У процесі травлення забезпечується нейтралізація заряду по всій поверхні Si-пластин.

## 2. Джерела іонів для осадження шарів.

Розглянуті вище джерела можуть використовуватися в субмікронній технології не лише для очищення, активації, полірування та травлення. Малі енергії іонів дозволяють використовувати їх для нанесення плівок шаруватих структур шляхом осадження матеріалу безпосередньо із іонного пучка. Цим методом можна формувати дифузійне джерело – нітрид бору, а також алмазоподібні вуглецеві плівки (фуллерени). Основна відмінність даного методу осадження іонним розпиленням полягає в бомбардуванні мішені високоенергетичними іонами практично всіх газоподібних речовин, включаючи хімічно активні.

На рис. 7. представлені джерела іонів “Холодок 1,2”, які створюють радіально збіжний пучок іонів, спрямований під таким кутом до поверхні мішені, за якого забезпечується максимальний коефіцієнт розпилення матеріалу. Даним методом можуть осаджуватись як діелектрики  $SiO_2$ ,  $Si_3N_4$ ,  $Si_xO_yN_z$ , AlN,  $Al_2O_3$ , ФСС, так і метали й напівпровідники, композити та алмазоподібні плівки. Швидкість осадження сягає 5 нм/с у випадку неоднорідності на діаметрі 350 мм на рівні  $\pm 3\%$ .

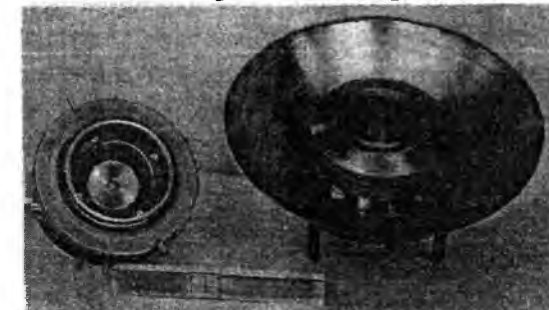


Рис. 7. Іонні джерела “Холодок 1,2” для осадження плівок шаруватих структур



Таким чином, дані іонні джерела є могутнім інструментом суб- і нанотехнології формування структур ВІС, і на базі них можна формувати кластерні установки під мікроцикли технологічного маршруту.

1. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ : Сімик, 2003. – 351 с.

2. Новосядлий С.П. Плазмова технологія формування субмікронних структур великих інтегральних схем / С. П. Новосядлий // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2002. – № 6. – С.57–63.

3. Макшев Ю. П. Источники ионных пучков с компенсацией пространственного заряда внутри ускоряющего промежутка : приборы и техника эксперимента / Ю. П. Макшев. – 1980. – № 1. – С. 183–186.

4. Плазменная технология в производстве СВИС / пер. с англ. ; под ред. М. Айнспрука, Д. Брауна. – М. : Мир, 1987. – 286 с.

#### SOURCES OF IONS FOR FORMING OF THE STRATIFIED STRUCTURES OF VIS

**S.P. Novosyadliy, V.M. Beregansky**

*PreCarpathian National University by V. Stefania,  
Ivano-Frankivsk, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivsk, 76000,  
Ukraine, ph. (0342) 71 48 48, e-mail: kre@pu.if.ua*

*Descriptions and parameters of ionic sources, which use in an ion-ray and reactive ion-ray methods of deposition and etching of the VLSI stratified structures which become especially actual both in a submicron and nanotechnology, are obtained in this article. Besides that, principle possibility of management such parameters as energy of ions, density of current, composition of ionic beam, homogeneity and anisotropism of deposition and etching processes are shown.*

**Key words:** ionic sources, deposition, etching.

УДК 621.315

#### СПІН-ОРБІТАЛЬНА ВЗАЄМОДІЯ І КВАНТОВИЙ НАПІВПРОВІДНИКОВИЙ ДРІТ У МАГНІТНОМУ ПОЛІ

**М.А. Рувінський, Б.М. Рувінський**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57*

*За наявності однорідного магнітного поля, спрямованого вздовж осі квантового напівпровідникового дроту, визначено вплив спіно-орбітальної взаємодії на енергетичний спектр електронів дроту й одномірних гауссівських флуктуацій спіно-орбітальної взаємодії на рухливість носіїв заряду. Для невиродженої статистики в граничному випадку сильного магнітного поля й низьких температур рухливість електронів  $u_n \propto T^{-1/2} H^{-2}$ .*

**Ключові слова:** квантовий напівпровідниковий дріт, магнітне поле, енергія електронів, спіно-орбітальна взаємодія, гауссівські флуктуації, рухливість електронів.

Досягнення сучасних технологій зробило актуальним дослідження мезоскопічних і наноструктурних матеріалів [1; 2]. Квантовий напівпровідниковий дріт є одним із цікавих об'єктів із властивостями, істотно відмінними від випадку масивних кристалів і перспективними для твердотільної електроніки. Зокрема, вивчення спіно-орбітальної взаємодії в дроті пов'язано зі спітронікою, з можливістю управління спіновим ступенем вільності носіїв заряду [3; 4]. Найбільш досліджені електричні й оптичні властивості одновимірного квантового дроту, а також дроту циліндричної геометрії. Існуючі сучасні технології не виключають проявів досі нерозглянутих механізмів розсіяння електронів і дірок на різноманітних флуктуаціях у напівпровідниковому дроті. У роботі [5] були розглянуті флуктуації товщини квантового напівпровідникового дроту. У [6] досліджено вплив можливих одновимірних гауссівських флуктуацій спіно-орбітальної взаємодії на статичну електропровідність уздовж дроту за відсутності зовнішнього магнітного поля. Метою даної роботи є визначення впливу спіно-орбітальної взаємодії за наявності зовнішнього магнітного поля, спрямованого вздовж осі дроту.

Квантовий дріт у дійсності не є одновимірною системою, а є обмеженою тривимірною системою, в якій існує достатньо сильний конфайнмент у двох поперечних напрямках, перпендикулярних каналу провідності (осі дроту). Нехай у напрямку координатної осі  $z$  дріт обмежений за товщиною  $d$  одновимірною потенціальною ямою  $V(z)$  з нескінченно високими стінками. За шириною в напрямку осі  $y$  дріт обмежений параболічним потенціалом  $\beta y^2$ , де  $\beta > 0$ . Постійне магнітне поле  $\mathbf{H}$  спрямоване вздовж осі  $x$  дроту; складові векторного потенціалу магнітного поля:  $A_x = A_y = 0, A_z = H y$ .

В одноелектронному наближенні [7] гамільтоніан дроту має такий вигляд

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{U}_{so}, \quad (1)$$

де

$$\hat{H}_0 = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta_{\perp} + \frac{\hat{P}_z^2}{2m} + V(z) + \beta y^2 + \mu_B H \hat{\sigma}_x \quad (2)$$

– гамільтоніан незбуреної задачі,  $\Delta_{\perp} = (\partial/\partial x)^2 + (\partial/\partial y)^2$ ,  $m$  – ефективна маса електрона провідності

$$\hat{P}_z = \hat{p}_z + \frac{eH}{c} y, \quad (3)$$

$$V(z) = \begin{cases} 0, & -d/2 \leq z \leq d/2, \\ \infty, & z < -d/2, z > d/2, \end{cases} \quad (4)$$

$\mu_B = e\hbar/2mc$  – магнетон Бора для електрона провідності,  $e$  – абсолютна величина заряду електрона,  $c$  – швидкість світла.

Оператор спіно-орбітальної взаємодії дроту в магнітному полі

$$\hat{U}_{so} = \gamma[\hat{\sigma}_x(\hat{p}_y\hat{p}_x\hat{p}_y - \hat{p}_z\hat{p}_x\hat{p}_z) + \hat{\sigma}_y(\hat{p}_z\hat{p}_y\hat{p}_z - \hat{p}_x\hat{p}_y\hat{p}_x) + \hat{\sigma}_z(\hat{p}_x\hat{p}_z\hat{p}_x - \hat{p}_y\hat{p}_z\hat{p}_y)], \quad (5)$$

де  $\hat{\sigma}_j$  ( $j = x, y, z$ ) – матриці Паулі,  $\hat{p}_j = -i\hbar(\partial/\partial x_j)$  – оператори складових імпульсу електрона. Вираз (5) відповідає механізму Дрессельхауза [3; 4] для об'ємного нецентроінверсного напівпровідника  $A_3B_5$  у магнітному полі, спрямованому вздовж осі  $x$  дроту.

У наближенні врахування станів електрона з певною парністю по осі  $z$  хвильова функція основного стану незбуреної задачі в магнітному полі з гамільтоніаном  $\hat{H}_0$  (2) має вигляд:

$$\Psi_{k_x}(\mathbf{r}) \chi_{\pm 1/2}(s_x), \quad (6)$$

де

$$\Psi_{k_x}(\mathbf{r}) = \sqrt{\frac{2}{\pi^{1/2} L d y_0}} \exp\left(ik_x x - \frac{y^2}{2y_0^2}\right) \cos \frac{\pi}{d} z, \quad (7)$$

$L$  – довжина дроту ( $L \gg d$ ),

$$y_0 = \hbar^{1/2} \left[ 2m \left( \beta + \frac{e^2 H^2}{2mc^2} \right) \right]^{-1/4}. \quad (8)$$

$\chi_{\pm 1/2}(s_x)$  – спінова функція електрона:

$$\chi_{1/2}(s_x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad \chi_{-1/2}(s_x) = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Енергія електрона в стані (6):

$$E_{\pm 1/2}(k_x) = \frac{\hbar^2 k_x^2}{2m} + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2md^2} + \hbar \left[ \frac{1}{2m} \left( \beta + \frac{e^2 H^2}{2mc^2} \right) \right]^{1/2} \pm \mu_B H. \quad (10)$$

Ураховуючи оператор спіно-орбітальної взаємодії (5) малим збуренням, знайдемо першу поправку [8] до енергії електрона дроту в станах (6)–(10):

$$\Delta E_{\pm 1/2}(k_x) = \mp \gamma \hbar^3 k_x \left( \frac{\pi^2}{d^2} - \frac{3}{2y_0^2} + \frac{y_0^2}{2r_0^4} \right), \quad (11)$$

де

$$r_0 = \left( \frac{\hbar c}{eH} \right)^{1/2} \quad (12)$$

– радіус циклотронної орбіти; верхній знак у (11) відповідає спіновій орієнтації електрона вздовж осі дроту, а нижній – у протилежному напрямку. Отже, маємо лінійну по  $k_x$  поправку до закону дисперсії електрона. У граничному випадку сильного магнітного поля, коли

$$(e^2 H^2)/2mc^2 \ll \beta, \quad r_0 \ll d, \quad (13)$$

$$\Delta E_{\pm 1/2}(k_x) \approx \pm (\gamma \hbar^2 k_x e/c) H, \quad (14)$$

тобто поправка лінійна за магнітним полем і змінює свій знак на протилежний (див. (11) і (14)).

Зміну електронного енергетичного спектра дроту в постійному однорідному магнітному полі, спрямованому вздовж осі дроту, можна визначити експериментально за допомогою дослідів з електронного спінового резонансу [9] для дротів із нецентроінверсних напівпровідників  $A_3B_5$ .

Визначимо тепер вплив можливих одновимірних гауссівських флуктуацій спіно-орбітальної взаємодії на статичну електропровідність уздовж дроту за наявності поздовжнього магнітного поля. Гамільтоніан системи має вигляд (1)–(5), де у виразі (5) для оператора спіно-орбітальної взаємодії  $\hat{U}_{so}$  слід зробити заміну

$$\gamma \rightarrow \gamma + \xi(x), \quad (15)$$

де враховано одновимірну (вздовж осі  $x$ ) флуктуацію  $\xi(x)$ , яку вважаємо збуренням, що спричинює квантові переходи в трансляційному русі незбуреного стану (6) електрона зі збереженням або зміною орієнтації спіну.

Для станів електрона (6)–(9), поляризованих за спіном колінеарно напрямку магнітного поля (осі дроту  $x$ ), відмінні від нуля ймовірності квантових переходів без повороту спіна, що впливає також із парності координатної хвильової функції (7) відносно змінних  $y$  і  $z$ . Обернений час релаксації електрона вздовж дроту зі збереженням орієнтації спіну  $\alpha = \pm 1/2$  дорівнює

$$\frac{1}{\tau_n(k_x)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{k_x'} \left| \langle k'_{x,\alpha} | \hat{U}_{so} | k_{x,\alpha} \rangle \right|^2 \left( 1 - \frac{k'_x}{k_x} \right) \cdot \delta [E_\alpha(k_x) - E_\alpha(k'_x)], \quad (16)$$

де подвійні дужки  $\langle \dots \rangle$  мають зміст усереднення за випадковою флуктуацією  $\xi(x)$ . Флуктуації  $\xi(x)$  будемо вважати гауссівськими:

$$\langle \xi(x)\xi(x') \rangle = \Delta^2 \exp\left[-\frac{(x-x')^2}{2\Lambda^2}\right], \quad (17)$$

$$\langle \xi(x) \rangle = 0.$$

З (6)–(10) і (16) випливає, що час релаксації не залежить від спінового індексу  $\alpha$  електрона. Далі застосовуємо стандартну методику [5–7], пов'язану з кінетичним рівнянням Больцмана в наближенні часу релаксації. Наведемо остаточний результат для рухливості електрона в поздовжньому магнітному полі для невиродженої статистики носіїв струму при  $\delta < 1$ :

$$u_n = \frac{e \left( \frac{\pi^2}{d^2} - \frac{3}{2y_0^2} + \frac{y_0^2}{2r_0^4} \right)^{-2} (1-\delta)^{-1}}{2\hbar^2 m^{5/2} \Delta^2 \Lambda (k_B T)^{1/2}}, \quad (18)$$

$$\delta = (4m\Lambda^2 k_B T / \hbar^2), \quad (19)$$

де  $k_B$  – стала Больцмана,  $T$  – абсолютна температура. У граничному випадку сильного магнітного поля (13) і низьких температур  $\delta \ll 1$  рухливість електрона

$$u_n \propto T^{-1/2} H^{-2}, \quad (20)$$

тобто магнітне поле в низькотемпературній ділянці невиродженого дроту не змінює температурної залежності рухливості [6], зумовленої спін-орбітальною взаємодією. Залежність від магнітного поля в (18) визначається співвідношенням величини циклотронного радіуса  $r_0$  і значенням ефективного параболічного конфайнмента  $y_0$ . Зауважимо, що у випадку впливу гауссівських флуктуацій товщини дроту [5] замість (20) було отриману іншу залежність

$$u_n^{(th)} \propto T^{1/2} H^{-1/2}, \quad (21)$$

що дозволяє в принципі відокремити механізм впливу флуктуацій спін-орбітальної взаємодії за температурною й магнітною залежністю рухливості електронів напівпровідникового дроту.

1. Имри Й. Введение в мезоскопическую физику / Й. Имри. – М. : Физматлит, 2002. – 304 с.

2. Наносистеми, наноматеріали, нанотехнології : збірник наукових праць. – К. : Академперіодика, 2004. – Т. 2. – 338 с.

3. Магарилл Л. И. Спин-зависимая локализация электронов в кристаллах / Л. И. Магарилл, А. В. Чаплик // Письма в ЖЭТФ. – 2005. – Т. 81, № 4. – С. 198–202.
4. Efros Al. L. Theory of electric dipole spin resonance in a parabolic quantum well / Al. L. Efros, E. I. Rashba // Phys. Rev. B. – 2006. – V. 73. – P. 165325-1 – 165325-19.
5. Рувинский М. А. О влиянии флуктуаций толщины на статическую электропроводность квантовой полупроводниковой проволоки / М. А. Рувинский, Б. М. Рувинский // ФТП. – 2005. – Т.39, №2. – С.247–250.
6. Рувинський М. А. Вплив флуктуацій спін-орбітальної взаємодії на електропровідність квантового напівпровідникового дроту / М. А. Рувинський, О. М. Возняк, Б. М. Рувинський // Вісник Прикарпатського університету. Математика. Фізика. – 2007. – В. III. – С. 52–54.
7. Ансельм А. И. Введение в теорию полупроводников / А. И. Ансельм. – М. : Наука, 1978. – 616 с.
8. Ландау Л. Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М. : Наука, 1974. – 752 с.
9. Людвиг Дж., Вудберн Г. Электронный спиновый резонанс в полупроводниках / Дж. Людвиг, Г. Вудберн. – М. : Мир, 1964. – 148 с.

#### Spin-orbital interaction and a quantum semiconductor wire in magnetic field

M. Ruvinsky, B. Ruvinsky

PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine

*The influence of spin-orbital interaction on the energetic spectrum of electrons and the effect of one-dimensional Gaussian fluctuations of spin-orbital interaction on the mobility of carriers are determined for the quantum semiconductor wire in the magnetic field directioned along the wire axis. For nondegenerate statistics in the boundary case of high magnetic field at low temperatures the electron mobility  $u_n \propto T^{-1/2} H^{-2}$ .*

**Key words:** quantum semiconductor wire, magnetic field, electron energy, spin-orbital interaction, Gaussian fluctuations, electron mobility.

## ЛОКАЛЬНІ КНІ-СТРУКТУРИ – ПЕРСПЕКТИВНИЙ МАТЕРІАЛ ДЛЯ ІНТЕГРОВАНІХ МІКРОСИСТЕМ-НА-КРИСТАЛІ

**І.Т. Когут**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
тел. (0342) 71 48 48, e-mail: micro@il.if.ua*

*Розроблено оригінальний метод формування локальних тривимірних структур “кремній-на-ізоляторі” (КНІ), проведено приладно-технологічне моделювання. На прикладі розроблених окремих інтегральних елементів і моделювання їх характеристик показано, що запропоновані КНІ-структури можуть бути перспективним матеріалом для проектування елементної бази як зі стандартними, планарними конструкціями, так і з об’ємними, тривимірними архітектурами та побудови на цій основі мікросистем-на-кристалі (МСК).*

**Ключові слова:** кремній-на-ізоляторі, мікросистема-на-кристалі, приладно-технологічне моделювання, тривимірні елементи.

**Вступ.** Останнім часом надзвичайно інтенсивно розвивається новий напрямок – створення й використання інтегрованих МСК, на яких можуть бути реалізовані як різноманітні сенсорні, так і актюаторні елементи, схеми обробки інформації та керування [1]. Наразі відомі дві концепції розвитку мікросистем: система на одному кристалі й система на декількох кристалах з оптичними зв’язками між ними. У цих нових галузях досягнуто значних успіхів, проте базовим напрямком розвитку залишається інтеграція нових елементів із традиційними КМОН (комплементарними метал-окисел-напівпровідник) і біполярними транзисторними інтегральними схемами (ІС)[2]. Значний інтерес представляють МСК із монолітною інтеграцією різних типів елементів. Традиційна, планарна КМОН-технологія та її модифікації, дозволяють створювати КМОН та комбіновані біполярні Бі-КМОН транзисторні ІС обробки та управління, а на основі елементів Бі-КМОН структур можлива також реалізація сенсорних й актюаторних елементів. Проте з точки зору підвищення інтеграції елементів, швидкодії, стійкості до зовнішніх впливаючих чинників, а також розширення можливостей конструювання за рахунок повної діелектричної ізоляції елементів як від підкладки, так і між собою, для створення приладних структур, зокрема із тривимірними архітектурами, більш перспективними видаються структури КНІ. Тому проведення комплексних досліджень зі створення нових технологій одержання вихідних КНІ-структур, створення на цій основі нової приладної елементної бази та її моделювання є актуальною проблемою.

**Розробка й моделювання технології формування локальних КНІ-структур.** Сучасні промислові методи виготовлення КНІ-пластин

(SIMOX, ELTran, Smart Cut, Unibond) передбачають формування суцільних КНІ-плівок на поверхні кремнієвої пластини, використовують унікальне технологічне обладнання, що є достатньо дорогим і вітчизняною промисловістю неосвоєним. Суцільні, із заданою товщиною на всій поверхні кремнієвої пластини КНІ-плівки, як правило, призначені для створення на їх основі однотипних приладів, наприклад, КНІ КМОН-транзисторних структур. Названі технології є окремими складними технологіями формування КНІ-пластин як вихідного матеріалу для виготовлення інтегральних приладів [3]. Такі пластини є універсальними, не “прив’язаними” до конкретних топологій приладів, з погляду фірми-виготовлювача; проте з погляду розробника елементної бази МСК із різних типів приладів та їх монолітної інтеграції, більш перспективною була б наявність у межах одного кристала КНІ-структур із різними товщинами КНІ-плівки, локальних тривимірних КНІ-структур, “прив’язаних” до конкретної топології, герметичних та негерметичних порожнин під поверхнею пластини, можливостей інтеграції як КНІ-технології, так і стандартної, на основі об’ємного кремнію й т. ін.

Аналіз реальних топологій свідчить, що для активних елементів приладних структур зазвичай використовується не більше 40% площі КНІ-плівки, а інша її частина стає ізоляційним матеріалом. Ураховуючи також сучасні тенденції зменшення топологічних розмірів інтегральних приладних структур, видається доцільним дослідження зі створення технологій формування локальних КНІ-структур [4; 5], які були б частиною стандартної промислової технології інтегральних схем (ІС) чи МСК, і передбачали розміщення КНІ-структур на пластині за заданою топологією. Виходячи із цих міркувань, розроблено оригінальний метод формування локальних КНІ-структур шляхом локального термічного окислення порожнин під поверхнею кремнієвої пластини.

Суть методу пояснюється рис.1, а–л, де зображено результати приладно-технологічного комп’ютерного моделювання послідовності базових технологічних операцій створення локальних тривимірних КНІ-структур у вигляді поперечних перетинів, а на рис.1, м–н – результати моделювання технології формування тривимірної приладної КНІ МОН-транзисторної структури.

Технологічна послідовність базових операцій формування локальних тривимірних КНІ-структур запропонованим методом відповідно до рис. 1, а–н є такою:

а) на кремнієву пластину 1 типу КДБ-40 з кристалографічною орієнтацією поверхні (100) осаджують шар  $Si_3N_4$  або оксинітриду кремнію товщиною 0,1 мкм, на якій методом фотолітографії та плазмохімічного травлення (ПХТ)  $Si_3N_4$  на всю його товщину до поверхні з пластиною утворюють вікна шириною 1 мкм і необхідною довжиною, яка визначається топологічними розмірами приладних структур, наприклад, шириною каналу КНІ МОН-транзистора;

б) ізотропне ПХТ незамаскованих ділянок кремнієвої пластини 1 на глибину 1,5 мкм;

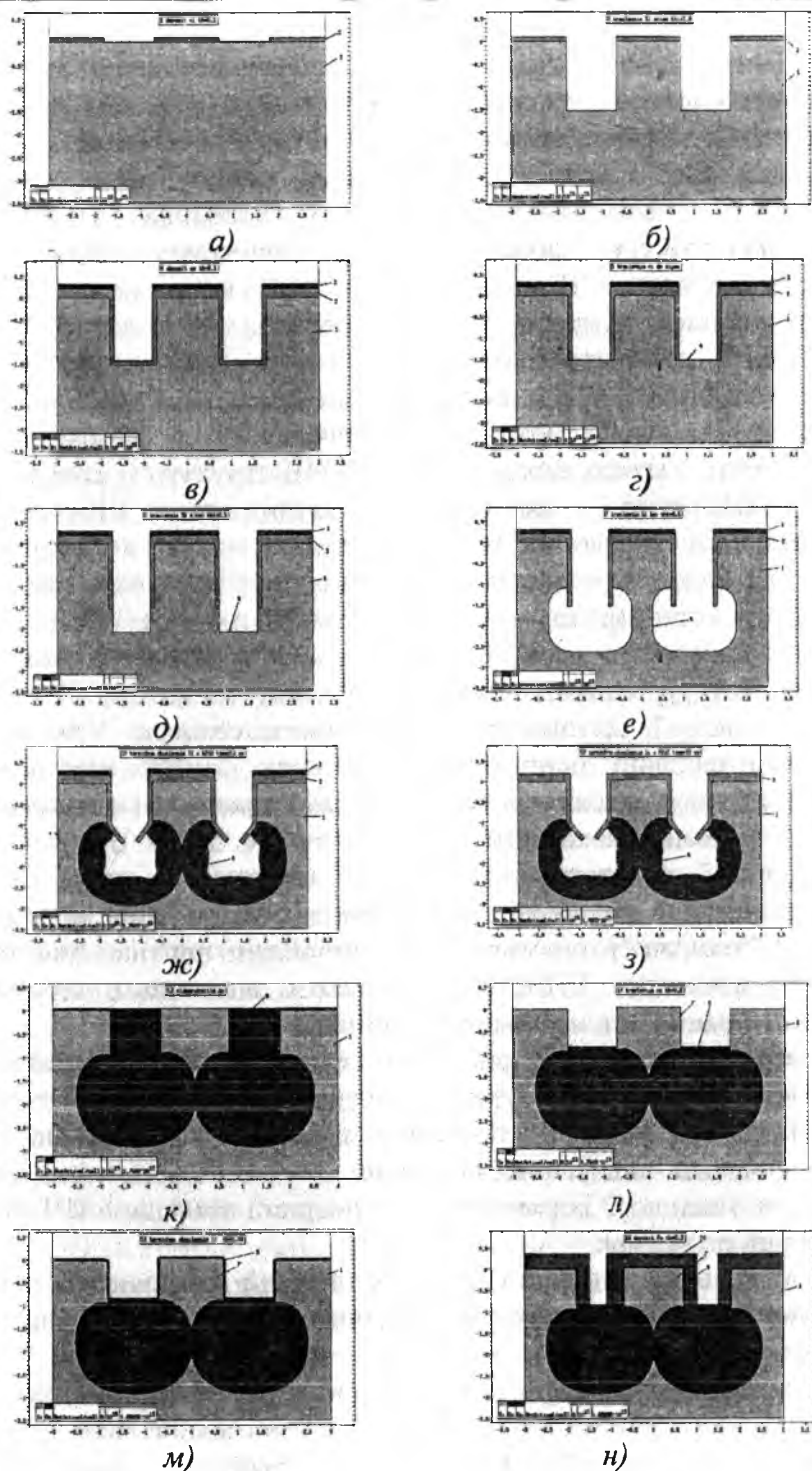


Рис. 1. Базові технологічні операції формування локальних тривимірних КНІ-структур локальним термічним окисленням порожнин під поверхнею кремнієвої пластини: 1 – кремнієва пластинка; 2 – локальні ділянки півки нітриду кремнію  $Si_3N_4$ ; 3 – осаджений шар  $SiO_2$ ; 4 – дно щілини в пластині; 5 – нижня частина незахищеної поверхні щілини після бокового плазмохімічного травлення кремнію; 6 – термічний  $SiO_2$  поверхні порожнини; 7 – локальна тривимірна КНІ-структура; 8 – осаджений планаризаційний  $SiO_2$ ; 9 – термічний підзатворний  $SiO_2$ ; 10 – тривимірний полікремнієвий затвор МОН-транзистора (на поперечних перетинах КНІ-структур подані горизонтальні і вертикальні шкали в мікрометрах для оцінки реальних топологічних розмірів елементів та їх товщин)

в) повторне осадження шару  $Si_3N_4$  товщиною 0,02 мкм, осадження шару  $SiO_2$  товщиною 0,1 мкм та формування фотолітографією і ПХТ маскуючих ділянок на горизонтальній поверхні кремнієвої пластини;

г) анізотропне плазмохімічне травлення  $Si_3N_4$  на дні протравлених щілин у кремнієвій пластині;

д) анізотропне плазмохімічне травлення  $SiO_2$  для збільшення висоти протравлених щілин у кремнієвій пластині на 0,5 мкм;

е) ізотропне травлення кремнію на глибину 0,5 мкм для створення об'ємних заглиблених порожнин під поверхнею кремнієвої пластини;

ж) термічне окислення кремнію впродовж 90 хв для створення ізолюваних від пластини тривимірних локальних областей кристалічного кремнію;

з) травлення  $SiO_2$  товщиною 0,1 мкм;

к) осадження піролітичного  $SiO_2$  розкладом моносилану для заповнення порожнин та щілин і планаризації поверхні;

л) травлення піролітичного  $SiO_2$  в щілинах на глибину 0,8 мкм з отриманням тривимірних локальних КНІ-структур, придатних для створення приладів, наприклад, КНІ МОН-транзисторів;

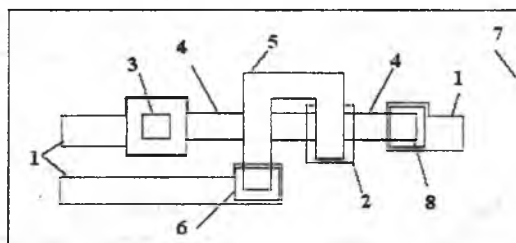
м) термічне окислення тривимірної поверхні локальної КНІ-структури для одержання підзатворного діелектрика КНІ МОН-транзистора з тривимірною поверхнею підзатворної області;

н) осадження шару полікремнію, його легування для зменшення поверхневого опору та фотолітографії для одержання КНІ МОН-транзистора з тривимірною конфігурацією затвора.

Отже, як видно з результатів приладно-технологічного моделювання, запропонованим методом можна формувати локальні тривимірні КНІ-структури, а саме ділянки кристалічного кремнію, ізолювані від пластини окислом кремнію, сформованим на заданій глибині під поверхнею пластини в порожнинах, і створювати на цій основі мікроелектронні пристрої. Наприклад, МОН-прилади як зі стандартними, планарними конструкціями на поверхні локальних ділянок КНІ-структур, так і з об'ємними, тривимірними архітектурами, наприклад затвором, який може бути сформований як на поверхні, так і на бокових вертикальних стінках КНІ-структур. Окрім цього, локальні тривимірні КНІ-структури, формування яких є "прив'язаним" до топології мікроелектронних пристроїв, завдяки повній діелектричній ізоляції елементів, а також додатковим можливостям використання порожнин у приладній поверхні пластини, можуть успішно застосовуватися як вихідний матеріал для проектування мікросенсорів, елементів мікросистемної техніки, створення інтегрованих МСК, монолітної інтеграції як КНІ-приладів, так і стандартних, об'ємних на ділянках кристала, вільних від КНІ-структур.

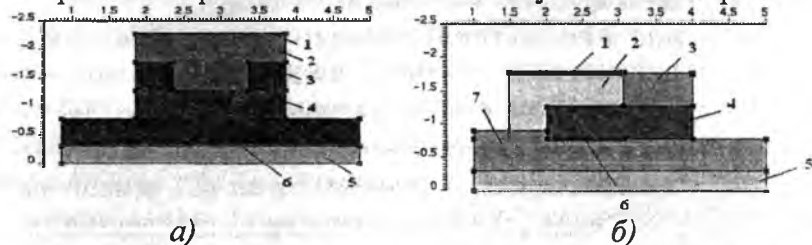
**Розробка і моделювання елементів приладних КНІ-структур.** На основі отриманих КНІ-структур, були розроблені деякі інтегральні елементи та досліджувались їх параметри та характеристики шляхом моделювання [6]. Так, на рис. 2 зображено схематичну топологію КНІ МОН-

транзистора з тривимірною конфігурацією затвора, планарними і тривимірними контактами.



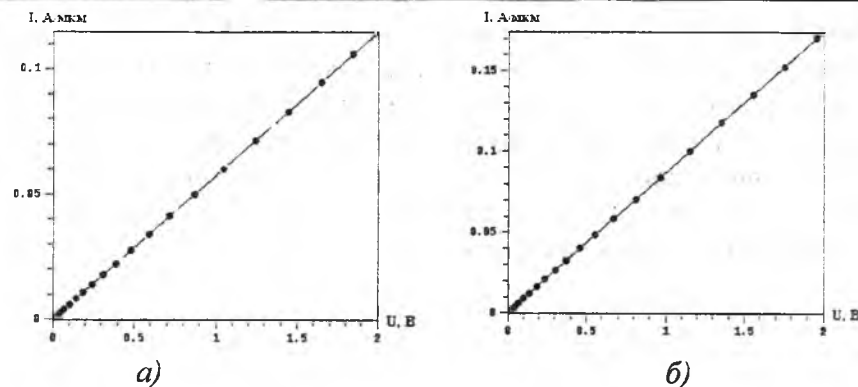
**Рис. 2.** Схематична топологія тривимірного КНІ МОН-транзистора з різними типами контактів до його електродів: 1 – металеві шини; 2 – контактне вікно в підзатворному діелектрику; 3, 6, 8 – контактні вікна в міжшаровому ізоляційному діелектрику в оксиді кремнію; 4 – стік-витоківі області КНІ МОН-транзистора; 5 – полікремнієвий затвор КНІ МОН-транзистора; 7 – поверхня оксиду кремнію в структурі КНІ

На рис. 2, елементами 1, 3 і 4 утворено традиційний планарний контакт між шаром металу й кремнієвою шиною (стік КНІ МОН-транзистора). Елементи 1, 8 і 4 утворюють тривимірний контакт між шаром металу й кремнієвою шиною (витік КНІ МОН-транзистора), поперечний перетин якого зображено на рис. 5. Елементи 1, 6 і 5 утворюють тривимірний контакт між шарами металу і затворного полікремнію, а елементами 5, 2 і 4 утворено тривимірний контакт між шаром затворного полікремнію і кремнієвою шиною витіку КНІ МОН-транзистора.



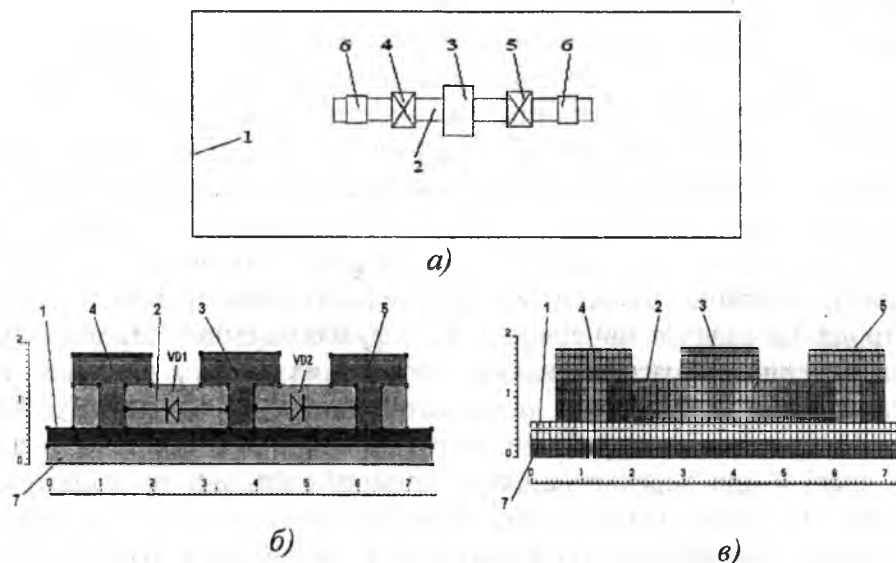
**Рис. 3.** Планарний (а) та тривимірний (б) контакти в КНІ-структурі: 1 – фізичний контакт (анод для проведення моделювання), 2 – шар металу, 3-шар SiO<sub>2</sub>; 4-шар полікремнію, 5 – кремнієва підкладка, 6 – фізичний контакт (катод), 7 – плівка SiO<sub>2</sub> (елементи 4, 5 і 7 утворюють КНІ-структуру)

Порівняльні вольт-амперні характеристики (ВАХ) планарного та тривимірного контактів між алюмінієм та кремнієвою плівкою в КНІ-структурі з однаковими планарними розмірами контактів та концентраціями легуючої домішки зображені відповідно на рис. 4. а) і б). Як видно з наведених характеристик, провідність тривимірного контакту в 1,5 раза є кращою порівняно з планарним для площі контакту 1x1мкм 2 і товщині кремнієвої плівки в КНІ-структурі 0,5 мкм.



**Рис. 4.** ВАХ планарного (а) та тривимірного (б) контактів у КНІ-структурі

На рис. 5 зображено розроблений оригінальний ключовий елемент на діодах Шотткі [7]. Технологія його виготовлення є такою. У вихідній КНІ-структурі, одержаній описаним вище методом, фотолітографією і травленням в одному технологічному циклі формують міжелементні ізолюючі канавки 6 згідно з топологією, поданою на рис. 5. Проводять легування плівки кремнію для активної n-області елемента з концентрацією домішки  $10^{14}$ – $10^{15}$  см<sup>-3</sup> з метою формування на бокових вертикальних гранях канавки в КНІ-плівці діодів Шотткі. Для створення контактів до стік-витоківі областей КНІ-плівку у відповідних областях легують домішкою n-типу провідності до концентрацій  $10^{18}$ – $10^{19}$  см<sup>-3</sup>. Після напилення шару алюмінієвої металізації, фотолітографії й температурного відпалу одержують даний елемент.



**Рис. 5.** Ключовий елемент на діодах Шотткі зі структурами КНІ: а) схематична топологія; б) поперечний перетин структури, який використовувався для комп'ютерного моделювання; в) концентраційний розподіл домішок, одержаний у результаті моделювання: 1 – поверхня SiO<sub>2</sub> в КНІ структурі; 2 – смужка з плівки кремнію в структурі КНІ; 3 – керуючий електрод (затвор); 4, 5 – стік-витоківі області ключового КНІ-елемента; 6 – міжелементні ізолюючі канавки в смужці кремнію; 7 – кремнієва пластина (елементи 2, 1 і 7 утворюють структуру КНІ)

Результати комп'ютерного моделювання свідчать, що в разі подачі позитивної напруги на стік 5 і заземленні витоку 4 та затвору 3 струм стоку буде рівним струму обернено-зміщеного діода Шоттки VD2. У випадку подачі напруги або струму на керуючий затвор суттєво змінюються властивості збідненої області закритого діода Шоттки VD2, і він починає відкриватися та проводити струм. Діод VD1 при цьому має пряме включення з низьким опором.

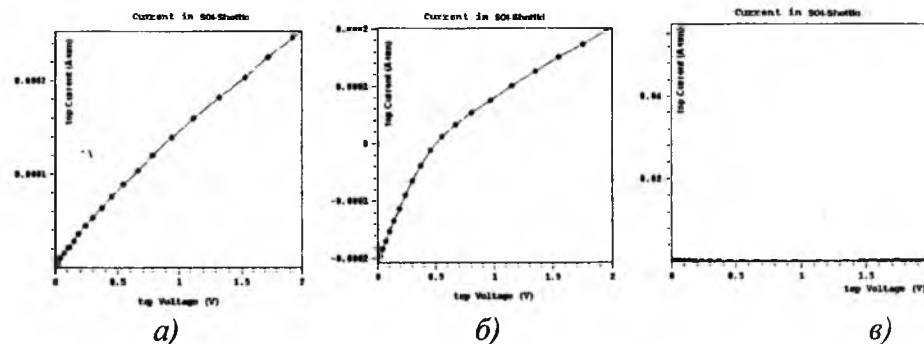


Рис. 6. ВАХ ключового КНІ-елемента на діодах Шоттки в діапазоні напруг 0 – 2 В між витоком 4 і стоком 5 відповідно (до рис. 5) а) – при нульовому зміщенні затвора; б) – при зміщенні затвора 0.5 В; в) – при зміщенні затвора мінус 1 мВ

Отже, конструкція, в якій керуючий електрод ключового КНІ-елемента утворений на основі діодів Шоттки (на слабколегованих вертикальних стінках вузької канавки) та омичних контактів до стік-витокових областей до сильнолегованих вертикальних стінок у сусідніх до керуючого електрода канавках з ізоляцією ключового елемента вузькими канавками, заповненими окислом, дозволяє суттєво зменшити геометричні розміри елемента в цілому, що підвищить ступінь інтеграції на кристалі, а реалізації керуючого електрода з металу між двома зворотно-включеними діодами Шоттки дозволяє одержати високу швидкодію пристрою. У цьому елементі на основі КНІ-структур, керуючий електрод виконує функцію затвора (бази) і виконаний із металу, тому його ширина фактично не впливатиме на транспортування носіїв в тілі цього електрода. Це означає, що відсутність дифузійних ємностей, пов'язаних із накопиченням і розсмоктуванням неосновних носіїв у тілі такого керуючого електрода суттєво підвищить швидкодію ключового КНІ-елемента при змінах струмів чи напруг у колі керуючого електрода, в тому числі й при переключеннях із прямого напрямку на зворотний і навпаки. Час таких переключень буде визначатися тільки бар'єрними ємностями переходів Шоттки, і, оскільки, в даному елементі ці діоди реалізовані на вертикальних стінках КНІ-плівки, їх площа буде дуже малою, тому час переключень таких елементів за попередніми оцінками становитиме одиниці й десяті долі пікосекунд. Важливою перевагою таких пристроїв буде й те, що для них характерне значно менше пряме падіння напруги порівняно зі стандартним дифузійним p-n-переходом.

Реалізація даного елемента з використанням вузьких субмікрометрових і нанометрових канавок для створення областей стоку, витоку і затвора, а також і міжелементної ізоляції дозволить суттєво зменшити загальні топологічні розміри на кристалі, тобто суттєво підвищити ступінь елементної інтеграції. Технологія створення таких елементів є відносно простою й фактично сумісною з виготовленням МОН-транзисторів, що відкриває додаткові можливості для конструювання нових приладних структур, логічних чи цифрових елементів ІС, пристроїв сенсорної та мікросистемної техніки, створення базових матричних кристалів, надшвидкодіючих ключових елементів для вихідних каскадів ІС.

**Висновки.** Результати приладно-технологічного моделювання свідчать, що запропонованим способом можливо формувати локальні тривимірні структури типу “кремній-на-ізоляторі” (КНІ) та виготовляти на цій основі активні приладні елементи, зокрема тривимірні, як для ІС, сенсорної мікроелектроніки й пристроїв мікросистемної техніки (МСТ) та їх монолітної інтеграції при створенні МСК. На отриманих таким методом структурах розроблено й промодельовано як планарні, так і тривимірні інтегральні елементи, зокрема МОН-транзистор із тривимірним затвором, тривимірні контакти, оригінальний ключовий елемент на діодах Шоттки. Тому локальні тривимірні КНІ-мікроструктури, формування яких є “прив'язаним” до топології мікроелектронних пристроїв, можуть застосовуватися для проектування мікросенсорів, елементів МСТ, інтегрованих МСК.

1. Перспективы развития микросистемной техники в XXI веке / Д. М. Климов, А. А. Васильев, В. В. Лучинин, П. П. Мальцев // Микросистемная техника. – 1999. – № 1. – С. 3–6.
2. Вербицкий В. Г. Ионные нанотехнологии в электронике : монография / В. Г. Вербицкий. – К. : МП Леся, 2002. – С. 7–8.
3. Collinge Jean-Pierre. Silicon-on-Insulator Technology : materials to VLSI / Jean-Pierre Collinge. – 2<sup>nd</sup> Edition by Kluwer Academic Publishers, 1997.
4. Physical and Technical Problems of SOI Structures and Devices / J.-P. Collinge, V. S. Lysenko, A. N. Nazarov ; 1995 Kluwer Academic Publishers, Printed in Netherlands. NATO ASI Series 3 : High Technology. – 1995. – Vol. 4. – P. 41–48.
5. Druzhynin A. Digital CMOS ARRAY based on SOI Structures / A. Druzhynin, I. Kogut // Electron Technology. – Warszawa. – 1999. – Vol. 32, No 1–2. – P. 142–145.
6. Контакт в інтегральних пристроях зі структурами “кремній-на-ізоляторі” : патент України на корисну модель № 29701UA / Когут І. Т., Дружинін А. О., Голота В. І. – Опубл. 25.01.08, Бюл. № 1.
7. Ключовий елемент на діодах Шоттки зі структурами “кремній-на-ізоляторі” : патент України на корисну модель № 29698UA / Когут І. Т., Голота В. І., Дружинін А. О. – Опубл. 25.01.08, Бюл. № 1.

## LOCAL KHI-STRUCTURES – PERSPECTIVE MATERIAL FOR INTEGRATED MIKROCISTEM-ON-CRYSTAL

I.T. Cogut

*PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine,  
ph. (0342) 71 48 48, e-mail: micro@il.if.ua*

*An original method of fabrication of the local 3-dimensional "silicon-on-insulator" (SOI) structures is developed and a device-technological simulation for this method is provided. It's showed, on the base of such structures are possibilities for creating the different elements of integrated microsystem-on-chip to design with the standart, planar constructions, as well as with the 3-dimensional architectures. On the base of such SOI-structures some microsystem elements were developed and their electrical characterics were investigated.*

**Key words:** *silicon-on-insulator(SOI), microsystem-on-chip, device technological simulation, 3-D elements.*

УДК 621.38

## МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННОЇ ОПТИКИ АВТОЕМІСІЙНИХ МІКРОКАТОДІВ

В.І. Голота

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57*

*Проаналізовано особливості автоелектронної емісії напівпровідників. Розраховано методом скінчених різниць розподіл потенціалів і напруженості електростатичного поля автоемісійних мікрокатодів. Розроблено методику розрахунку траєкторій руху електронів з урахуванням просторового заряду.*

**Ключові слова:** *автоелектронна емісія, електростатичне поле, просторовий заряд, траєкторія руху електронів.*

**Вступ.** Електронно-оптичне моделювання є важливим етапом у розробці автоемісійних мікрокатодів [1]. Автоемісійні мікрокатоди використовуються в бортових засобах відображення інформації та в цифровій літографії під час виробництва інтегральних схем. Електронно-оптична система мікрокатада керує автоемісією та формує електронні пучки. Траєкторії та енергія електронних пучків повинні забезпечувати однорідну та достатню експозицію пікселів, а іонних пучків – запобігати перегріванню та розпорошенню вістрь мікрокатодів. Значення потенціалів, прикладених до мікрокатодів та електродів, а також геометрія міжелектродного простору визначають як розподіл електростатичного поля, так і траєкторії руху електронів, тому для їхнього моделювання потрібні різні математичні моделі, числові методи та їх програмні реалізації [2]. Так, у програмах комп'ютерної математики [3] і мультифізичного моделювання [4] реалізовані розв'язувачі рівнянь Лапласа/Пуассона, що дає змогу моделювати електростатичні поля. Спеціалізовані програми [5; 6] уможливають і моделювання електростатичних полів, і інтегрування рівнянь руху заряджених частинок, проте враховують емісії цих частинок. Об'єднання моделей руху електронів в електростатичних полях із моделями автоемісії напівпровідників у вакуумі може дати якісно нові результати. Тому проведення комплексного моделювання електронної оптики кремнієвих автоемісійних мікрокатодів є актуальною задачею.

**Автоелектронна емісія напівпровідників.** Перші дослідження з автоелектронної емісії проводилися для металів [7]. На даний час для розрахунку густини струму автоелектронної емісії металів (в А/см<sup>2</sup>) використовується рівняння Фаулера–Нордгейма:

$$J(E) = \frac{A \cdot E^2}{\phi \cdot t^2(y)} \exp\left(-B \cdot \frac{\phi^{3/2}}{E} \cdot v(y)\right), \quad (1)$$



де  $A=1,54 \times 10^{-6}$ ;  $B=6,87 \times 10^7$ ;  $y=3,79 \times 10^{-4} \cdot \sqrt{E}/\phi$ ;  $t^2(y) \cong 1,1$ ;  $v(y) = 0,95 - y^2$ ;  $\phi$ , eВ;  $E$ , В/см;  $\phi$  – робота виходу електрона з металу;  $E$  – напруженість електричного поля біля поверхні катода;  $t^2(y)$  і  $v(y)$  – еліптичні функції, які враховують пониження потенціального бар'єра.

Рівняння (1) отримано з таких припущень: заповненість енергетичних рівнів вільними електронами описується статистикою Фермі–Дірака, автоемісія електронів відбувається з рівня Фермі; поза металом на електрони діють тільки сили дзеркального відображення й зовнішнє електричне поле.

Теорія автоелектронної емісії металів застосовується й до напівпровідників [8]. Проте при цьому необхідно врахувати наявність зони провідності й валентної зони, діелектричні властивості напівпровідника, проникнення електричного поля в напівпровідник та утворення поверхневого акумуляційного шару електронів. При автоелектронній емісії з напівпровідника тунелювання електронів можливе як із зони провідності, так із валентної зони. Для електронів зони провідності висота поверхневого потенціального бар'єра дорівнює електронній спорідненості  $\chi$ , а для валентної зони –  $\chi + E_g$ . Ураховуючи діелектричні властивості напівпровідника, уточнюється потенціал електростатичного відображення і значення  $y$  [9]:

$$V(x) = -\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \cdot \frac{e^2}{4x}, \quad y' = \left( \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 1} \right)^{1/2} \cdot y, \quad (2)$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність напівпровідника.

Приймаючи  $\phi = \chi + E_g$  і підставляючи  $y'$  в (1), розраховується густина струму автоелектронної емісії з валентної зони напівпровідника.

Під час розрахунку густини струму автоелектронної емісії із зони провідності враховується проникнення зовнішнього електричного поля в напівпровідник, яке викликає згин зон. При цьому дно зони провідності опускається нижче рівня Фермі  $\mu$  (у напівпровідниках  $n$ -типу провідності) на величину  $V_0$ , і утворюється поверхневий акумуляційний шар електронів 5 (рис. 1).

За достатньо сильних електричних полів поверхневий акумуляційний шар електронів стає виродженим, і найвищий енергетичний рівень, заповнений електронами, збігається з рівнем Фермі. У цьому випадку ефективна робота виходу електрона зменшується на  $\mu - V_0$ . Оскільки  $\mu - V_0 = vE^{4/5}$ , то  $\phi = \chi - vE^{4/5}$ , де  $v = 4,5 \times 10^{-7} \varepsilon^{-2/5}$  [10]. Підставлянням  $\phi$  в (1) розраховується густина струму автоелектронної емісії із зони провідності напівпровідника.

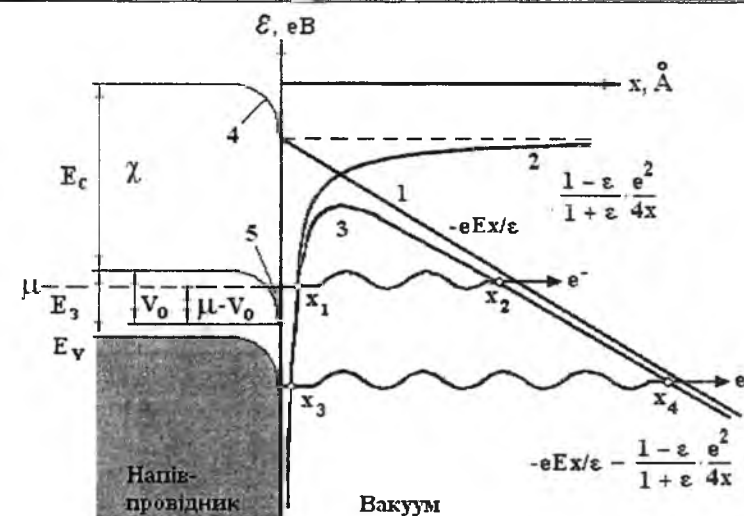


Рис. 1. Потенціальний бар'єр при автоелектронній емісії з напівпровідників: 1 – з урахуванням зовнішнього електричного поля; 2 – з урахуванням сил електростатичного відображення; 3 – з урахуванням 1 і 2; 4 – згин зон; 5 – поверхневий акумуляційний шар електронів

Напруженість електричного поля неоднорідна на поверхні мікрокатода, тому для визначення загального струму необхідно інтегрувати рівняння (1) по всій емісійній поверхні.

**Розрахунок напруженості електричного поля.** Рівняння (1) містить напруженість електричного поля на поверхні мікрокатода. Напруженість електростатичного поля  $E$  пов'язана з градієнтом потенціалу  $U$  векторним рівнянням  $E = -grad U$ , а розподіл потенціалу у вакуумі з просторовим зарядом описується рівнянням Пуассона [11]:

$$\frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial z^2} = -\frac{\rho_c}{\varepsilon_0 \varepsilon}. \quad (3)$$

Для області, яка не містить заряду,  $\rho_c = 0$  (3) перетворюється в рівняння Лапласа.

У методі скінчених різниць апроксимація рівняння (3) для прямокутної рівномірної сітки з початком координат у нижньому лівому куті й п'ятиточковою розрахунковою схемою (рис. 2, а), на ітерації  $n$  має вигляд

$$V_{i,j}^n = \frac{1}{4} (U_{i+1,j}^{n-1} + U_{i,j+1}^{n-1} + U_{i-1,j}^n + U_{i,j-1}^n). \quad (4)$$

Комірки, на яких задаються граничні умови, зазвичай мають нерегулярну сітку (рис. 2, б). Так, наприклад, вузли 1, 2 і 4 визначають поверхні електродів, і для них задано потенціали  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_4$ , а вузол  $U_3$  є внутрішнім, і потенціал його розрахований. Вузли 1, 2, 3, 4 знаходяться на різних відстанях від вузла 0, тому потенціал  $U_0$  обчислюється з рівняння [12]:

$$\frac{2}{h_1 + h_3} \left( \frac{U_1}{h_1} + \frac{U_3}{h_3} \right) + \frac{2}{h_2 + h_4} \left( \frac{U_2}{h_2} + \frac{U_4}{h_4} \right) - \left( \frac{2}{h_1 h_2} + \frac{2}{h_2 h_4} \right) U_0 = 0. \quad (5)$$

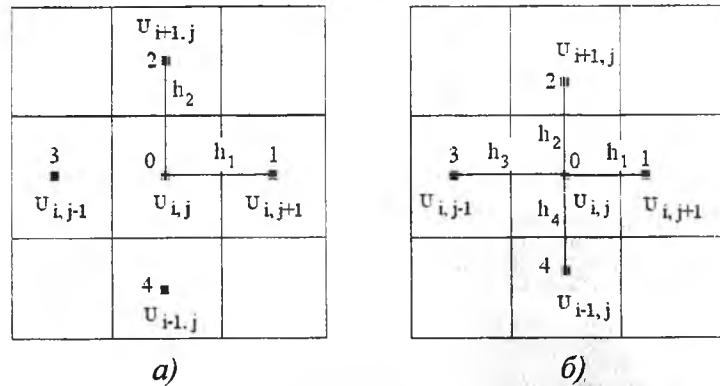


Рис. 2. Комірка координатної сітки в методі скінчених різниць: а) прямокутна, рівномірна ( $h_1 = h_2$ ); б) нерегулярна ( $h_1 \neq h_2 \neq h_3 \neq h_4$ )

Розбиваючи міжелектродний простір на скінчене число комірок та задаючи граничні умови для потенціалів на катоді, аноді й електродах, ітераційним методом розраховуються значення потенціалів поля для всіх внутрішніх точок сітки. За відомими значеннями потенціалів будуються еквіпотенціальні поверхні й визначаються градієнти. Результати розрахунку напруженості електричного поля для мікрокатода з екстракційним електродом зображено на рис. 3.

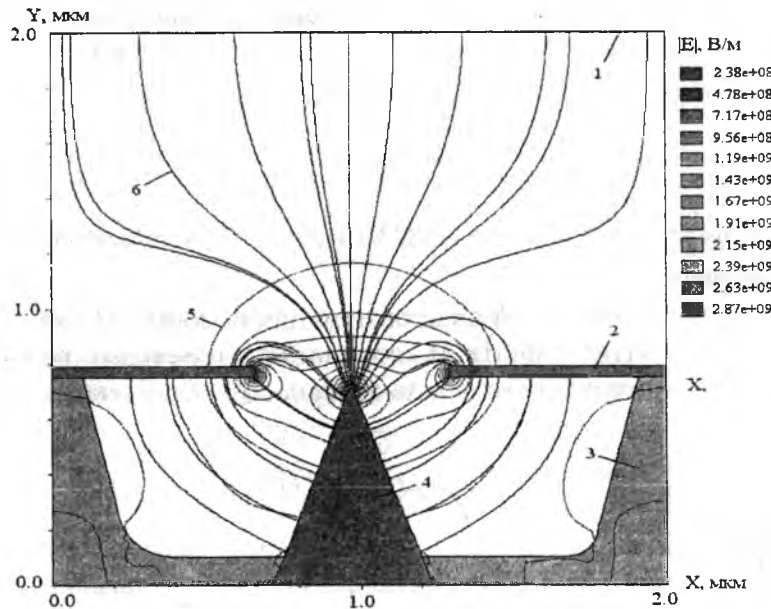


Рис. 3. Напруженість електричного поля одноелектродного кремнієвого автоемісійного мікрокатода: 1 – анод  $U = 10$  В; 2 – екстракційний електрод  $U = 0$  В; 3 – оксид кремнію; 4 – кремнієвий катод  $U = -80$  В; 5 – лінії модуля напруженості електричного поля; 6 – силові лінії електричного поля

Електростатичні розрахунки дають розподіл напруженості електричного поля в міжелектродному просторі, а також змогу уточнити значення потенціалів, які необхідні для автоемісії з мікрокатода.

**Розрахунок траєкторій електронів.** Рух електронів в електростатичному полі описується рівнянням руху у формі Ньютона [12]:

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = e\vec{E}. \quad (6)$$

Рівняння (6) використовується у формі проєкцій на координатні осі

$$m\ddot{x} = eE_x, \quad m\ddot{y} = eE_y, \quad m\ddot{z} = eE_z. \quad (7)$$

Рівняння (7) можна записати у вигляді задачі Коші 2-го порядку. Так, для проєкції на координатну вісь  $X$  отримаємо:

$$\ddot{x}(t) = f(t, x(t), \dot{x}(t)), \quad x(t_0) = x_0, \quad \dot{x}(t_0) = V_0. \quad (8)$$

Оскільки  $\ddot{x} = \dot{V}(t)$ , то (8) перетворюється в систему рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = V \\ \frac{dV}{dt} = f(t, c, V) \end{cases}, \quad \begin{cases} x(t_0) = x_0 \\ V(t_0) = V_0 \end{cases}. \quad (9)$$

Система рівнянь (9) розв'язується стандартним методом Рунге-Кутта порядку  $N = 4$ , при цьому вона буде генеруватися дві послідовності -  $\{x_k\}$  і  $\{V_k\}$  [13]:

$$V_{k+1} = V_k + 1/6 \cdot h(f_1 + 2f_2 + 2f_3 + f_4), \quad (10)$$

$$f_1 = f(t_k, V_k), \quad f_2 = f(t_k + 1/2 \cdot h, V_k + 1/2 \cdot f_1),$$

$$f_3 = f(t_k + 1/2 \cdot h, V_k + 1/2 \cdot f_2), \quad f_4 = f(t_k + h, V_k + hf_3).$$

Перша послідовність буде числовим розв'язком задачі (8). Розраховані траєкторії електронів для 30 точок емісії на поверхні одноелектродного мікрокатода без урахування просторового заряду показано на рис. 4, а.

У результаті автоемісії електрони потрапляють у міжелектродний простір, прискорюються електростатичним полем і під час руху створюють просторовий заряд. Послідовність розрахунку траєкторій електронів з урахуванням просторового заряду для системи електростатичних електродів, призначених для вимірювання високого вакууму, описано в [14]. З незначними змінами її можна застосувати й для розрахунків траєкторій електронів у міжелектродному просторі мікрокатода. Послідовність розрахунку складається з таких кроків:

1. Розбиття міжелектродного простору на скінчене число комірок; задання потенціалів на мікрокатоді, аноді й електродах; вибір розрахункового кроку за часом  $dt = 10^{-16}$  с; ініціалізація лічильника ітерацій  $k = 0$ .

2. Розрахунок просторового заряду  $Q$ , розподіленого в міжелектродному просторі.

3. Розрахунок потенціалів і напруженості електричного поля в кожній комірці без урахування просторового заряду.

4. Розрахунок траєкторій електронів й акумульованого часу перебування електронів у кожній комірці без урахування просторового заряду.

5. Розрахунок розподілу просторового заряду по комірках на ітерації  $k = k + 1$ .

6. Розрахунок потенціалів і напруженості електричного поля в кожній комірці з врахуванням просторового заряду.

7. Розрахунок траєкторій електронів й акумульованого часу перебування електронів у кожній комірці з врахуванням просторового заряду.

8. Усереднення розподілу просторового заряду комірок на ітераціях  $k-1, k$ .

9. Визначення збіжності розподілу просторового заряду комірок і у випадку її відсутності перехід на крок 5.

10. Виведення результатів розрахунку траєкторій електронів.

Величина просторового заряду  $Q$ , розподіленого в міжелектродному просторі, приймається як параметр, оскільки розраховуються траєкторії тільки для заданої кількості електронів, заряд яких значно менший від заряду всіх електронів.

Розподіл просторового заряду по комірках визначається за формулою

$$\rho_{i,j} = Q \frac{t_{i,j}^k}{\sum_{i,j} t_{i,j}^k}, \quad (11)$$

де  $t_{i,j}^k$  – акумульований час перебування електронів у  $i,j$ -комірці на ітерації  $k$ .

Для спрощення розрахунків прийнято низку припущень. Так, траєкторії електронів розраховуються тільки для заданої кількості точок емісії на поверхні мікрокатода. Початковий напрямок руху електронів приймається перпендикулярним до поверхні мікрокатода, а початкова швидкість – нульовою. Якщо електрон ударяється в поверхні, які обмежують розрахункову область, то він поглинається без відбиття й вторинної емісії. Акумульований час перебування електронів у комірці визначається для всіх траєкторій, що проходять через цю комірку.

Результати розрахунку траєкторій електронів для 30 точок емісії на поверхні одноелектродного мікрокатода з урахуванням просторового заряду зображено на рис. 4, б.

Як видно з рис. 4, б, урахування просторового заряду спричиняє взаємне відштовхування електронних променів, що суттєво викривляє їх траєкторії. Оскільки мікрокатод з одним екстракційним електродом під час автоемісії утворює розбіжний пучок електронів, то для експозиції пікселів заданої форми й розмірів на фоторезисті, який розміщений у площині анода, потрібен додатковий фокусуючий електрод. Результати розрахунку траєкторій електронів для 30 точок емісії на поверхні мікрокатода з додатковим фокусуючим електродом і з урахуванням просторового заряду показано на рис. 5.

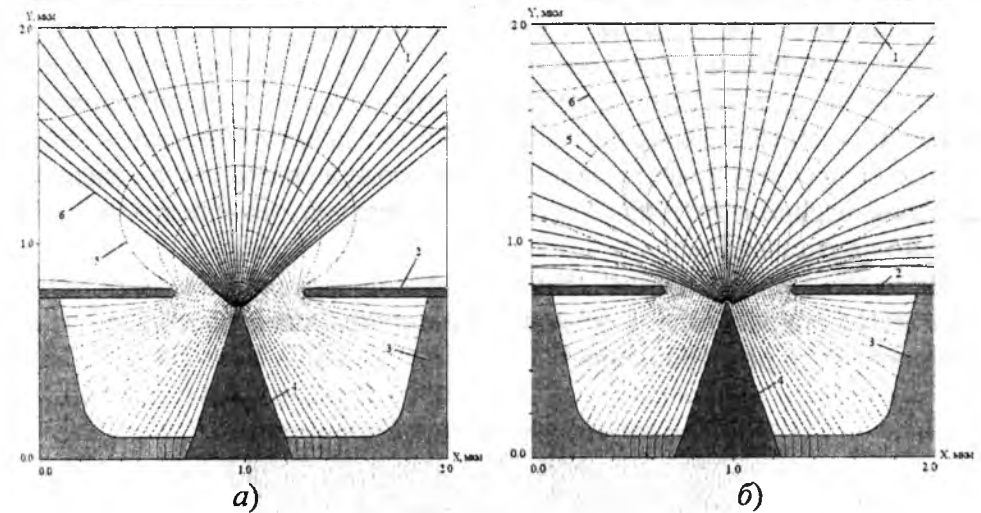


Рис. 4. Траєкторії електронів: а) без урахування просторового заряду; б) з урахуванням просторового заряду; 1 – анод  $U = 10$  В; 2 – молібденовий екстракційний електрод  $U = 0$  В; 3 – оксид кремнію; 4 – кремнієвий катод  $U = -80$  В; 5 – екіпотенціальні поверхні; 6 – траєкторії електронів

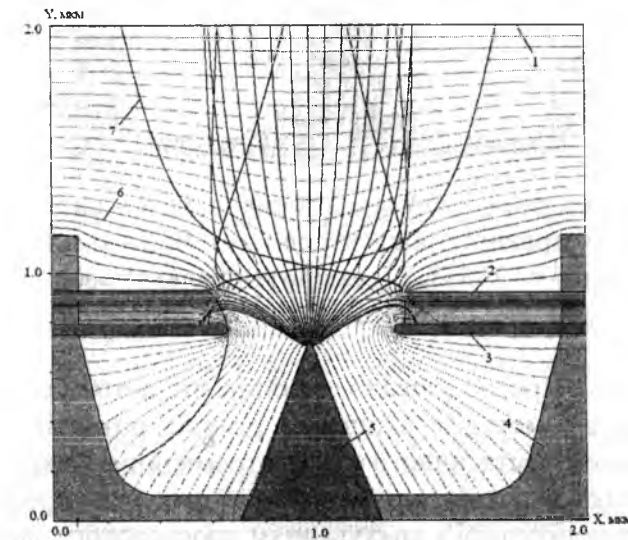


Рис. 5. Траєкторії електронів: 1 – анод  $U = 10$  В; 2 – полікремнієвий фокусуючий електрод  $U = -250$  в; 3 – молібденовий екстракційний електрод  $U = 0$  В; 4 – оксид кремнію; 5 – кремнієвий катод  $U = -250$  В; 6 – екіпотенціальні поверхні; 7 – траєкторії електронів

Як видно з рис. 5, додатковий електрод 2 дає змогу сфокусувати електронні промені й забезпечити практично однорідну експозицію піксела розміром  $0,8$  мкм. Електрод 2 необхідно розміщувати на найменшій віддалі, яка визначається приблизною напругою оксиду кремнію, від електрода 3 для зменшення струмів протікання.

Для автоемісії електронів із мікрокатода потрібний високий вакуум із тиском залишкових газів  $1,33 \cdot 10^{-5} \div 1,33 \cdot 10^{-7}$  Па. Кінетична енергія електронів визначається прискорюючими потенціалами на електродах мікрокатода і є достатньою для іонізації молекул залишкових газів. Аналогічно до розрахунку траєкторій електронів можна розрахувати траєкторії позитивно заряджених іонів. Результати розрахунку траєкторій іонів зображено на рис. 6.

Як видно з рис. 6, найінтенсивнішому бомбардуванню іонами піддається вістря мікрокатода, і це може спричинити значне теплове навантаження та його розпоршення.

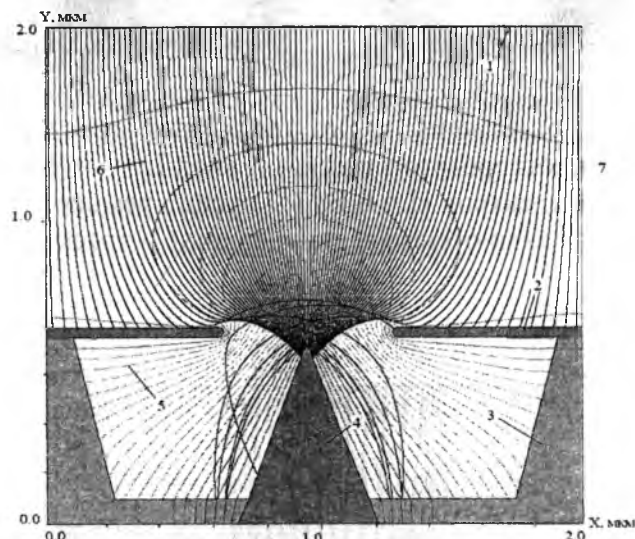


Рис. 6. Траєкторії позитивно заряджених іонів: 1 – анод  $U = 10$  В; 2 – молибденовий екстракційний електрод  $U = 0$  В; 3 – оксид кремнію; 4 – кремнієвий катод  $U = -250$  В; 5 – екіпотенціальні поверхні; 6 – траєкторії іонів

**Висновки.** Проаналізовано особливості автоемісії напівпровідників. Розраховано методом скінчених різниць розподіл потенціалів і напруженості електростатичного поля автоемісійних мікрокатодів. Розроблено методику й розраховано траєкторії руху електронів та іонів у міжелектродному просторі з урахуванням просторового заряду. Показано, що врахування просторових зарядів суттєво впливає на результати розрахунку електронної оптики автоемісійних мікрокатодів.

1. Абаньшин Н. П. Исследование механизма ионного нагружения острийных эмиттеров автоэмиссионных структур / Н. П. Абаньшин, Б. И. Горфинкель, А. Н. Якунин // Письма в ЖТФ. – 2006. – Т. 32, № 20. – С.52–59.
2. Молоковский С. И. Интенсивные электронные и ионные пучки / С. И. Молоковский, А. Д. Сушков. – 2-е изд. – М. : Энергаториздат, 1991. – 302 с.

3. Семененко Н. Г. Введение в математическое моделирование. Maple, Mathematica, MATLAB / Н. Г. Семененко. – М. : Солон, 2002. – 112 с.
4. Femlab Multiphysics // [www.comsol.com](http://www.comsol.com)
5. Simion, Lorentz. Advanced electrostatic/magnetic fields and trajectories particles simulation // [www.simiom.com](http://www.simiom.com).
6. Software products for simulating charged-particle beam // [www.field.com](http://www.field.com).
7. Fowler R. H. Electron emission in intense electric fields / R. H. Fowler, L. W. Nordheim // Proc. R. Soc. Ser. A. – 1928. – Vol. 119, No 781. – P. 173.
8. Stratton R. Field emission from semiconductor / R. Stratton // Proc. Phys. Soc. London. – 1955. – V. B 68. – P. 746–757.
9. Jackson J. D. Classical electrodynamics / J. D. Jackson. – 2-nd ed. – John Willey & Sons, Inc. – 1975.
10. Kittel Charles. Introduction to Solid State Physics / Charles Kittel. – 7th ed. – John Willey & Sons, Inc. – New York. – 1996.
11. Бинск К. Анализ и расчет электрических и магнитных полей / К. Бинск, П. Лауренсон : пер. с англ. – 1970. – 376 с.
12. Molokovsky S. I. Intense Electron and Ion Beams / S. I. Molokovsky, A. D. Sushkov. – Berlin ; Heidelberg : Springer-Verlag, 2005. – 285 p.
13. Джон Г. Метьюз. Численные методы. Использование MATLAB / Джон Г. Метьюз, Куртин Д. Финк ; пер. с англ. – 3-е изд. – М. : Изд. дом “Вильямс”, 2001. – 720 с.
14. Computer simulation of electron trajectories with the space charge in cascade static lens gauge / T. Mitsui, T. Urano, M. Tanaka, T. Kanaji // Applied Surface Science. – 2001. – Vol. 169–170. – P. 747–751.

## DESIGN OF ELECTRONIC OPTICS AVTOEMISIYNIH MICROCATODIV

V.I. Golota

PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine

*It is analyzed field emission of semiconductors. Allocation of potentials and intensity of an electric field of field emission microcathodes are calculated by a method of finite differences. The design procedure of electrons motion trajectories in view of a spatial charge is developed.*

**Key words:** field emission, electric field, spatial charge, electrons motion trajectories.

## ЕЛЕКТРОФІЗИЧНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ НАДІЙНОСТІ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ ЗА ЕФЕКТАМИ НЕЛІНІЙНОСТІ ЇХ ХАРАКТЕРИСТИК

С. Новосядлий, О. Фрик

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
тел. (0342) 71 48 48, e-mail: [kre@pu.if.ua](mailto:kre@pu.if.ua)

Сучасний стан розвитку світової електронної промисловості характеризується неперервним підвищенням вимог до надійності виробів твердотільної електроніки, мікроелектроніки, оптоелектроніки. Пошук оптимальних шляхів забезпечення цих вимог указав на необхідність глибокого розуміння фізики явищ, які призводять до відказів ВІС, та відмов надійності. Фізичний підхід до забезпечення надійності напівпровідникових приладів сформувався ще в 70–80-ті роки. На сьогоднішньому етапі це необхідно зробити й для субмікронних структур ВІС, на що вказують матеріали даної статті.

**Ключові слова:** субмікронні структури ВІС, тестові структури, електрофізичне діагностування, конструкторсько-технологічні обмеження проектних норм.

Електрофізичні методи діагностування субмікронних структур великих інтегральних схем (ВІС) за інтегральними ефектами нелінійності, які відповідають функціональним характеристикам виробів, дають змогу не тільки оцінити технічний стан об'єктів діагностування, але й прогнозувати надійність ще на етапі формування їх структур. Дані методи з успіхом можуть бути використані при атестаційному, приймальному контролі на виробництві та на входному контролі у фазі застосування в схемотехніці [1; 3].

Указаний метод ґрунтується на тому, що стан структури кристала ВІС відображається на особливостях характеристик, що реєструються на зовнішніх виводах ВІС, а саме: вольт-амперних (ВАХ), вольт-кулонних чи вольт-фарадних (ВКХ або ВФХ), ампервеберних (АВБХ), що описують властивості електропровідності, поляризованості та намагнічуваності фізичного середовища. Відповідно, функціональні характеристики, які відображують особливості руху носіїв заряду та зв'язаних зарядів у фізичному середовищі структури ВІС за різних рівнів їх енергетичної активації та різних режимів включення відзначаються індивідуальними параметрами нелінійності.

Конкретній структурі ВІС відповідає деяка область у тривимірному функціональному просторі, де кожна координата простору являє собою відповідний функціонал від ВАХ:  $\Phi_1[I(U)]$ , ВКХ:  $\Phi_2[Q(U)]$ , АВБХ:  $\Phi_3[\Psi(I)]$ . Виникнення відповідних дефектів у фізичному середовищі

структури ВІС пов'язано зі зміною положення координат стану об'єкта діагностування в цьому просторі, аж до виходу за межі області допустимого стану. Різним за характером дефектам відповідають визначені області простору структури ВІС.

Для реалізації процесу електрофізичного діагностування структури ВІС необхідно вирішити чотири основні завдання [1; 2; 3]:

1) для структур ВІС конкретного типу вибрати такі функціонали  $\Phi_1[I(U)]$ ,  $\Phi_2[Q(U)]$ ,  $\Phi_3[\Psi(I)]$ , в просторі яких забезпечується максимальна роздільність фізичного стану об'єкта діагностування залежно від їх дефектності за фізико-технологічним станом. Саме на цьому етапі закладаються основи достовірності діагностування;

2) визначити первинну діагностичну інформацію про об'єкт діагностування, на основі якого можуть бути визначені координати стану цього об'єкта у вибраному функціональному просторі;

3) визначити поточні координати стану об'єкта діагностування в просторі функціональних характеристик і прийняти рішення про стан діагностування структур ВІС уже з використанням діагностичних моделей;

4) сконструювати тестові структури, за допомогою яких на основі встановлених функціоналів моделювались би об'єкти діагностування, та вибрати їх метрологію й програмування на ПК.

Класифікація методів діагностування структур ВІС за інтегральними ефектами нелінійності залежно від способу отримання первинної діагностичної інформації наведена на рис. 1.



Рис. 1. Класифікація методів електрофізичного діагностування структур ВІС за інтегральними ефектами нелінійності

Згідно з рис. 1, до цих методів слід віднести: вольт-амперометрію (МВАМ); аналогове й цифрове диференціювання ВАХ; динамічні та імпульсно-модульовані динамічні ВАХ; динамічні й статичні вольт-фарадні характеристики (ВФХ); дифенціональну провідність (МДПр); вищі гармоніки (МВР); другу й третю гармоніки (МДрГ) і (МТрГ); нульові биття (МНБ); різницеву частоту (МРЧ).

Кожний із досліджуваних методів фіксує з різним ступенем достовірності будь-яку частину інформації про параметри нелінійності функціональних характеристик структур ВІС. При цьому дані вимірювань тестових структур представляються [6]:

- відповідними похідними основних функціональних характеристик за різних значень аргументу допустимої області;

- множиною точкових значень функціональних характеристик, які є відмінними від еталонних (прямої чи кривої);

- через параметри основних і вищих гармонік у зв'язку з параметрами нелінійності відповідної функціональної характеристики.

Нам відомо з математики, що інформативність електрофізичних характеристик  $\Phi(x)$  може бути значно збільшена, якщо досліджувати першу, другу,  $n$ -похідну функції  $\Phi(x)$ :  $\Phi'(x)$ ,  $\Phi''(x)$ ...  $\Phi^n(x)$ . Наприклад, якщо в  $p$ - $n$ -переході переважають генераційно-рекомбінаційні процеси, то їх кількісну характеристику визначає  $m$ -фактор, який змінює нелінійність прямої вітки ВАХ  $p$ - $n$ -переходу. Збільшення зарядового стану межі Si – SiO<sub>2</sub> призводить до зсуву вольт-фарадної характеристики та її нелінійності. Саме такі динамічні зміни нелінійності ефективно визначаються за похідними.

Такі похідні є повною мірою самостійними характеристиками, які мають свої особливості та діагностичні ознаки. Проте не всі похідні однаковою мірою інформативні, а найбільша діагностична інформативність може бути притаманна лише деяким із них.

Вибір із загального числа похідних найбільш інформативних і визначення допустимих меж диференціювання вихідної характеристики  $\Phi(x)$  є одним із важливих методів електрофізичного діагностування за нелінійностями характеристики  $\Phi(x)$ .

Відомо, що метод похідних (диференціальний метод), як свідчить досвід, є найбільш результативним у разі застосування до окремих ділянок електрофізичних характеристик, які виражають різну зміну механізму функціонування структур ВІС чи їх тестових структур. Такі області характеристик мають локальний характер порівнянно з цілою характеристикою. Прикладом цього можуть бути області переключення електронного ключа, переходу струму в насичення, розвиток лавинного чи тунельного пробою, зміна стану межі розділу Si – SiO<sub>2</sub> – від збагачення до збіднення та інверсії. Похідні характеристики тут розкривають структуру перехідної області, яку можна визначити як деякий розподіл фізичної (електричної) величини, наприклад: розподіл густини струму за напругою переключення ключа, розподіл площі емітера за значенням

густини струму насичення, розподіл площі  $p$ - $n$ -переходу за значенням напруги пробою.

Незалежно від фізичної природи, вказані розподіли мають узагальнений математичний опис у вигляді функції розподілу  $h(x)$ , як це зображено на рис. 2. Виходячи з основ радіофізики, випадкові процеси, як статистичні, можуть мати розмитий дифузний характер (рис. 2 а) або дискретний характер з окремо вираженими піками (рис. 2 б).

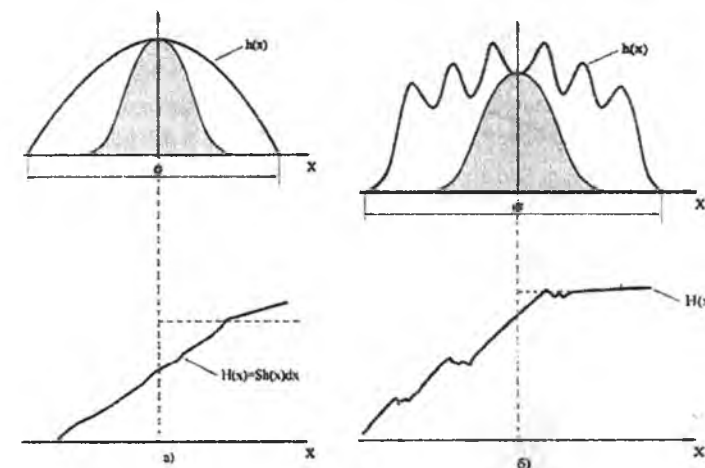


Рис. 2. Функція розподілу  $h(x)$ , яка має дифузний (а) та дискретний (б) характер

Заштриховані області – це теоретичні моделі розподілу фізичної величини (ідеальні). Порівнюючи реальну модель з ідеальною, можна судити вже про неідеальність фізичної величини.

Особливістю функції розподілу  $h(x)$  є те, що інтеграл від цієї функції  $h(x)$  дає функцію включення (стрибка)  $H(x)$ . Чим вужчий розподіл  $h(x)$ , тим функція  $H(x)$  стає ближчою до одиничної функції Хевісайда, яка відповідає ідеальному включенню (стрибка).

Складність пошуку інформативної похідної пов'язана з тим, що наперед не відомо, яка похідна може дати шуканий розподіл. На рис. 3 подано функцію  $\Phi(x)$  у двох варіантах, близьких до функції електрофізичного діагностування: лінійною а) та нелінійною б). Як бачимо із графіків, вибір інформативної похідної для практичного аналізу далеко неоднозначний і залежить від вихідної функції  $\Phi(x)$ . Цю задачу, для прикладу, ми розв'язали аналітично (рис. 3), тобто для випадку а) – це функція  $\Phi''(x)$ , а для випадку б) – це функція  $\Phi'''(x)$ . Як це розв'язати функціонально за допомогою ПК, використовуючи спеціальні програми в Matlab чи іншій програмі моделювання?

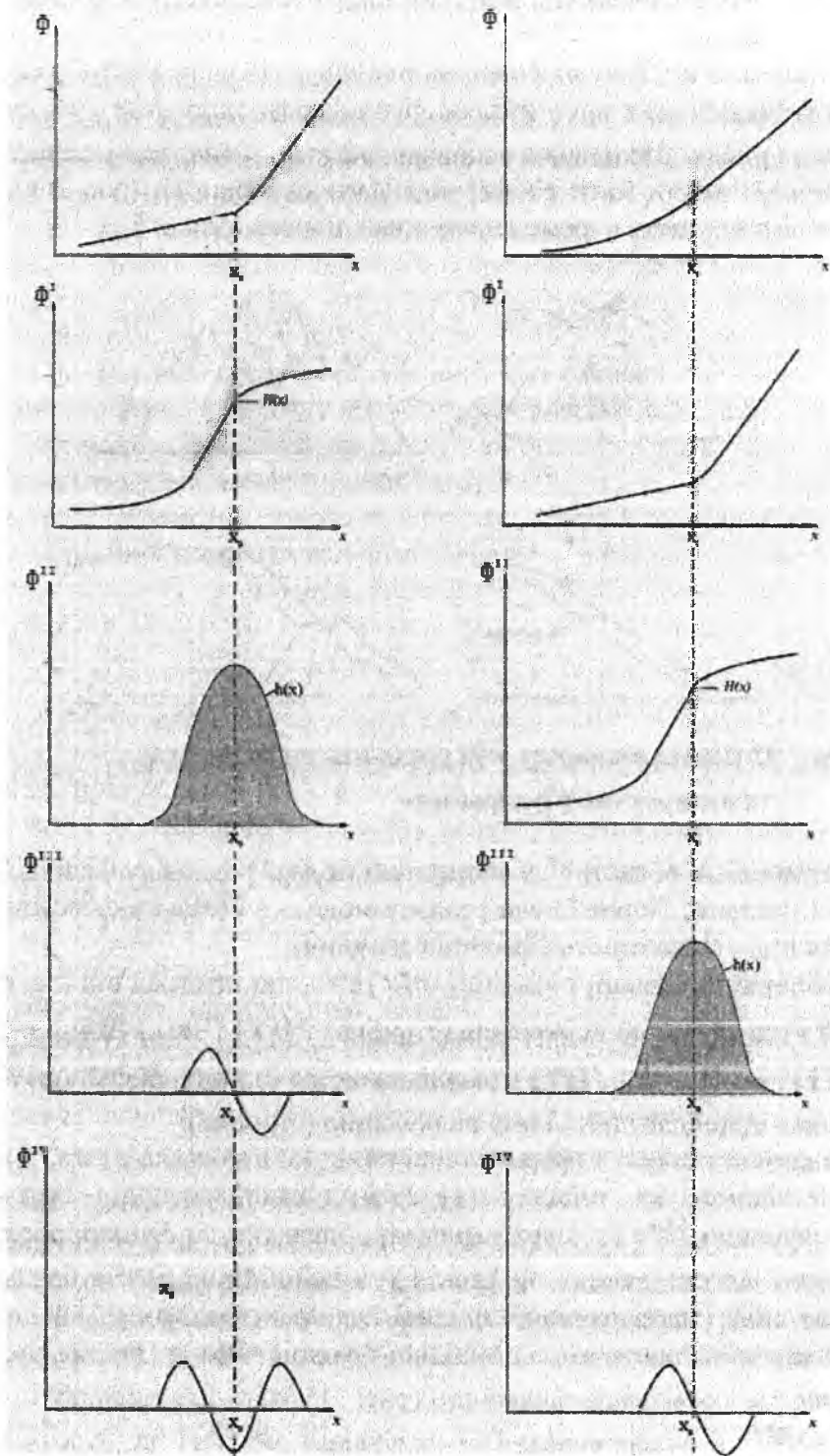


Рис. 3. Пошук інформативної похідної: при вихідній лінійній характеристиці  $\Phi(x)$ , коли  $\Phi''(x)$  є функцією розподілу  $h(x)$ ; при вихідній квадратичній характеристиці, коли  $\Phi'''(x)$  є функцією розподілу  $h(x)$

Цю задачу будемо розв'язувати від зворотного. Нехай функція  $\Phi^n(x)$  є тією вищою похідною, яка дає розподіл  $h(x)$  в околі точки  $x_0$ , тобто  $\Phi^n(x) = \varepsilon h(x - x_0)$ , де  $\varepsilon$  – нормована амплітуда розподілу  $h(x - x_0)$ . Послідовно інтегруючи цю функцію  $n$  разів і враховуючи, що  $H(x - x_0) = \int h(x - x_0) dx$ , приходимо до первинної функції  $\Phi(x)$ , яка вже визначатиме множину характеристик, що має в ролі інформативної  $n$ -ну похідну.

$$\Phi^{n-1}(x) = a_{n-1} + \varepsilon \int h(x - x_0) dx = a_{n-1} + \varepsilon H(x - x_0),$$

$$\Phi(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + \frac{1}{2!} a_2(x - x_0)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!} [a_{n-1} + \varepsilon H(x - x_0)](x - x_0)^{n-1} + R_0 h_1(x - x_0). \quad (1)$$

Таким чином, отримаємо, що загальний вигляд шуканих функцій характеристик, які дають розподіл  $h(x - x_0)$  в  $n$ -й похідній, виражаються номіналом  $(n - 1)$ -го степеня та залишком  $R_0 h_1(x - x_0)$ .

Особливістю даного номіналу функції є те, що в ній наявна функція включення  $H(x - x_0)$  в коефіцієнті при  $(n - 1)$ -му степені. Ця функція визначає швидку зміну, а в границі – стрибок коефіцієнта при цьому степені в точці  $x - x_0$ . Величина стрибка складає  $\varepsilon$ , а зміна коефіцієнта – від  $a_{n-1}$  до  $[a_{n-1} + \varepsilon]$ .

Залишковий член  $R_0$  визначається як:

$$R_0 = - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\varepsilon}{(n-1)!} \int d\xi_{i=1} \dots \int \xi^{n-1} h d\xi. \quad (2)$$

Величину  $R_0$  можна оцінити, якщо взяти значення функції, розподілу  $h$  в інтервалі  $\sigma$ , рівному середньому значенню  $h_0$ , тобто звести розподіл до прямокутного. Тоді

$$|R_0| = \varepsilon \frac{h_0 \sigma (n-1)}{n!} \sigma^{n-1}. \quad (3)$$

За умови  $h_0 \sigma = \text{const}$  вважатимемо, що площа розподілу є постійною в разі зменшення його ширини  $\sigma$ ,  $R_0$  буде падати й наближатися до нуля, як і  $\sigma^{n-1}$ . Це означає, що чим більш локалізованим є розподіл і чим вища похідна  $n$ , тим менша роль залишку  $R_0$ .

При знаходженні функції  $\Phi(x)$  згідно з (1) для  $n = 1$  отримуємо сімейство функцій  $\Phi(x)$ , для яких шуканий розподіл  $h(x - x_0)$  міститься вже в першій похідній.

$$\begin{aligned} \Phi(x) &= a_0 + \varepsilon H(x - x_0), \quad n = 1, \\ \Phi'(x) &= \varepsilon \frac{d}{dx} h(x - x_0) = \varepsilon h(x - x_0). \end{aligned} \quad (4)$$

Тут уже  $\Phi(x)$  – множина функцій, які близькі до функції включення Хевісайда – функції стрибка константи  $a_0$  (рис. 4 а). Параметрами цієї множини є  $a_0$  і  $\varepsilon$ .

При  $n=2$  із формули (1) отримуємо множину функцій  $\Phi(x)$ , для яких розподіл  $h(x-x_0)$  спостерігаємо в другій похідній (рис. 4 б). Функція  $\Phi(x)$  має вигляд ламаної у своїй головній частині.

При  $n=3$  із формули (1) отримуємо вже множину функцій  $\Phi(x)$ , для яких розподіл  $h(x-x_0)$  спостерігаємо в третій похідній. Тоді функція  $\Phi(x)$  представляє функцію-характеристику з ламаною квадратичною складовою (рис. 4 в).

Аналогічно, при  $n=4$  отримуємо множину функцій-характеристик, для яких розподіл проявляється вже в четвертій похідній, і тут  $\Phi(x)$  – це степенева функція з ламаною кубічною складовою.

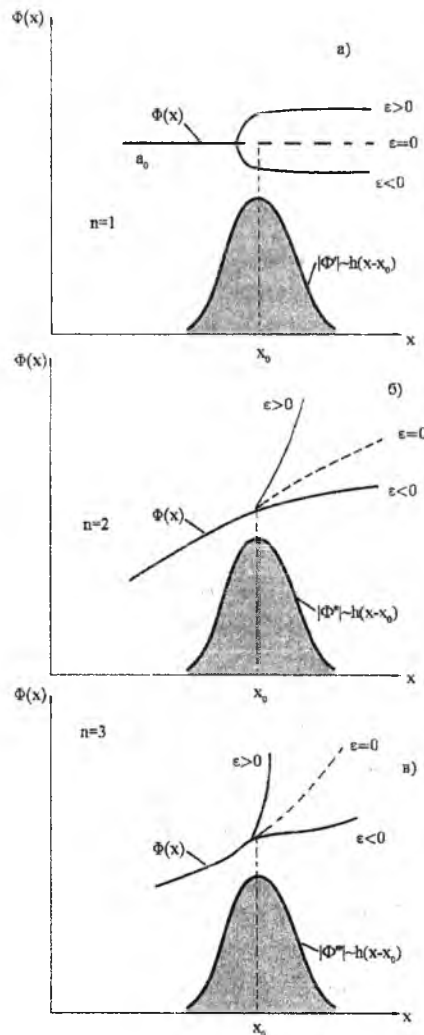


Рис. 4. Множини функцій  $\Phi(x)$ , для яких розподіл  $h(x-x_0)$  спостерігається в першій (а), другій (б) і третій (в) похідних

При  $n=5$  отримуємо множину функцій-характеристик  $\Phi(x)$ , для яких розподіл  $h(x-x_0)$  проявляється вже в четвертій похідній. Тут  $\Phi(x)$  – степенева функція зі зломом у бік квадратних складових.

Зі збільшенням  $n$  множина функцій  $\Phi(x)$  може бути значно розширена шляхом додавання до  $\Phi(x)$  регулярного полінома  $f(x)$  із нескінченим числом членів – рядом Тейлора. При цьому розподіл  $h(x-x_0)$  буде визначатись  $n$ -похідною й спостерігатиметься на фоні монотонної зміни похідної  $f^n(x)$ .

Таким чином, приєднання до функції  $\Phi(x)$  регулярного полінома з постійними коефіцієнтами не порушує принципу виділення розподілу  $h(x-x_0)$ . Тоді формулу (1) в кінцевому вигляді можна подати так:

$$\Phi(x) = a_0 + a_1(x-x_0) + \frac{1}{2}a_2(x-x_0)^2 + \dots + \frac{1}{(n-1)!}[a_{n-1} + \varepsilon H(x-x_0)](x-x_0)^{n-1} + \frac{1}{n!}a_n(x-x_0)^n + \dots + R_0 h(x-x_0). \quad (5)$$

Із цієї формули можна виділити дві різні нелінійності. Одна – регулярна, властива степеневому ряду з постійними коефіцієнтами, що проявляється у всій області задання  $\Phi(x)$ . Друга – локальна, яка представлена у вигляді стрибка  $H(x-x_1)$  і проявляється в околі точки  $x_0$ .

Комп'ютерний аналіз таких функцій дає змогу легко знаходити похідну, яка визначає розподіл. А використання тестових структур дає змогу з високою точністю моделювати практично всі фізичні ефекти в елементах структур ВІС [5; 7].

### Висновки

1. Електрофізичне діагностування параметрів структур ВІС можна проводити за нелінійностями їх характеристик.
2. На основі елементів структур ВІС визначають тестові структури, що дозволяють моделювати електрофізичні параметри, які визначають надійність.
3. Моделюючою функцією в цьому випадку може бути степеневий ряд Тейлора, коефіцієнти якого можна вважати показником надійності елементів.
4. На основі показників надійності елементів структур ВІС визначаються проектні норми конструкторсько-технологічних обмежень.
5. Найбільш інформативними фізичними параметрами є:  $m$ -фактор  $r$ - $p$ -переходу; порогова напруга та її температурна стабільність, надпорогові та тунельні струми; напруга змінного нуля диференціального підсилювача; друга гармоніка конденсатора; тепловий опір елемента структури; рухливість носіїв заряду та час їх “життя”.

1. Новосядлий С. П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем / С. П. Новосядлий. – Івано-Франківськ : Сімик. – 2003. – 200 с.

2. Новосядлий С. П. Тестовий контроль електрофізичних параметрів структур в системній технології високого рівня / С. П. Новосядлий //



Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 2. – С. 58–64.

3. Новосядлий С. П. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС / С. П. Новосядлий // Вісник НУ “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1999. – № 367. – С.187–197.

4. Новосядлий С. П. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС / С. П. Новосядлий // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – № 3. – С. 30–38.

5. Новосядлий С. П. Технологічна САПР на основі тестових структур / С. П. Новосядлий // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т. 3, № 1. – С. 179–189.

6. Способ контроля интегральных схем : А. с. СССР № 1259817 / Р. А. Владимирский, В. В. Гаврилов, А. С. Очков, Д. В. Шабалов. – Опубл. в БК. – 1988. – № 14. – 3 с.

7. Новосядлий С. П. Прогнозування надійності структур великих інтегральних схем за допомогою імпульсних нерівноважних вольт-фарадних характеристик / С. П. Новосядлий, Р. І. Запужляк, П. І. Мельник // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т. 6, № 1. – С. 153–160.

### ELECTROPHYSICAL DIAGNOSIS OF THE LARGE SCALE INTEGRATION SUBMICRON STRUCTURES RELIABILITY BASED ON THE EFFECTS OF THE NONLINEARITY OF THEIR CHARACTERISTICS

**S. Novosyadlii, O. Fric**

*PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine,  
ph. (0342) 71 48 48, e-mail: kre@pu.if.ua*

*Nowadays the development of the world electronic industry is characterized by constant increase of the reliability requirements to the products of the solid-state electronics, microelectronics and optoelectronics. The search for the optimal ways of the fulfillment of these requirements showed the necessity of deep understanding of the physics of phenomena, which cause the breakdown of the LSI and increase of the importance of their reliability. The physical approach to the provision of the reliability of semi-conductors was formed in the 70–80-ies. Nowadays it should be also done for the submicron LSI structures. This is the problem we describe in our article.*

**Key words:** *submicron LSI-circuit structure, test structure, electrophysical diagnostics, engineering and design limitation of rule.*

УДК 621.383.032

### АНАЛІЗ ОПТИЧНИХ ВТРАТ У ПОЛІКРЕМНІЄВИХ ХВИЛЕВОДАХ

**А.Р. Варцаб'юк**

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника,  
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57,  
e-mail: vartsabiuk@gmail.com*

*Проведено аналіз утрат при передачі сигналів у полікремнієвих хвилеводах; наведено методи, за допомогою яких можуть бути покращені характеристики хвилеводів. Розглянуті методи експериментального визначення оптичних втрат у хвилеводах.*

**Ключові слова:** *кремнієвий хвилевід, оптичні втрати, експериментальні методи, нерівність поверхні.*

Втрати під час передачі в інтегрованих полікремнієвих хвилеводах відбуваються в результаті двох причин:

- поглинання й розсіювання в серцевині;
- поверхневе розсіювання, спричинене нерівностями поверхні.

У перших полікремнієвих хвилеводах оптичні втрати були великими внаслідок 25 нм нерівностей (верхньої) поверхні хвилеводів. Проте оптичні втрати зменшилися після планаризації поверхні хімічно-механічним поліруванням [1]. Якщо осаджувати аморфний кремній і проводити його відпал для отримання полікремнію, то можна отримати поверхню з нерівністю близько 4 нм. Більшість оптичних утрат у таких хвилеводах приписувалися до утрат серцевини. У результаті експерименту було встановлено, що коли товщина полікремнієвої серцевини зменшується з 1 до 0,2 мкм, втрати зменшуються на 10 дБ/см унаслідок витискання моди із хвилевода [1].

**Нерівність поверхні та оптичні втрати.** Нерівність поверхні тут визначена як нерівність верхньої частини поверхні хвилеводу. Основними джерелами нерівності верхньої і нижньої частини поверхні хвилеводу є:

- межі зерен, які спричиняють нерівність поверхні (відповідно до росту зерен);
- нерівності, спричинені нерівністю підкладки.

Той факт, що морфологія поверхні полікремнію пов'язана з розмірами зерен, був використаний Лі [2] для того, щоб довести, що розміри зерен полікремнію можуть бути легко визначені за допомогою атомно-силового мікроскопа. Розміри зерен, отримані за цим методом, порівнювалися з тими, що були отримані в поперечному перерізі просвітлюючої електронної мікроскопії, а також указувалося на їх ідентичність [3].

В інших системах матеріалів подібні ефекти також простежуються. Щоб уникнути таких великих утрат, використовують аморфний матері-

ал із широкою забороненою зоною. При цьому вплив нерівності поверхні на втрати у хвилеводі зменшується [4].

Щоб зменшити оптичні втрати, замість полікристалічного може бути використаний монокристалічний матеріал (наприклад, кремній-на-ізоляторі (КНІ), отриманий методом SmartCut) або аморфний широкозонний матеріал, такий, як нітрид кремнію або оксид кремнію. Поверхні цих матеріалів є більш гладкими через відсутність меж зерен.

Якщо використання полікристалічного матеріалу неможливо уникнути, можна зменшувати величину втрат серцевини варіюванням товщини хвилеводу. Інший метод – використання надзвичайно якісного полікремнію. Такий матеріал може бути створений за допомогою швидкого термічного відпалу (RTA) полікремнію за високої температури. У такій структурі малий розмір зерен призводить до меншої, але швидшої зміни нерівності в поверхні.

**Експериментальне визначення оптичних втрат.** Для експериментальної оцінки оптичних втрат у хвилеводах можуть бути використані такі методи: зменшення довжини (вкорочення), метод скріпки, метод вимірювання добротності кільцевого резонансу, резонанс Фабрі–Перо.

**Зменшення довжини (вкорочення).** Цей простий метод включає підготовку зразка, вимірювання його передачі, обрізання його для зменшення довжини і, відповідно, збільшення передачі й повторне вимірювання. Варіацією цього методу є підготовка декількох зразків різної довжини. Щоб отримати статистично суттєві результати й вивести середнє значення на розсіюючих ділянках, на кожному зразку проводяться виміри для декількох хвилеводів (зазвичай 20). Отримані дані передачі виводяться на шкалі навпроти довжини зразка (децибелах). Ця шкала прив'язана до шкали потужності вхідного випромінювання лазера. Нахил цієї лінійної регресії і є втратами в децибелах на одиницю довжини, а відрізок описує втрати зв'язку.

Ця техніка широко описана в літературі [3]. Такий метод легкий і зрозумілий, проте він має декілька серйозних недоліків. По-перше, вимірювання передачі хвилеводу після вкорочення одного зразка триває декілька днів, що призводить до недостатнього контролю експерименту. По-друге, за одночасного проведення підготовки й вимірювання декількох зразків, наявною буде нестача контролю з точки зору підготовки зразків. Для прикладу, якість граней зразка може варіюватися від зразка до зразка. Таким чином, цей метод потребує великих затрат часу, оскільки вимагає ретельні підготовки великого числа граней.

**Метод скріпки.** У цьому методі частково усунені недоліки попереднього. Типова схема показана на рис. 1. Якщо основна ідея методу зменшення довжини (вкорочень) полягає у створенні хвилеводів різної довжини на одному зразку, то метод скріпки заснований на тому факті, що у хвилеводах із великою різницею показників заломлення втрати згинів дуже малі. Це дозволяє розмістити декілька хвилеводів із радіусами згинів 25 мкм на одному кристалі. Крім того, якщо число згинів є сталим у кожній структурі, тоді оптичні втрати через згини можуть бути

систематично виключені. За методом скріпки вимірювання передачі проводяться для кожного із хвилеводів (5 або 10 хвилеводів кожної довжини). Використовується метод регресії, подібний до того, який використовується в методі вкорочення; отримані дані відкладаються на шкалі в децибелах, відповідно до довжини зразка. Кут нахилу лінійної регресії виражає втрати в децибелах на одиницю довжини, а відрізок – втрати зв'язку.



Рис. 1. Схема методу скріпки

Основною перевагою методу скріпки є те, що використовується лише один зразок, і грані поліруються лише один раз; це означає кращий контроль якості граней, ніж у методі вкорочення. Основним недоліком цього методу є те, що можуть використовуватись лише одномодові пристрої (до двох поляризацій). Причиною цього є те, що метод скріпки використовує коліна (згини) для зміни довжини хвилеводів на одному кристалі. Багатомодові хвилеводи показали б дуже велику варіацію, тому що потужність, яка передається через коліна багатомодових хвилеводів, сильно залежить від способу, яким проводилося збудження.

**Визначення оптичних втрат за допомогою кільцевого резонансу.** Втрати хвилевода можуть бути знайдені за допомогою визначення зміни добротності  $Q_i$  його кільцевого резонансу, який відбувається в мікроскопічному кільці (рис. 2).  $Q_i$  – міра того, наскільки добре кільце зберігає свою енергію від утрат, викликаних поглинанням та розсіюванням. Оптичні втрати залежать від зміни добротності його кільцевого резонансу, що відбувається в мікроскопічному кільці. Точні деталі такого визначення потребують детального аналізу кільцевих резонаторів. Відомо

[3], що добротність кільця пов'язана з коефіцієнтом поглинання таким співвідношенням:

$$Q_i = \frac{\beta}{\alpha}, \quad (0.1)$$

де  $\beta = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda}$  – стала поширення в цьому середовищі,  $n_{eff}$  – ефективний показник заломлення середовища. Тоді

$$Q_i = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda \alpha}. \quad (0.2)$$

Отже, для коефіцієнта поглинання хвилевода отримаємо:

$$\alpha = \frac{2\pi n_{eff}}{\lambda Q_i}. \quad (0.3)$$

Зазначимо, що число, визначене в такий спосіб, буде завищене, оскільки втрати вигнутої секції хвилеводу вищі, ніж прямої.

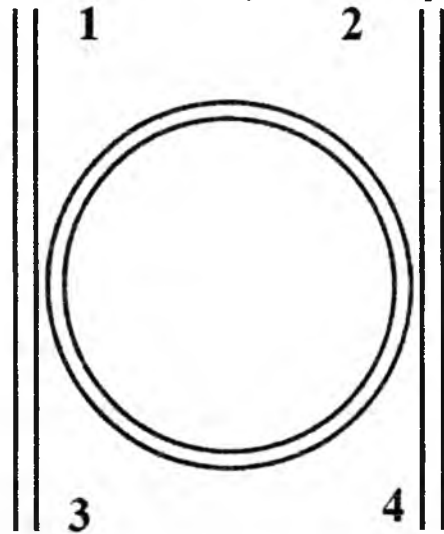


Рис. 2. Схема однорівневого мікрокільця

**Аналіз інтерференційних ліній Фабрі–Перо.** Грані хвилеводу відіграють роль дзеркал. Таким чином, якщо грані нормальні до хвилеводів, то пристрій відіграє роль порожнини резонатора Фабрі–Перо. Розкладання випромінювання за довжиною хвилі у хвилеводі з добре відполірованими гранями дає інтерференційні лінії Фабрі–Перо. Повний діапазон вимірювань (FSR) або дистанція від максимуму до максимуму резонансу резонатора Фабрі–Перо в першому наближенні

$$FSR = \frac{\lambda^2}{2nL}, \quad (0.4)$$

де  $L$  – довжина порожнини (в даному випадку хвилеводу),  $n$  – показник заломлення порожнини. Відбиваюча здатність межі розділу може бути обчислена виразом

$$R = \left( \frac{n_0 - n_{eff}}{n_0 + n_{eff}} \right)^2, \quad (0.5)$$

де  $n_0$  – показник заломлення середовища, з якого випромінювання потрапляє у хвилевід.

Відбиваюча здатність кремнієвого, нітридного та SPARROW хвилеводів, обчислена за цим виразом, становить 20%, 6,7% та 4% відповідно. Інтерференційні лінії Фабрі–Перо можуть бути зведені до мінімуму в пристроях інтегральної оптики. Це може бути здійснено за допомогою антивідбиваючих покриттів чи кутових граней. З іншого боку, інтерференційні лінії Фабрі–Перо можуть бути корисними для визначення втрат у хвилеводі. Якщо хвилевід без утрат, співвідношення мінімуму інтенсивності до максимуму інтенсивності інтерференційних ліній дорівнює нулю. Якщо є втрати, відбита хвиля не може повернутися назад без ослаблення і, таким чином, відношення мінімуму інтенсивності до максимуму інтенсивності інтерференційних ліній збільшується. Може бути доведено, що з двома ідентичними гранями з коефіцієнтом відбивання  $R$ , коефіцієнт поглинання може бути обчислений як

$$\alpha = \frac{1}{L} \ln \left( R \frac{1 + \sqrt{\frac{P_{min}}{P_{max}}}}{1 - \sqrt{\frac{P_{min}}{P_{max}}}} \right), \quad (0.6)$$

де  $P_{min}$  та  $P_{max}$  – мінімум та максимум інтенсивності інтерференційних ліній.

**Висновки.** Таким чином, визначено, що найбільший вплив на оптичні втрати в полікремнієвих хвилеводах має нерівність поверхні хвилеводу та його геометричні розміри. Зі зменшенням серцевини хвилеводу та нерівності поверхні втрати зменшуються. Наведені методи дають змогу визначити оптичні втрати в інтегральних хвилеводах із високою точністю.

1. Black Marcie. Loss in polysilicon waveguides : Master's thesis / Marcie Black. – MIT, 1995.
2. The effect of size and roughness on light transmission in a si/sio2 waveguide : Experiments and model / K. K. Lee, D. R. Lim, H-C. Luan [and ah.] // Submitted to App. Phys. Lett., 2000.
3. Liao Ling. Low loss polysilicon waveguides for silicon photonics : masters thesis / Liao Ling. – MIT, 1997.
4. Tien P.K. Light waves in thin films and integrated optics / P.K. Tien // Applied Optics. – 10(11) :2395, 1971.

**TRANSMISSION LOSSES IN INTEGRATED SILICON  
WAVEGUIDES AND METHODS OF THEIR EXPERIMENTAL  
DEFINITION**

**A.R. Vartsabiuk**

*PreCarpathian National University by V. Stefanic,  
Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57, Ivano-Frankivs'k, 76000, Ukraine*

*In article the analysis of transmission losses in polysilicon waveguide have been carried out, methods by means of which characteristics of waveguides can be improved are given. Methods of experimental definition of optical losses in waveguides are considered.*

*Key words: silicon waveguide, optic losses, experimental technique, surface roughness.*

**Нафтогазова  
справа**

УДК 622.276 (477.7)

**ШЛЯХ ПРИСКОРЕННЯ РОЗРОБКИ  
НАФТОГАЗОВИХ РОДОВИЩ УКРАЇНСЬКОГО ШЕЛЬФУ  
ЧОРНОГО І АКВАТОРІЇ АЗОВСЬКОГО МОРІВ**

**Р.С. Яремійчук**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*Викладено пропозиції щодо шляхів прискорення розробки нафтогазових родовищ українського шельфу Чорного та акваторії Азовського морів, підготовлені групою фахівців під керівництвом професора Р. Яремійчука.*

*Ключові слова: нафтогазові родовища, шельф, геологорозвідувальні роботи, розробка родовищ, буріння, горизонтальні свердловини.*

Відомими програмами, що розглянуті урядом України (1996, 2007 рр.) констатується, що потенційні запаси нафти і газу тут оцінюються від 1,5 до 3,0 млрд тонн умовного палива. Фактично, це сторічний обсяг потреби економіки України в нафті і газі, який може бути реальною запорукою енергетичної незалежності й безпеки України.

Морська територія в межах юрисдикції України, під дном якої знаходяться вуглеводневі ресурси, становить 133700 км<sup>2</sup> і умовно поділяється на порівняно мілководну – шельфову (глибина води в межах 40–90 м) та глибоководну (глибина води 2000–2200 м) частини.

Шельф Чорного моря умовно можна поділити на східну та західну частини. У західній частині відкрито низку газових і газоконденсатних родовищ, що розробляються або будуть введені в розробку в найближчі рік-два (Голіцинське, Архангельське, Штормове, Одеське, Безіменне). Із введенням в експлуатацію двох останніх родовищ сумарний річний видобуток газу зросте до 3,0 млрд м<sup>3</sup>.

Геологічними, геофізичними та геохімічними дослідженнями останніх 20 років у межах східної частини шельфу Чорного моря від Алушти до кордону між Україною і Російською Федерацією знайдено 14 структур, які кваліфікуються як вуглеводневомісні. Відкриття 2005 року Суботинського нафтового родовища підтверджує цей прогноз.

\* За оперативними підрахунками та даними, отриманими параметричною свердловиною № 403, і за результатами випробування

свердловини № 1, ресурси Суботинського нафтового родовища оцінюються в 65 млн тонн нафти. Вивчення цього родовища, яке є першим у цій частині шельфу, свідчить про надвисокий потенціал запасів нафти (і газу з газоконденсатом) цього району шельфу.

\* Попри те, що урядом України 1998 року схвалено Програму освоєння вуглеводневих ресурсів українського сектора Чорного та Азовського морів, за дев'ять років вона профінансована лише на 10%, тобто її реалізацію залишили на самоплив. Відповідно, завдання програми не виконані. Проект нової, уточненої Програми, розроблений “Науканафтогаз” наприкінці 2006 року, не визначає чіткої державної політики, стратегії і тактики розвитку акваторії.

Нижче наведено головні причини незадовільного розвитку сировинної бази нафтогазової галузі в українському секторі Азовського та Чорного морів.

#### ПРИЧИНИ:

- Відсутність чіткої й послідовної державної політики щодо освоєння родовищ вуглеводневих ресурсів Азовського та Чорного морів. Збільшення власного видобутку нафти і газу з морських родовищ не визначено ані пріоритетом, ані жодним із реальних шляхів забезпечення національної безпеки в енергетичному секторі.

- Облаштування морських родовищ потребує значних інвестицій. Лише на Суботинське родовище необхідно 6–8 млрд дол. США. Зважаючи на фактичну відсутність державної програми, не передбачено сталого фінансування за рахунок одержаних бюджетних коштів і коштів підприємств НАК “Нафтогаз України”. НАК “Нафтогаз України” і його підрозділи (у томі числі ДАТ “Чорноморнафтогаз”) за десятки років на практиці показали неспроможність ефективно інвестувати й виконувати функції генерального замовника масштабних геологорозвідувальних та експлуатаційних робіт. Об’єктивно, вказане є результатом ринково не обґрунтованого державного управління й регулювання в цьому секторі, яке фактично спрямоване на вирішення соціальних завдань, поглиблює кризову ситуацію і не створює умов для інвестування.

- Відсутність чітких, прозорих і гарантованих механізмів залучення зовнішніх інвестицій одночасно зі збереженням державного контролю в цьому стратегічному секторі.

- Відсутність внутрішньої міжгалузевої координації. На сьогоднішній день в Україні немає виробництва обладнання для прискореного освоєння цих ресурсів: підводного обладнання, устаткування для буріння горизонтальних свердловин, стаціонарних бурових платформ, самопідйомних та напівзанурених бурових установок, кораблів для буріння свердловин у глибоководній частині Чорного моря, трубоукладальних барж, гідротехнічних споруд. Так само як відсутня в необхідних обсягах супутня техніка для прокладання морських трубопроводів, кораблів супроводу буріння та експлуатації свердловин, авіації (вертольотів).

- На жаль, жодного разу належно не розглядалося питання кадрового забезпечення таких масштабних робіт.

- Для прискореного освоєння ресурсів лише у східній частині шельфу Чорного моря необхідно в якнайстисліші терміни виконати тривимірні сейсмічні дослідження (3D), для виконання яких в Україні немає ні коштів, ні власного обладнання. Виконання цих досліджень дає можливість у чотири рази скоротити обсяг розвідувального буріння.

- Для виконання цих великомасштабних робіт слід також урахувати вимоги до захисту навколишнього середовища, беручи до уваги й те, що цей регіон є сейсмічно активним. Будь-яке послаблення екологічних вимог може завдати непоправної шкоди басейну Чорного та Азовського морів.

- В Україні відсутня структура для наукового та технологічного супроводу цих великомасштабних робіт. Крім ТОВ “Інститут ШЕЛЬФ” інші наукові заклади (Інститут УкрДГРІ, ДК “Науканафтогаз”, Івано-Франківський національний університет нафти і газу) виконують лише окремі етапи досліджень. Тому необхідно в стислі терміни сформувані й визначити головну наукову та проектну організацію для здійснення великомасштабних робіт.

Безумовно, першочерговим проектом, здатним подвоїти власний видобуток нафти в Україні, є розробка Суботинського родовища. Облаштування інших структур східного шельфу могло б довести обсяг видобування нафти до декількох десятків мільйонів тонн за рік. При цьому постає низка проблемних питань другого порядку.

Розробку зазначеного родовища та інших нових багатопластових родовищ у цій зоні слід здійснювати горизонтальними свердловинами, що майже в чотири рази зменшить необхідну кількість експлуатаційних свердловин на кожен продуктивний горизонт (зі 100 до 25), а також скоротить на третину термін розробки родовищ і на 20–25% збільшить коефіцієнт нафтовилучення з пласта.

Сьогодні технології буріння горизонтальних свердловин стали надбанням світових нафтовидобувних компаній: понад 60% експлуатаційних свердловин у світі прокладаються у горизонтальному виконанні. Проте в Україні відсутні обладнання та власні технології для буріння горизонтальних свердловин не лише на морі, а й на суші. У Російській Федерації сьогодні, наприклад, прийнято рішення про імпорт передових технологій, які не мають аналогів у країні. В Україні на закупівлю бурового обладнання і технологій західних компаній кошти фактично не спрямовуються, власні дослідження зведені до нуля, а НАК “Нафтогаз України” їх не фінансує.

У часи СРСР координація всіх науково-дослідних та проектних робіт здійснювалася головним НДІ країни та рішення затверджувалися в технічних управліннях Міннафтопрому, Мінгазпрому, Мінгео. Сьогодні в Україні повністю припинено фінансування наукових і прикладних досліджень у галузі буріння свердловин (цих найбільш капіталомістких виробництв), а наше відставання від західних компаній складає 40–50 років.

Окремою масштабною проблемою, яка підлягає вирішенню на наступному після освоєння шельфових ресурсів етапі, є розробка глибоководних вуглеводневих ресурсів Чорного моря зі структур, розташованих дугою від Керченської притоки до гирла Дунаю.

Розвідка й облаштування глибоководних ділянок є вдвічі більш капіталомісткими порівняно з роботами на шельфі. В Україні для цього відсутні фінанси, техніка, технології. Випереджувальні роботи з інформаційного забезпечення, з перепрофілювання вітчизняного виробництва на випуск необхідних засобів і обладнання також не здійснюються.

Залучення до цих робіт компанії “Vanco Ltd”, що перемогла в тендерному відборі 2006 р. інші зарубіжні компанії, яка не володіє сучасними технологіями, обладнанням і персоналом, теж завдало непоправної шкоди нашій державі, оскільки відсторонення її від виконання робіт є великою державною проблемою. За минулі два роки Україна не наблизилася до освоєння глибоководної частини своїх потенційних родовищ.

Це стосується й залучення компанії “РосУкренерго” до освоєння Одеського та Безіменного газових родовищ та до освоєння Прикерченської зони.

Одним зі шляхів прискорення освоєння нафтогазових родовищ Чорного та Азовського морів міг би бути позитивний міжнародний досвід. Так, Бразилія за 25 років підвищила власний видобуток нафти з шельфу Атлантичного океану на глибинах від 10 до 1990 м з нуля до 120 мільйонів тонн за рік.

Бразилія використала таку схему:

- Уряд надав дозвіл компанії “Шлюмберже” за власні кошти провести сейсмічні дослідження бразильського шельфу Атлантичного океану.
- Компанія “Шлюмберже” одержала право продавати результати своїх досліджень за договірними цінами будь-яким нафтогазовидобувним компаніям світу. Ділянки шельфу були продані 17-ти компаніям за цінами від 100 до 600 мільйонів доларів.
- Уряд Бразилії встановив інвестиційні вимоги до компаній, що скуповували ці ділянки:
  - розпочати освоєння ділянок упродовж двох років;
  - організувати випуск усього необхідного обладнання на машинобудівних та суднобудівних заводах Бразилії за технічною документацією світових компаній;
  - продавати видобуту нафту, у першу чергу, нафтопереробним заводам Бразилії і лише надлишки направляти на експорт;
  - весь персонал (від робітників до інженерного та наукового складу) повинен бути бразильським. Для цього компанії вклали величезні кошти в професійну освіту нафтовиків Бразилії, а навчальні лабораторії їхніх університетів є кращими у світі;
  - для координації всіх робіт на морі було створено компанію “Петробраз”, яка здійснює геологічний моніторинг, науковий і проектний супровід бурових й експлуатаційних робіт, підрахунок запасів, за-

твердження проектів розробки родовищ і контроль за їхньою розробкою. Ця ж компанія строго контролює збереження довкілля в процесі розробки родовищ.

Такий шлях міг би бути прийнятним і для України, але за умов прийняття відповідних законодавчих актів.

Для організації ефективного освоєння вуглеводневих ресурсів українського сектора Азовського і Чорного морів слід виконати такі умови:

1. В Україні повинна бути створена управлінська структура (УС) для освоєння нафтогазових ресурсів Чорного та Азовського морів. Виконання цих робіт силами НАК “Нафтогаз України”, яка переобтяжена боргами, перешкодило залученню вітчизняного та іноземного капіталів для освоєння цих ресурсів і виконання програмних завдань. Управлінська структура повинна бути подібною до “Петробраз” (Бразилія) і працювати під егідою уряду України.

2. УС повинна забезпечити розробку й погодження Державної програми або концепції, комплексного плану освоєння морських нафтогазових ресурсів і генеральної схеми розвитку інженерної інфраструктури нафтогазового комплексу на акваторії Чорного і Азовського морів.

3. Основними документами, за якими буде здійснюватися освоєння морських вуглеводневих ресурсів, повинні стати комплексний план і генеральна схема. Зазначені документи мають визначати ефективну послідовність заходів (нормативно-правового, інформаційного забезпечення), а також раціональну схему інженерного облаштування акваторії, в першу чергу системи підводних трубопроводів, яка забезпечить послідовне підключення морських родовищ до ГТС і НТС України.

4. Першочерговому вирішенню підлягає питання забезпечення програми якісною геологічною інформацією. Доцільно забезпечити збір і переінтерпретацію даних сейсмозвідки минулих років, створення відкритого ринку геологічної інформації.

5. Необхідний випереджальний розвиток ГРР, у тому числі отримання даних супутникових систем, виконання сейсмозвідувальних робіт, пошукового й параметричного буріння. Для цього потрібно або за рахунок державних ресурсів створити вітчизняну спеціалізовану науково-технічну базу (геофізичне судно, бурове судно і т. ін.), або, за прикладом Бразилії, залучити для цього іноземні спеціалізовані компанії.

6. У випадку залучення недержавних інвестицій у розвідку родовищ необхідно на законодавчому рівні забезпечити гарантії інвесторам шляхом надання переваг на отримання ліцензій на розробку відкритого за рахунок інвестицій родовища, страхування фінансових, геологічних і екологічних ризиків і т. ін.

7. Програма кадрового забезпечення, за умови часткового відбору, перепрофілювання та стажування спеціалістів нафтогазової галузі для роботи на морі дасть перші результати за два-три роки, тому має бути розпочата в пріоритетному порядку.

8. На законодавчому рівні необхідно забезпечити певні преференції за системними проектами – модернізації й адаптування для цілей освоєння шельфу галузей машинобудування і суднобудування, портових і берегових споруд і комунікацій.

9. Забезпечити внутрішню інтеграцію й концентрацію вітчизняного інвестиційного, виробничого і науково-технічного потенціалу на проектах облаштування морських родовищ. Перспектива цього полягає і в можливості подальшого використання цього потенціалу для реалізації аналогічних проектів на шельфі інших країн, наприклад, Російської Федерації, Казахстану, Туркменії і т. д.

10. До вирішення проблем освоєння ресурсів Чорного і Азовського морів необхідно концентровано залучити найбільш відомих фахівців і науковців.

11. На законодавчому рівні визначити передові технології, які в спеціальному пріоритетному режимі повинні бути імпортовані в Україну.

12. На законодавчому рівні встановити спеціальний режим державного контролю й регулювання цього сектора, як такого, що має стратегічне значення. У випадку надання права на розробку родовищ компаніями будь-якої власності доцільно забезпечити державний контроль або власність на систему підводних трубопроводів, які повинні проектуватись і будуватись випереджувальними темпами.

13. На законодавчому рівні визначити порядок пріоритетної реалізації вуглеводневої сировини на транспорті і переробних підприємствах України.

14. На законодавчому рівні визначити принципи національного, регіонального і міжнародного співробітництва за проектами освоєння нафтогазових ресурсів українського сектора Чорного і Азовського морів.

## WAY OF ACCELERATION OF DEVELOPMENT OF OIL AND GAS DEPOSITS OF THE UKRAINIAN SHELF OF BLACK AND AQUATORIUM OF AZOV SEAS

**R.S. Yaremiychuc**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas  
15, Carpat'ska street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine  
e-mail: public@nung.edu.ua*

*Suggestions in relation to the ways of acceleration of development of Oil and Gas deposits of the Ukrainian shelf of Black and aquatorium of Azov seas are laid out seas, prepared by the group of specialists by direction of professor R.Yaremiychuc.*

**Key words:** *deposits, shelf, geological survey works, development of deposits, boring drilling, horizontal mining holes.*

УДК 622.24

## СТАН ЯКОСТІ ПЕРВИННОГО РОЗКРИТТЯ ПРОДУКТИВНИХ ПЛАСТІВ З АНОМАЛЬНО НИЗЬКИМИ ТИСКАМИ

**Я.С. Коцкулич**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [drill@nung.edu.ua](mailto:drill@nung.edu.ua)*

*Матеріали статті дають підстави зробити висновок про те, що висока якість розкриття продуктивних пластів з аномально низьким пластовим тиском може бути досягнута при науково обґрунтованому підході до вибору типів і властивостей промивальних рідин, а також способу розкриття пластів з урахуванням конкретних гірничо-геологічних умов буріння.*

**Ключові слова:** *розкриття продуктивних пластів, пластовий тиск, промивальна рідина, гірничо-геологічні умови буріння свердловин.*

Підвищення якості робіт, пов'язаних із первинним розкриттям продуктивних пластів, є однією з найважливіших проблем нафтогазовидобувної промисловості.

Дослідження та промисловий досвід свідчать, що терміни освоєння, продуктивність свердловин та коефіцієнти нафтогазовилучення з пластів за одних і тих же умов можуть бути різними й залежать від якості виконаних робіт при первинному розкритті продуктивних пластів. Разом із тим, залежно від фільтраційних властивостей порід-колекторів і фізико-хімічних властивостей флюїдів, які насичують їх пори, використання одних і тих самих технологічних операцій з однаковими параметрами призводить до різних кінцевих результатів.

Основою успішного первинного розкриття вважається збереження природної проникності порід-колекторів і цілісності стінок свердловини в інтервалі продуктивного пласта. Досягнути цього можна за рахунок використання таких технологій, які виключають можливість потрапляння в пори порід-колекторів побічних матеріалів або таких промивальних рідин, які не спричиняють негативної дії на пласт із точки зору його закупорювання та втрати стійкості стінок свердловини.

Згідно з “Єдиними технічними правилами ведення робіт при будівництві свердловин на нафтових, газових і газоконденсатних родовищах” [1], розкриття продуктивних пластів необхідно проводити так, щоб гідростатичний тиск стовпа промивальної рідини на 1,5–3,5 МПа перевищував пластовий. У реальних умовах репресія на продуктивний пласт значно перевищує прийняті норми через гідравлічні втрати під час переміщення бурильної колони вниз.

Для первинного розкриття продуктивних пластів повинні використовуватися промивальні рідини, які відповідають таким вимогам:

1) Густина промивальної рідини повинна бути такою, щоб гідростатичний тиск приблизно дорівнював (або дещо перевищував) пластовий тиск у тій частині пласта, де коефіцієнт аномальності пластового тиску має максимальну величину.

2) Промивальна рідина не повинна вміщувати глинистої твердої фази або, в крайньому випадку, її вміст повинен бути мінімальним. Вміст твердих частинок діаметром 0,3–0,5 діаметра пор колектора, повинен бути не меншим за 5 %. Такі частинки перешкоджають проникненню в продуктивний пласт дрібнодисперсних частинок твердої фази. Бажано, щоб як тверда фаза використовувались такі частинки, що розчиняються кислотами (крейда, мармурова крихта, вапняк, сидерит і т. п.). Із цієї ж причини небажано в якості обважнювача використовувати баритові та залістисті обважнювачі.

3) Оскільки дисперсійне середовище значно зменшує проникність порід-колекторів, то фільтрація промивальних рідин повинна бути мінімальною. Фільтрат промивальних рідин повинен вміщувати речовини, що мають властивість пригнічувати схильність глинистого матеріалу гірських порід до набухання, а його мінералізація має бути близькою до мінералізації пластових вод. Фільтрати не повинні містити компоненти, які під час контакту з пластовими рідинами утворювали б нерозчинні осадки.

4) Доцільно до промивальних рідин додавати такі поверхнево-активні речовини (ПАР), які гідрофобізують поверхню порових каналів і попереджують утворення в них водонафтових емульсій. ПАР повинні бути сумісними з пластовими рідинами, не випадати в осад і не втрачати ефективність дії.

5) Промивальна рідина повинна бути низькотискотропною, мати невеликі значення статичного й динамічного напружень зсуву та пластичної в'язкості. Це дасть змогу звести до мінімуму гідродинамічні втрати під час відновлення циркуляції, промивання свердловини, проведення спуско-підіймальних операцій. Крім цього, таку промивальну рідину буде легше витіснити у свердловину із пласта під час освоєння, причому з меншими величинами депресії.

6) Промивальна рідина повинна закачуватися з оптимальною величиною витрати, щоб режим її руху в інтервалі продуктивного пласта був, по можливості, ламінарним. У той же час витрата повинна бути достатньою для винесення частинок породи з вибою з метою недопущення їх подрібнення та збагачення ними промивальної рідини. Під час первинного розкриття промивальна рідина повинна якісно очищатися.

Однак, незважаючи на актуальність зазначеної проблеми, технологія буріння в продуктивному пласті в більшості випадків не відрізняється від технології буріння решти стовбура свердловини. Здебільшого це стосується промивальних рідин, які не відповідають вимогам якісного розкриття продуктивних пластів, що призводить до значних народногосподарських утрат. Ці втрати можна оцінити насамперед тим, що на

сьогодні вилучається біля 20–30%, а в кращих випадках – 40–50% запасів нафти і 50–95% газу.

Усі промивальні рідини тою чи іншою мірою негативно впливають на фільтраційні властивості порід-колекторів. Під час їх вибору вирішується два питання:

- до якого ступеня можна допустити забруднення порід колекторів промивальною рідиною;

- які витрати можна допустити для зниження ступеня забруднення. Кінцевий вибір типу промивальної рідини здійснюють на підставі компромісного рішення між величиною витрат та ступенем забруднення, при якому свердловина була б рентабельною.

У результаті лабораторних і промислових досліджень зарубіжних та вітчизняних учених створена й успішно використовується ціла низка промивальних рідин для первинного розкриття продуктивних пластів. Усіх їх можна умовно розділити на дві групи:

1) Рідини, які не створені спеціально для розкриття продуктивних пластів, але застосовуються для цього, оскільки їх властивості відповідають умовам здійснюваної операції або необхідні властивості досягаються шляхом спеціальної хімічної обробки. До цієї групи належать глинисті розчини, лігносульфонатні розчини, полімерні розчини, обернені емульсії.

2) Рідини, спеціально створені для первинного розкриття продуктивних пластів. Зазвичай ці рідини створюються з умови найлегшого видалення їх компонентів із порід-колекторів. Ці рідини володіють малим показником фільтрації в пласт; утворюють нещільну глинисту кірку, яка легко диспергується; не закупорюють пор порід-колекторів; фільтрат таких рідин не чинить шкоди, проникаючи в пласт. Компоненти таких рідин розчиняються в нафті, кислоті чи воді або здатні біологічно розкладатися. До них належать розсоли зі спеціальною системою обважнення, крейдяні емульсії та стабільні піни.

Дана класифікація не вважається досконалою, оскільки не враховує механізму взаємодії рідини з гірською породою. У такому випадку основою класифікаційної ознаки слугує вміст твердих частинок у рідині. Рідини, які не вміщують твердих частинок, належать до так званих "чистих рідин". З них найчастіше використовують воду (морську і промислову) та водні розчини хлоридів натрію і кальцію. Останні сприяють попередженню набрякання глинистого матеріалу гірських порід. Температурні межі застосування таких рідин визначаються реагентом, який використовується для збільшення їх в'язкості. До таких рідин належать також вуглеводневі рідини та розчин метанолу, проте застосування метанолу обмежується його високою вартістю та відносно низькою термостійкістю. Вода, маючи низьку вартість і високу термостійкість, практично не володіє здатністю до інгібування. Залишаються ще розчини солей та вуглеводневі рідини. У неглибоких свердловинах можуть застосовуватися і перші, і другі, при цьому розчини солей дешевші. Для глибоких свердловин, де наявні високі тиски, вуглеводневі рідини потре-



бують обважнення і тому переходять у групи рідин, що вміщують тверду фазу. При цьому їх вартість незначно зростає. Розчини солей можуть використовуватись у глибоких свердловинах без попереднього обважнення, оскільки вони мають великі густини (розчин  $ZnBr_2$  – до  $2300 \text{ кг/м}^3$ ;  $CaJ_2$  – до  $2040 \text{ кг/м}^3$ ,  $ZnCl_2$  – до  $1930 \text{ кг/м}^3$ ), але при цьому значно зростають витрати на промивальну рідину.

Розсоли – це електроліти, які практично не викликають набрякання глини. Вони готуються на воді, яка за властивостями близька до пластової. Для збільшення в'язкості та зменшення фільтратовіддачі використовують загущувачі на основі багатоланцюгових полімерів. Для збільшення густини таких рідин до  $1680 \text{ кг/м}^3$  використовують  $CaCO_3$ , а до величини  $2300 \text{ кг/м}^3$  – суміш  $CaCO_3$  і  $Fe$ . Для видалення таких частинок із пор пласта проводять кислотну обробку. Переваги розсолів у тому, що вони створюють високий гідростатичний тиск і зберігають чистоту порід-колекторів.

“Чисті рідини” не утворюють кірки на поверхні продуктивного пласта, але як і рідини, що вміщують тверду фазу, можуть бути причиною зниження продуктивності свердловини. Це відбувається внаслідок вільного їх проникнення в пласт, наявності в рідинах сполук солей, високої концентрації сульфатів, випадання з нафт важких вуглеводнів, часткового набрякання глинистого матеріалу, наслідків діяльності мікроорганізмів.

Дослідження показали, що використання в свердловині морської води без попередньої обробки знижує початкову проникність пісковика в середньому на 80 %. Набрякання глинистого матеріалу в пісковиках відбувається тоді, коли концентрація солей у промивальній рідині вища, ніж у пластовій воді.

Таким чином, практично не існує промивальної рідини, яка б задовольняла всі вимоги технології робіт із первинного розкриття продуктивних пластів, і при цьому її вартість була б мінімальною. Тому вибір типу промивальної рідини для таких робіт у кожному конкретному випадку потрібно здійснювати індивідуально, враховуючи особливості продуктивного пласта.

Переважає більшість нафтових родовищ України характеризуються аномально низькими пластовими тисками (АНПТ). При розкритті пластів з АНПТ виникає необхідність в оцінці та аналізі основних факторів, що обмежують область застосування промивальних рідин [2]:

1. Фактор відповідності радіуса обводнення умові допустимої депресії в процесі освоєння свердловини. Радіус обводнення може бути визначений, наприклад, як функція фільтрації водних промивальних рідин у привибійній зоні і часу їх контакту з колектором.

2. Фактор відповідності фільтраційних характеристик колектора дисперсійному і гранулометричному складу промивальної рідини.

3. Фактор відповідності репресії на пласт у процесі буріння свердловини величині фільтрації в умовах свердловини.

4. Фактор відповідності густини промивальної рідини гірничо-геологічним умовам проводки свердловини.

ВАТ “Буріння” реалізуються підходи до розкриття пластів з АНПТ, згідно з якими передбачено використання: промивальних рідин малої густини; промивальних рідин із модифікованим фільтратом; спеціальних неводних рідин. Реалізація тих чи інших підходів визначається геолого-технічними умовами буріння свердловини та вимогами замовника. Із цією метою розроблено різні рецептури промивальних рідин, які дають змогу в широкому діапазоні змінювати їх густину для зниження депресії на пласт. Розроблено стійкі системи густиною до  $650 \text{ кг/м}^3$  для промивальних рідин на вуглеводневій основі і до  $900 \text{ кг/м}^3$  для промивальних рідин на водній основі.

У процесі розкриття пластів з АНПТ виникає небезпека проникнення в пласт під впливом додатного диференціального тиску не тільки фільтрату, але й самої промивальної рідини [3].

Ступінь негативного впливу на фільтраційні властивості продуктивного пласта визначається репресією на пласт у процесі буріння та її змінами в ході проведення спуско-підймальних робіт; складом і властивостями промивальної рідини; тривалістю розкриття пласта та іншими чинниками. Найсуттєвіше зниження фільтраційних характеристик в інтервалах продуктивних пластів спостерігається за інших рівних умов у тріщинуватих породах. Для тріщинуватих колекторів існує критичне значення репресії на пласт, перевищення якого призводить до повної кольматації тріщин. У такому разі неможливо видалити буровий розчин із тріщин пласта в процесі освоєння свердловини зниженням тиску на вибої свердловини.

У таблиці 1 наведено результати досліджень різних видів промивальних рідин [4] на коефіцієнт відновлення проникності з впливу. Експерименти проводилися в ідентичних умовах фільтрації через гранульований пісковик.

За величиною коефіцієнта відновлення проникності з глинистих розчинів найкраще умовам розкриття продуктивних пластів відповідають ті, які не вміщують лугів. Піни мають значно вищий коефіцієнт відновлення проникності, ніж розчини на водній основі, а розчини на вуглеводневій основі забезпечують повне відновлення проникності.

Переваги мінералізованих промивальних рідин найбільше проявляються при розкритті порід із вмістом глини. Аналізуючи дані, наведені в таблиці 2 [4], можна зробити висновок, що мінералізація розчину хлористим кальцієм більш ефективна, ніж хлористим натрієм.

Авторами [5] проведено аналіз стану розкриття продуктивних пластів на родовищах НАК “Нафтогаз України” по 78 свердловинах БУ “Укрбургаз” ДК “Укргазвидобування” та 51 свердловині ВАТ “Укрнафта”. У свердловинах БУ “Укрбургаз” продуктивні горизонти найчастіше розкривають на полімеркалієвих (34,4 %), хлоркалієвих (17,6 %) та гуматно-акрилокалієвих (17,6 %) промивальних рідинах, а ВАТ “Укрнафта” – на полімеркалієвих (41,2 %), хлоркалієвих (23,5 %) та хлоркальці-

євих (19,6 %) промивальних рідинах. Первинне розкриття продуктивних пластів буровими розчинами на нафтовій основі практично не застовується.

Таблиця 1. Вплив виду промивальної рідини на проникність породи

Вид промивальної рідини	Початкова проникність, Д	Відновлена проникність, Д	Коефіцієнт відновлення проникності
Розчин на нафтовій основі	0,72	0,72	1,00
Піна	0,58	0,55	0,94
Глинистий розчин без хімічної обробки	0,59	0,42	0,72
Глинистий розчин із добавкою 1% карбо-ксиметилцелюлози (КМЦ)	0,43	0,26	0,60
Глинистий розчин із добавкою 10% вуглелужного реагенту	0,44	0,21	0,48
Вода	0,53	0,31	0,59

Таблиця 2. Вплив солей на процес глинизації пор

Порода	Тип води	Коефіцієнт відновлення проникності
Глинистий пісковик	Дистильована вода	0,26
	1 %-й розчин NaCl	0,36
	1 %-й розчин CaCl <sub>2</sub>	0,87

У розрахунках гідродинамічної складової репресії в процесі первинного розкриття продуктивних пластів за вихідні дані приймали проектні значення густини промивальної рідини, продуктивності бурових насосів, геометричних розмірів бурильної колони, конструкції долота і свердловини. При цьому реологічні параметри промивальної рідини (динамічне напруження зсуву, пластична в'язкість) розраховували за відомими емпіричними формулами [6], а діаметр свердловини в незакріпленому стовбурі приймали таким, що дорівнює діаметру долота.

Аналіз отриманих результатів з оцінки репресії свідчить про перевищення в більшості випадків їх значень над допустимим. Особливо неприпустимо високі значення репресії мають місце в процесі розкриття продуктивних горизонтів в інтервалах з аномально низькими пластовими тисками в експлуатаційних свердловинах БУ "Укрбургаз" на глибинах, що перевищують 2500 м. В інтервалах з АНПТ використовуються бурові промивальні рідини густиною 1100–1160 кг/м<sup>3</sup>, що призводить до виникнення аномально високих репресій, які в деяких випадках перевищують 20 МПа. Після буріння таких свердловин можна прогнозу-

вати ускладнення в їх освоєнні. Необхідно виконувати додаткові роботи для викликання пластового флюїду та його інтенсифікації. При формуванні фільтраційної кірки внаслідок проникнення фільтрату і твердої фази промивальних рідин у природні чи примусово розкриті тріщини на значну відстань від свердловини суттєво погіршуються колекторські властивості продуктивних пластів. Тому для розкриття пластів з АНПТ доцільно використовувати бурові промивальні рідини меншої густини (аеровані, інвертно-емульсійні та інші).

Викликати приплив із таких пластів стає неможливим, але уникнути головної причини поглинань можна зменшенням диференціального тиску до нуля, тобто необхідно підтримувати рівновагу між тиском у свердловині й пластовим тиском (збалансоване буріння) або навіть створити від'ємний диференціальний тиск.

Від'ємного диференціального тиску на пласт можна досягти шляхом зниження рівня рідини у свердловині, що реалізується за роторного способу буріння з місцевим промиванням або в процесі буріння за допомогою електробура на кабелі. З тією ж метою можна застосовувати ударне буріння або циркуляційну систему з подвійною концентричною бурильною колоною – ерліфтом. Внутрішнім каналом подвійної бурильної колони подається промивальна рідина, а кільцевим – повітря. Нижня частина подвійної колони приєднується до звичайної бурильної колони, якою промивальна рідина продовжує рух униз, а повітря в цьому місці виходить у свердловину й аерує промивальну рідину, яка рухається від вибою. Тиск у свердловині може регулюватися двома параметрами: глибиною спускання подвійної бурильної колони або ступенем аерації.

Найчастіше диференціальний тиск зменшують за рахунок застосування легких промивальних рідин або газів. Якщо коефіцієнт аномальності пластового тисках менший за одиницю, але близький до неї ( $0,9 < k_a < 1,0$ ), то рівновагу тисків можна забезпечити використанням рідин на вуглеводневій основі. Якщо  $k_a < 0,9$ , то для підтримання рівноваги тисків можуть бути використані аеровані розчини і піни. При дуже низьких пластових тисках ( $k_a < 0,4$ ) у сприятливих умовах розкриття продуктивних пластів можна проводити з використанням газоподібних агентів або способу буріння з місцевим промиванням.

Найбільш складними, з точки зору якісного розкриття продуктивної зони, є умови, коли величина пластового тиску нижча від гідростатичного. Для підтримання рівноваги тисків, як уже зазначалося, можна знизити густину промивальної рідини шляхом її аерації, підключивши компресор до напірної лінії циркуляційної системи бурової. Підтримання рівноваги тисків найпростіше можна досягнути зміною ступеня аерації (відношення об'ємної витрати газу до об'ємної витрати рідини).

Однак застосування аерованої рідини на водній основі, навіть обробленої ПАР, не дає змогу уникнути забруднення пласта фільтратом.

Для розкриття продуктивних об'єктів із пластовими тисками, коефіцієнт аномальності яких знаходиться в межах 0,4–1,0, можна проводити із застосуванням пін.

Піни мають властивості, які надають їм перевагу перед усіма промивальними рідинами на водній основі, а саме:

- запобігання проникненню фільтрату в пласт за рахунок заклинювання пухирців піни в порових каналах;

- забезпечення винесення вибуреної породи завдяки високій несучій здатності піни;

- можливість досягнення малої густини та її зміни в широкому діапазоні. Розробка малопроникних пластів з аномально низьким тиском і великою в'язкістю нафти, виснажених після тривалої експлуатації стає нерентабельною. Для збільшення продуктивності свердловин до економічно прийняттого рівня необхідно, щоб вони мали значно більшу, ніж звичайні свердловини, довжину в продуктивному пласті, тобто мали більшу зону дренажу й більшу поверхню фільтрації. Цього можна досягнути шляхом буріння багатовибійних і горизонтальних свердловин.

Багатовибійні свердловини мають у нижній частині розгалуження у вигляді декількох різнопохилих стовбурів, які перетинають продуктивні пласти й утворюють велику сумарну зону дренажу.

Свердловина з горизонтальним розкриттям пласта має один стовбур, який максимально різко переходить із вертикального в горизонтальний у межах продуктивної зони. У такій свердловині довжина частини стовбура, що проходить уздовж пласта, не залежить від його товщини і може в десятки разів перевищувати її.

Особливо доцільно розробляти таким способом пласти з вертикально-розвиненою тріщинуватістю і з неоднорідною пористістю.

Буровики Прикарпаття мають великий досвід буріння горизонтальних і багатовибійних свердловин. Одне з Бориславських родовищ розроблялось із 1914 року густою мережею свердловин, які були пробурені на відстані 30–80 м одна від одної. На невеликій площі було пробурено 23 свердловини з дебітами до 2 т за добу. У 70-х роках поміж ними було пробурено три свердловини, одна з яких мала 5 додаткових стовбурів, друга – 3, а третя пробурена одним горизонтальним стовбуром по нафтоносному пісковіку на довжину 100 метрів. Початкові дебіти свердловин становили відповідно 28 т, 12 т і 16 т за добу, а вартість їх спорудження перевищувала в 1,5–2,5 рази вартість вертикальних свердловин. Унаслідок цього було отримано тисячі тонн додаткової нафти на неперспективній, виснаженій ділянці. За два роки експлуатації дві багатовибійні й одна горизонтальна свердловини перевершили видобуток 23 вертикальних свердловин. Ці результати, на що особливо важливо наголосити, свідчать про наявність великих залишкових запасів нафти, навіть у пластах, які вважаються виснаженими.

Крім того, в умовах нерівномірної пористості й проникності пластів між вертикальними свердловинами залишаються, як правило, ізольовані зони, які не охоплюються розробкою. Таким чином, багатовибійні й горизонтальні свердловини підвищують не тільки поточний видобуток, але й загальний відбір нафти з покладів.

Вітчизняна і зарубіжна практики свідчать, що буріння горизонтальних і багатовибійних свердловин значно зменшує витрати на розробку родовищ, що сприяє його інтенсивному впровадженню.

Виходячи з викладеного, можна зробити висновок, що висока якість розкриття продуктивних пластів з аномально низьким пластовим тиском може бути досягнута за науково обґрунтованого підходу до вибору типів і властивостей промивальних рідин, а також способу розкриття пластів з урахуванням конкретних гірничо-геологічних умов буріння.

1. Единые технические правила работ при строительстве скважин на нефтяных, газовых и газоконденсатных месторождениях. – М. : [б. и.], 1983.
2. Кошелев В. Н. Обеспечение качественного вскрытия продуктивных пластов в условиях аномально низких пластовых давлений / В. Н. Кошелев, С. Н. Шишков // Нефтяное хозяйство. – 2007. – № 6. – С. 38–41.
3. Коцкулич Я. С. Закінчування свердловин / Я. С. Коцкулич, О. В. Тищенко. – К. : Інтерпрес ЛТД, 2004. – 366 с.
4. Справочник инженера по бурению : в 2 т. / под ред. В. И. Мищевича и Н. А. Сидорова. – М. : Недра, 1973. – Т. 2.
5. До оцінки первинного розкриття продуктивних горизонтів на родовищах України / М. А. Мислюк, І. М. Ковбасюк, В. М. Стасенко, М. В. Гунда // Нафтова і газова промисловість. – 2005. – № 6. – С. 17–19.
6. Мислюк М. А. Буріння свердловин : довідник / М. А. Мислюк, І. Й. Рибчич, Р. С. Яремійчук : у 5 т. – К. : Інтерпрес ЛТД, 2002. – Т. 2 : Промивання свердловин. Відробка доліт. – 303 с.

## BEING OF QUALITY OF FIRST OPENING OF PRODUCTIVE LAYERS WITH ANOMALOUS LOW PRESSURES

**Y.S. Cotsculich**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine  
e-mail: drill@nung.edu.ua*

*Materials of the article allow to conclusion that high quality of opening of productive layers with anomalous low plast pressure can be attained at the scientifically grounded approach to the choice of types and properties of washing liquids, and also method of opening of layers taking into account the concrete mountain-geological terms of the boring drilling.*

**Key words:** *opening of productive layers, plast pressure, washing liquid, mountain-geological terms of the boring drilling of mining holes.*

## НОВІ ТЕХНОЛОГІЇ ІНТЕНСИФІКАЦІЇ ВИДОБУВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТА ГАЗОВОГО КОНДЕНСАТУ З РОДОВИЩ

**Р.М. Кондрат, О.Р. Кондрат**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*За результатами експериментальних та теоретичних досліджень створено технології активного впливу на процеси розробки родовищ природних газів із метою інтенсифікації видобування вуглеводнів і збільшення газо- і конденсатовилучення. Запропоновані технічні пристрої для їх реалізації.*

*Ключові слова: родовище, газ, конденсат, вода, розробка, експлуатація, стадія, інтенсифікація, газоконденсатовилучення, дебіт, активний вплив.*

Нафта і газ відіграють провідну роль у паливно-енергетичному балансі України. Разом вони забезпечують понад 55,4% первинної енергії, що споживається, в т. ч. природний газ – 45,6%. Домінуюча роль природного газу в паливно-енергетичному балансі України збережеться на найближчі десятиріччя.

Зараз в Україні видобувається 20 млрд м<sup>3</sup> природного газу на рік, а споживається майже 76 млрд м<sup>3</sup>. За рахунок власного видобутку потреба в газі задовольняється лише на 26 %. Більша частина газу імпортується з Російської Федерації і середньоазіатських країн. Ціна газу на світовому ринку постійно зростає. У цих умовах високоактуальним завданням державного значення є нарощування власного видобутку природного газу в Україні з одночасним зменшенням його споживання за рахунок упровадження енергоресурсозберігаючих технологій та обладнання в промисловості, сільському та комунальному господарствах і використання альтернативних джерел енергії.

Збільшення власного видобутку природного газу та газового конденсату в Україні може бути досягнуто за рахунок відкриття та введення в розробку нових родовищ, а також інтенсифікації розробки й збільшення ступеня вилучення вуглеводнів із родовищ, що розробляються. Нові родовища, відкриті останнім часом, характеризуються порівняно невеликими запасами газу. Тому в найближчі роки основний видобуток природного газу й газового конденсату в Україні буде забезпечуватись із родовищ, що розробляються.

Теперішній стан газовидобутку в Україні характеризується виснаженням основних за запасами вуглеводнів газових і газоконденсатних родовищ. Більшість із них вступила в період спадаючого річного видо-

бутку природного газу та газового конденсату й завершальну стадію розробки. Проте ці родовища ще забезпечують основний видобуток газу та конденсату і вміщують значні залишкові запаси вуглеводнів. До них відносяться газ і конденсат, що залишились у газонасиченій частині родовищ і в зонах пласта і не були охоплені розробкою; защемлений газ і конденсат в обводнених зонах родовищ; сконденсовані вуглеводні у виснажених газоконденсатних родовищах; нафта в невеликих за розмірами і запасами об'єктах і зв'язана нафта в газоконденсатних родовищах. За промисловими даними після завершення розробки родовищ у пласті може залишатись до 10–30% газу від початкових запасів. Коефіцієнт конденсатовилучення газоконденсатних родовищ, що розробляються в режимі виснаження пластової енергії, в ряді випадків досягає дуже низьких значень (13–40%), а коефіцієнт вилучення нафти з нафтових об'єктів не перевищує 10%. В умовах гострого дефіциту вуглеводневої сировини проблема збільшення ступеня вилучення вуглеводнів із надр має державне значення, що вимагає пошуку нових технологій розробки родовищ, у тому числі нетрадиційних.

В ІФНТУНГ упродовж багатьох років виконуються теоретичні та лабораторні дослідження, а також широкомасштабні промислові роботи з інтенсифікації видобування вуглеводнів і підвищення вуглеводневилучення з родовищ природних газів. За результатами виконаних досліджень запропоновано принципово нові підходи до розробки родовищ, які ґрунтуються на активному впливі на процесі видобування вуглеводнів і включають комплексний активний вплив на пласт, привибійну зону і стовбур свердловин.

Суть технологій активного впливу на процеси розробки родовищ полягає в тому, що за промисловими даними про розробку родовищ та експлуатацію свердловин встановлюють чинники, які негативно впливають на процеси видобування вуглеводнів, та причини, що їх викликають. На основі виконаного аналізу здійснюють пошук більш ефективних технологій видобування вуглеводнів із числа відомих чи дослідження та обґрунтування нових технологій, які дають змогу зменшити вплив негативних чинників чи взагалі усунути причини негативності, а в окремих випадках навіть примусити раніше негативні чинники відігравати позитивну роль у процесах видобування газу і конденсату. Нижче на прикладі газових родовищ, що розробляються в умовах водонапірного режиму, і газоконденсатних родовищ показана ефективність застосування технологій активного впливу на процеси видобування вуглеводнів.

Більшість родовищ природних газів приурочена до пластових водонапірних систем. У процесі відбору газу з родовища створюється перепад тиску між законтурною водоносною й газовою зонами, за рахунок якого вода з навколишнього водяного басейну поступає в газонасичену частину пластів. Просування води в родовище призводить до защемлення частини газу в пористому середовищі та поступового обводнення видобувних свердловин. У випадку газоконденсатних родовищ разом із

газом защемлюється вуглеводневий конденсат. У зв'язку з неоднорідною будовою та нерівномірним дренаванням продуктивних відкладів газоводяний контакт просувається вибірково продуктивним розрізом і площею газонасиченості. Це призводить до передчасного обводнення видобувних свердловин за рахунок випереджуючого руху води окремими високопроникними прошарками й відтинання фронтом води окремих ділянок пласта з початковою газонасиченістю, які вода обійшла. З появою води в продукції різко зменшуються дебіти газу, і свердловини поступово зупиняються через глушіння їх водою. Для забезпечення відбору газу зі свердловин необхідно проводити в них ізоляційні роботи з обмеження припливу пластової води й застосовувати ефективні методи винесення рідини з вибою на поверхню. Поступлення у свердловини високомінералізованих пластових вод призводить також до інтенсифікації процесів корозії газопромислового обладнання та солевідкладень.

Таким чином, до негативних чинників прояву водонапірного режиму в процесі розробки родовищ природних газів відносяться защемлення частини газу водою в пористому середовищі та обводнення свердловин. У результаті цього зменшується коефіцієнт кінцевого газовилучення й погіршуються техніко-економічні показники розробки родовища. Причиною виникнення негативних чинників є наявність законтурних пластових вод, які завжди поступатимуть у родовище під час відбору з нього газу. Тому родовище необхідно розробляти за такою технологією, при якій вплив законтурних пластових вод на процес розробки буде мінімальним.

З метою пошуку ефективної технології підвищення коефіцієнта газовилучення родовищ із водонапірним режимом виконано серію лабораторних експериментів на вертикальних циліндричних моделях пласта довжиною 2,12–2,44 м і внутрішнім діаметром 0,046–0,098 м. Як пористе середовище використовувалася суміш кварцового піску з маршалітом і штучно зцементований кварцовий пісок проникністю від 0,02 до 4 мкм<sup>2</sup> і пористістю від 0,127 до 0,44. Коефіцієнт початкової газонасиченості становив 0,44–0,74, початковий пластовий тиск – 4,74–10 МПа. Під час проведення дослідів моделювання заводнення моделі пласта за постійного тиску й неперервного зниження тиску з різним темпом, плавного зниження тиску в обводненій моделі пласта на певну величину з тривалим промиванням її водою на кожному етапі зниження тиску до припинення винесення пухирців газу, неперервне зниження тиску в обводненій моделі пласта з певним темпом; вивчалася фільтрація вільного газу через обводнену модель пласта із защемленим газом.

За результатами виконаних досліджень встановлено закономірності поведінки защемленого газу в обводнених моделях пласта і вилучення з них защемленого газу. Згідно з дослідними даними, в початковий період зниження тиску в обводнених моделях пласта защемлений газ, здебільшого, розширюється, залишаючись майже нерухомим. Після зниження тиску в моделі пласта на 23–34% порівняно з тиском обводнення насиченість пористого середовища нерухомим газом досягає певного крити-

чного значення (34–37%). При подальшому зниженні тиску весь газ, що розширюється, стає рухомим і видобувається з моделі пласта. У початковий період зниження тиску з моделі пласта видобувається в основному вода. Дебіт води набуває максимального значення, потім різко знижується. Дебіт газу і газоводяний фактор поступово зростають, досягають максимуму при зниженні тиску відповідно на 0,3–0,32 і 0,25 від тиску заводнення і в подальшому зменшуються. Защемлення газу водою в пористому середовищі, його розширення під впливом зниження тиску і подальший рух призводять до істотного зниження фазової проникності для води – від 24 до 100 разів і більше. Вільний газ практично без утрат проходить через обводнене пористе середовище із защемленим газом, а в деяких випадках навіть захоплює із собою частину раніше защемленого газу.

З використанням отриманих закономірностей поведінки защемленого газу в обводненому пористому середовищі і результатів теоретичних досліджень розроблено нові технології активного впливу на процеси розробки родовищ природних газів із метою інтенсифікації видобування газу й збільшення газовилучення. Вони включають технології регулювання просування пластових вод у процесі розробки родовища, вторинного видобутку защемленого газу з обводнених пластів на стадії дорозробки родовищ, утилізації супутних пластових вод, видобутих зі свердловин разом із газом, та інтенсифікації роботи обводнених газових і газоконденсатних свердловин.

Для регулювання просування в родовище пластових вод рекомендується експлуатувати обводнені газові свердловини, розташовані на водонебезпечних напрямках, шляхом створення відповідних умов для розширення й руху защемленого газу. При цьому темп відбору води зі свердловини повинен бути більшим за темпи поступлення її в зону розташування свердловин. Навколо кожної обводненої свердловини в процесі відбору з неї газу з водою утворюється зона пониженого тиску. Це призводить до розширення й руху защемленого газу і, відповідно, до зниження фазової проникності пористого середовища для води. У результаті сповільнюється просування пластової води в зону розташування свердловин, що сприяє вирівнюванню контуру газонасиченості. Одночасно з виконанням задачі регулювання просування фронту води в розробку залучається макрозашемлений газ із зон пласта, які вода обійшла, і видобувається з обводненої зони частина мікрозашемленого газу, що знаходиться в окремих порових каналах, як за рахунок відбору його разом із водою, так і за рахунок поступлення в газонасичену частину пласта. При цьому також відбувається повніше вироблення газонасичених прошарків у продуктивному розрізі обводнених свердловин і попереджується передчасне обводнення сусідніх видобувних свердловин.

Таким чином, у запропонованому методі активного впливу на процес розробки газових родовищ негативний наслідок прояву водонапірного режиму – защемлення газу водою використовується для регулювання просування в родовище пластової води.

Для родовищ, розробка яких завершена при повному обводненні всіх видобувних свердловин або які вступили в завершальну стадію розробки, збільшення коефіцієнта газовилучення досягається шляхом організації вторинного видобутку защемленого газу з обводнених пластів. Для видобування защемленого газу використовуються наявні обводнені свердловини. Згідно з наведеними вище результатами експериментальних досліджень із метою забезпечення видобування разом із водою защемленого газу тиск в обводненій зоні необхідно знизити щодо тиску, який відповідає максимуму газоводяного фактора. А для цього необхідно, щоб темп відбору води з обводнених свердловин перевищував темп поступлення її в родовище з навколишнього водоносного басейну.

Реалізація технологій регулювання просування в родовище пластової води і вторинного видобутку защемленого газу з обводнених пластів пов'язана з відбором та утилізацією значних об'ємів високомінералізованої пластової води. Запропоновано методи утилізації супутньої пластової води, які включають використання її для підтримання пластового тиску в нафтових і газоконденсатних покладах, якщо такі є поблизу родовища; нагнітання у водопоглинаючі пласти чи в законтурну частину цього самого родовища в зоні сповільненого просування пластової води; перепускання через свердловини, розташовані в периферійній частині родовища, у виснажені газові поклади, якщо такі є в продуктивному розрізі родовища; нагнітання в низькопроникні газонасичені ділянки родовища з метою витіснення з них газу у високопроникні ділянки.

Необхідною умовою успішного впровадження запропонованих технологій активного впливу на процеси розробки родовищ природних газів в умовах водонапірного режиму є забезпечення стабільної роботи видобувних свердловин із великим вмістом рідини (води і вуглеводневого конденсату) в пластовій продукції.

В ІФНТУНГ за результатами експериментальних досліджень на моделі свердловини, теоретичних дослідних і дослідно-промислових робіт запропоновано нові технології й технічні пристрої для інтенсифікації роботи обводнених газових і газоконденсатних свердловин. Вони включають нові аналітичні залежності для визначення мінімально необхідного дебіту газу з метою забезпечення стабільної роботи обводнених газових і газоконденсатних свердловин, вибору оптимального діаметра колони насосно-компресорних труб (НКТ) і тиску на гирлі, за яких забезпечується фонтанування свердловин; нові типи плунжерів для плунжерного піднімача й пінопакерний плунжерний піднімач; нові конструкції диспергуючих пристроїв для створення однорідного газорідного потоку в НКТ; нові композиції спінюючих ПАР та інгібіторів корозії і солевідкладення для винесення рідини зі свердловин і боротьби з корозією обладнання та солевідкладеннями; нові способи періодичного введення піноутворювача з інгібіторами корозії та солевідкладення в газорідний потік; нові способи винесення рідини зі свердловин за допомогою трифазних пін і з використанням газовиділяючих агентів; нові способи

регенерації відпрацювання розчинів спінюючих ПАР та піногасіння на промислових установках комплексної підготовки газу.

Принципова схема реалізації технології активного впливу на процес обводнення родовищ природних газів наведена на рис. 1. Технологія забезпечує регулювання просування в родовище пластових вод; зменшення розмірів обводненої зони пласта, кількості обводнених свердловин та об'ємів защемленого газу; вторинний видобуток защемленого газу з обводнених пластів; збільшення поточних відборів газу і конденсату; покращення техніко-економічних показників розробки родовищ і збільшення на 10–15% коефіцієнтів кінцевого газо- і конденсатовилучення.

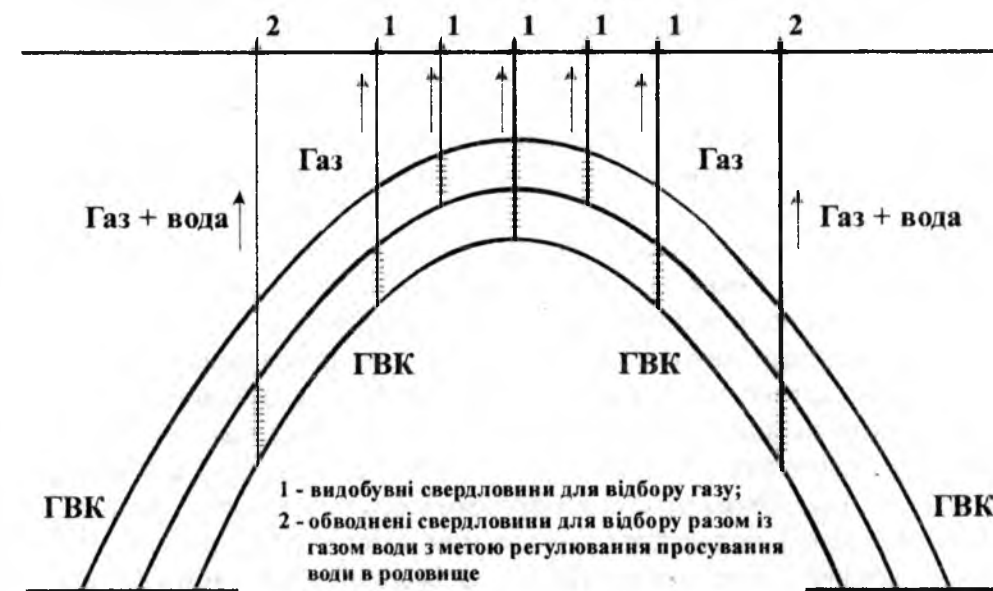


Рис. 1. Схема реалізації технології активного впливу на процес обводнення родовищ природних газів

Більшу частку загального видобутку газу в Україні забезпечують газоконденсатні родовища. Разом із газом видобувають вуглеводневий (газовий) конденсат. Основним методом підвищення конденсатовилучення з газоконденсатних родовищ, який застосовується в зарубіжній практиці, є сайклінг-процес – підтримання пластового тиску шляхом зворотного нагнітання в родовище сухого відбензиненого газу. При реалізації сайклінг-процесу коефіцієнт конденсатовилучення досягає 55–75%. В Україні сайклінг-процес упроваджено тільки на п'яти газоконденсатних покладах, що пов'язано з необхідністю значних капітальних вкладень і тривалою консервацією запасів газу.

В ІФНТУНГ за результатами експериментальних досліджень на моделях пласта розроблено альтернативні сайклінг-процесу технології підтримання пластового тиску в газоконденсатних родовищах шляхом заводнення (за тисків початку конденсації і максимальної конденсації вуглеводневої суміші; за тисків, що відповідають конденсації з газу ва-

жких фракцій вуглеводневого конденсату й мінімальним значенням в'язкості та густини сконденсованих вуглеводнів), нагнітання об'ямівок вуглеводневого розчинника, водних чи конденсатних розчинів ПАР із подальшим нагнітанням води; почергового нагнітання води і газу; нагнітання водних розчинів ПАР і газу; нагнітання сухого газу в низькопроникні пласти і води у високопроникні пласти. Наведені технології дають можливість досягти значно більших коефіцієнтів конденсатовилучення порівняно з розробкою родовищ на виснаження.

Більшість газоконденсатних родовищ України розробляється в режимі виснаження пластової енергії з випадінням із газу в пористому середовищі частини вуглеводневого конденсату. Запаси сконденсованих вуглеводнів після завершення розробки газоконденсатних родовищ становитимуть десятки мільйонів тонн, тому проблема видобування їх із пласта є актуальною.

Одним із можливих напрямів видобутку сконденсованих вуглеводнів із виснажених родовищ є витіснення їх із пористого середовища різними робочими агентами. З метою вибору ефективних агентів для витіснення з пористого середовища сконденсованих вуглеводнів у ІФНТУНГ виконано комплекс лабораторних досліджень на насипних моделях пласта, а також на зцементованих моделях пласта з використанням реальних зразків пісковиків і пластових флюїдів.

За результатами виконаних досліджень для практичного використання рекомендовано такі технології збільшення конденсатовилучення з виснажених газоконденсатних родовищ: здійснення водогазової репресії (циклічного нагнітання води і газу) як у необводнених, так і в обводнених пластах; нагнітання об'ямівки вуглекислого газу з переміщенням її по пласту водою й подальшим здійсненням водогазової репресії; нагнітання об'ямівки поверхнево-активної полімервмісної системи (композиції одного або декількох ПАР і полімеру), об'ямівки конденсату чи об'ямівки конденсатного розчину ПАР з переміщенням їх по пласту водою й подальшим здійсненням водогазової репресії чи з безпосереднім здійсненням водогазової репресії без попереднього нагнітання води.

Розробка газоконденсатних родовищ у режимі виснаження пластової енергії супроводжується скупченням газового конденсату в привибійній зоні свердловин, що призводить до зниження поточних об'ємів відбору газу і конденсату. В ІФНТУНГ за результатами досліджень на моделях пласта розроблено технології збільшення продуктивності газоконденсатних свердловин шляхом періодичних оброблень привибійних зон пласта розчинами ПАР та хімреагентів. Залежно від проникності порід, насиченості зв'язаною водою й ступеня забруднення пористого середовища використовують водні, водометанольні, метанольні, кислотометанольні розчини водорозчинних ПАР або конденсатні розчини нафторозчинних ПАР. У випадку високої водонасиченості пористого середовища й забруднення його важкими вуглеводнями в привибійну зону може попередньо нагнітатись вуглеводневий розчинник чи водопоглинач.

На рис. 2 наведено принципову схему технологічного процесу збільшення вуглеводневилучення з виснажених газоконденсатних покладів шляхом витіснення з пористого середовища сконденсованих вуглеводнів. Технологія включає нагнітання в поклад через нагнітальні свердловини запропонованих робочих агентів, витіснення ними з пористого середовища до видобувних свердловин сконденсованих вуглеводнів і пластового газу, періодичне оброблення привибійних зон видобувних свердловин розчинами ПАР і хімреагентів із метою очищення пористого середовища від сконденсованих вуглеводнів та інтенсифікації припливу газоконденсатної суміші до свердловин і використання газогідродинамічних, фізико-хімічних та механізованих методів винесення рідини (вуглеводневого конденсату і води) з вибою свердловин на поверхню. На рис. 2 зображено газліфтний спосіб експлуатації видобувних свердловин. З метою підвищення приймальності нагнітальних свердловин і коефіцієнта охоплення пластів розробкою нижня частина насосно-компресорних труб у нагнітальних свердловинах обладнується спеціальними пристроями-вібраторами для акустичного впливу на привибійну зону.

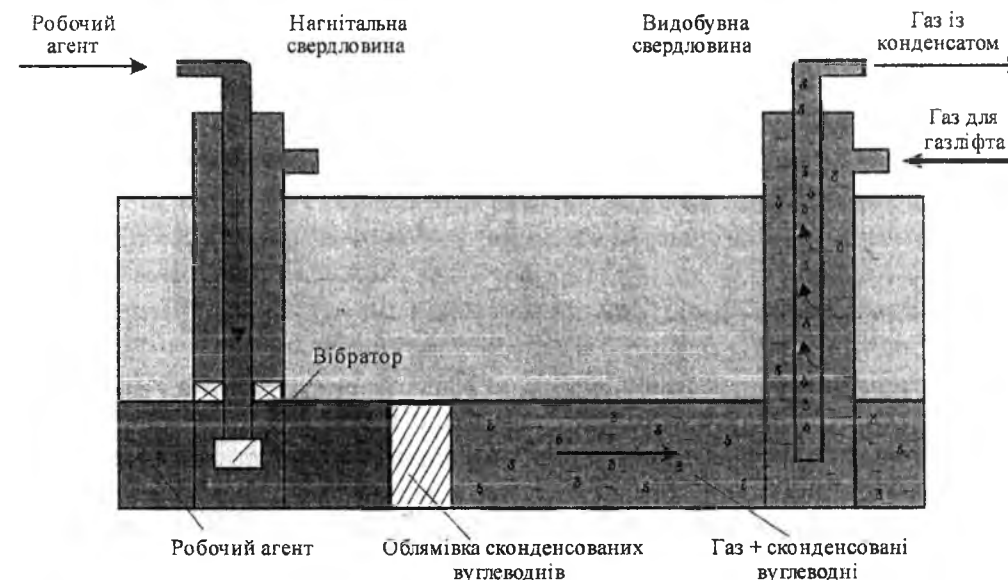


Рис. 2. Схема реалізації технології підвищення вуглеводне вилучення з виснажених газоконденсатних покладів

Запропоновані технології активного впливу на процеси розробки родовищ природних газів із метою інтенсифікації видобування вуглеводнів та збільшення газо- і конденсатовилучення пройшли промислові випробовування, здані відомчим комісіям, оформлені відповідними керівними документами, інструкціями та стандартами підприємств і застосовуються на родовищах природних газів України, а також Оренбурзькому та Ямбурзькому родовищах Російської Федерації.

## THE NEW TECHNOLOGY OF INTENSIFICATION OF GAS AND CONDENSATE OF FIELD RECOVERY

**R.M. Kondrat, A.R. Kondrat**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*As a result of experimental and theoretical investigations and experimental and industrial tests the technology of active influence on the processes of gas fields development aimed at intensification of hydrocarbons recovery and enhancement of gas and condensate recovery have been developed. The hardware for their realization have been proposed.*

**Key words:** *field, gas, condensate, water, development, exploitation, stage, intensification, gas condensate recovery, flow rate, active influence.*

УДК 622.276.1/7

## ПРОБЛЕМИ ТА ЕФЕКТИВНІСТЬ УПРОВАДЖЕННЯ ГОРИЗОНТАЛЬНИХ СВЕРДЛОВИН У ГАЗО-І НАФТОВИДОБУВНІЙ ГАЛУЗІ

**В.С. Бойко<sup>1</sup>, Р.В. Бойко<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. (03422)99-41-96, e-mail: [public@ifdtung.if.ua](mailto:public@ifdtung.if.ua)*

<sup>2</sup>*ГПУ "Львівгазвидобування" ДК "Укргазвидобування"  
79026, м. Львів, вул. І. Рубчака, 27  
тел. (0322)23-36-64, e-mail: [R.Boyko@LGV.com.ua](mailto:R.Boyko@LGV.com.ua)*

*Проаналізовано доцільність та ефективність застосування горизонтальних свердловин для розробки і дорозробки нафтових і газових родовищ в Україні.*

**Ключові слова:** *розробка, нафтове родовище, газове родовище, горизонтальна свердловина, ефективність, нафтогазовилучення.*

Розвиток економіки будь-якої держави здебільшого визначається наявністю, повнотою освоєння й рівнем використання паливно-енергетичних ресурсів, забезпечення частиною з яких, зокрема нафтою і газом, залишається надзвичайно актуальним. В Україні за наявності сировинної нафтової і газової бази гостро стоїть проблема підвищення повноти її ефективності освоєння родовищ, збільшення поточного видобутку власної нафти і газу.

Україна належить до найстаріших нафтовидобувних держав світу (наприкінці XIX ст. Галичина займала 3-тє місце у світі з видобутку нафти, поступаючись тільки Росії та США), а відтак – і до газовидобувних держав (1913 р. у Дашаві одержано фонтан природного газу, а 1929 р. завершено спорудження першого магістрального газопроводу в Україні "Дашава–Львів"). За цей час у нафтогазовій галузі України досягнуто значних здобутків, а наше завдання – їх збагатити. Безперечно, Україна власною нафтою не забезпечена, і немає підстав вважати, що буде мати достатню кількість власної нафти в майбутньому. Україна є політично незалежною європейською державою. Проте постає питання економічної незалежності, яке полягає в тому, що вона власними фінансовими ресурсами покриє все необхідне для функціонування своєї економіки, тобто не розпочне все виробляти сама, а за потреби – купить, як це робиться, для прикладу, в Японії з енергоресурсами. На основі цих засад з урахуванням соціально-політичних, геологічних, економічних та гідрогазодинамічних умов і виробилося наше бачення концепції впровадження горизонтальних свердловин у нафтовій і газовій промисловості України.

Нафтова промисловість України, як і більшості високорозвинутих країн світу, пройшла період максимального обсягу видобутку нафти, за



яким неминуче настає спад. В Україні на сьогодні розробляється основних 86 нафтових і 95 газових та газоконденсатних родовищ. Обсяги видобутку власної нафти становлять лише 13,5% і газу – 20% від потреби. Виробленість початкових видобувних запасів становить 70% щодо нафти й 65% – газу, причому структура запасів постійно погіршується, коли категорія важковидобувних запасів нафти сягає 70%. Власний видобуток нафти становить 3,8–4,2 млн т.

На розроблюваних родовищах середній поточний коефіцієнт нафтовилучення становить 22,4% (в Передкарпатті – 16,4% і ДДЗ – 39,5%), а очікуваний кінцевий коефіцієнт нафтовилучення в разі застосування традиційних методів розробки оцінюється в 35,2% (у Передкарпатті – 25,4% і ДДЗ – 46,1%), тобто ще може бути видобуто 153,2 млн т нафти, і в надрах залишиться 758,5 млн т.

За весь період (понад 100 років), що минув із часу відкриття в Україні покладів нафти і газу шляхом буріння свердловин, із надр видобуто 267,8 млн т нафти (або 63,6% від початкових видобувних запасів 420,8 млн т), а залишкові видобувні запаси становлять 153,2 млн т (поточні геологічні запаси – 911,7 млн т; початкові геологічні запаси 1179,5 млн т).

З 1972 р. видобуток нафти зменшується на 1,7–3,4% за рік. Основна причина падіння видобутку – високий ступінь виснаженості основних старих родовищ та відсутність нових, які змогли б компенсувати природне падіння видобутку нафти. Другою причиною є погіршення структури запасів через збільшення частки (до 57%) важковидобувних нафт (водонафтові і підгазові зони, низькопроникні колектори, високов'язкі нафти). По-третє, прирости запасів, одержаних за останнє п'ятнадцятиріччя, як правило, розсіяні на незначних за запасами розвіданих площах та на родовищах із великими глибинами залягання продуктивних пластів або з розміщенням у шельфовій зоні, що суттєво ускладнює можливість їх освоєння й одержання значних обсягів видобутку.

Звідси й повинні формуватися напрямки і стратегія розвитку нафтової і газової промисловості як на найближчий період, так і на далеку перспективу. Головне, слід пам'ятати, що нафта і газ належать до невідтворюваних природних енергетичних ресурсів, а запаси їх є матеріальною цінністю українського народу.

На наш погляд, існують шляхи забезпечення України вуглеводнями (нафтою і газом): 1) імпорт нафти (маємо 87,8% із Російської Федерації) і газу; 2) економія споживання; 3) оптимізація пошуків нових великих родовищ, у т. ч. у нових перспективних районах; 4) нарощування нафтогазовидобутку з відкритих і розроблюваних родовищ, у т. ч. із родовищ з малими запасами; 5) пошуки нетрадиційних джерел (горючі сланці типу менілітових, бітуми, газогідрати, у т. ч. у Чорному морі, метан вугільних покладів) і раціональних альтернатив нафті та природному газу (вітрова і сонячна енергії, синтетичні вуглеводні, у т. ч. із ріпаку тощо); 6) поглиблення переробки нафти (маємо 54,3%, у США – 90% і Німеччині – 83%) та газоконденсату; 7) використання інтелектуального і ви-

робничого потенціалу України (в першу чергу, пов'язаного з видобуванням нафти і газу) в інших державах.

Оперативними шляхами збільшення сировинних ресурсів та поточного рівня нафтогазозабезпечення слід вважати імпорт нафти та газу й певною мірою пов'язане з ним використання інтелектуального й виробничого потенціалу та інтенсифікацію нафтогазовидобування на відкритих і розроблюваних родовищах. Водночас роботи за іншими шляхами нафтозабезпечення не повинні скорочуватись, а розширюватись з огляду на довготривалу перспективу. Тут достатньо наголосити хоча б на тому, що імпорт нафти до цього часу пов'язаний виключно з одним джерелом – східними регіонами Російської Федерації (87,8% з переробки нафти). Такий стан свідчить про нездорову залежність від одного партнера, посилення якої можна кваліфікувати як тенденцію до перетворення зв'язків на неокolonіальні.

У розвинутих країнах світу приріст у паливно-енергетичному споживанні часто забезпечується за рахунок економії, при цьому її слід розуміти і як ресурсозбереження (точніше, ресурсощадність), і як здійснення структурних змін у споживанні нафти, газу та інших енергоносіїв (вугілля, сонячна і водна енергії тощо). Основним показником раціональності використання енергоносіїв є енергомісткість валового національного продукту, яка була в колишньому Союзі вищою, ніж у США, і в 2,5 рази вищою, ніж у країнах Західної Європи. Оскільки в Україні зосереджено високоенергомісткі виробництва (чорна металургія, хімічні виробництва, важке машинобудування), то для неї цей показник є ще вищим.

Перспективні ресурси нафти оцінюються в 125 млн т. В аспекті видобування цих ресурсів для визначення їх структури щодо величини запасів родовищ ми застосували метод оцінки ресурсів із використанням статистичного розподілу Парето і з виконанням умови рандомізації, тобто випадкового, нескерованого відбору. Застосування розподілу Парето може бути зумовлене так званими властивостями фрактальності Землі й стратиграфічних горизонтів, що її складають. Таку оцінку нами проведено стосовно до Передкарпаття і Дніпровсько-Донецької западини (ДДЗ). Встановлено високу ймовірність відкриття великої кількості малих родовищ у цих регіонах, при цьому кращою є ситуація в ДДЗ. Зокрема, встановлено, що можна очікувати відкриття значної кількості (близько 20) середніх (3–10 млн т.) і дуже великої кількості (близько 900) малих (менше 3 млн т.) родовищ на Передкарпатті. У Східному регіоні ще не відкрито частину (8–9) великих родовищ, властивих цьому регіонові (запаси 10–30 млн т.), а також великої кількості середніх (близько 100) і малих родовищ. На сьогодні завданням є вироблення методології ефективного освоєння таких малорозмірних родовищ.

Оскільки Україна не може повною мірою забезпечити себе нафтою ні сьогодні, ні в майбутньому, то нашим обов'язком є розподілення залишкових запасів нафти в надрах України на сьогодні і на майбутнє. Для цього необхідно:

а) створити геолого-промислову базу даних про всі нині відомі нафтогазові родовища і базу знань (у напрямку інтелектуалізації суспільства) про найбільш перспективні технології видобування та інтенсифікації видобування нафти для кожного конкретного родовища й кожного покладу України;

б) раціоналізувати режими роботи окремо для кожної свердловини й спрогнозувати обсяги видобутку нафти з конкретних родовищ та покладів із позицій забезпечення якнайповнішого вилучення нафти з надр (що, звичайно, приведе до зменшення поточних дебітів нафти). Видобувати нафту для задоволення сьогоднішніх максималістських потреб та амбіцій ми навчені, навіть із філософським підґрунтям Ф. Бекона (1561–1626 р.р.); його волонтаристсько-прагматична настанова “підкорення природи людській волі та розумові” є результатом сьогоднішнього екологічного стану земної кулі. Звідси постає проблема інтенсифікації видобування вуглеводнів з інших свердловин із метою рівномірного вироблення всіх ділянок покладу (інакше буде завдано шкоди надрам);

в) найближчим часом законодавчо затвердити квоту на максимальний дебіт нафти з кожної окремої свердловини (взявши за приклад США, а не королівську Саудівську Аравію)

г) залучати зовнішні та внутрішні інвестиції в розвиток фундаментальних наукових досліджень із проблем видобування нафти з українських родовищ та для геолого-геофізичного дослідження нафтогазових надр України (але не для видобування нафти з надр України іноземним інвестором і, тим самим, перетворення України в чийсь сировинний придаток);

г) розширити організаційно-політичну та підприємницьку діяльність щодо забезпечення України нафтою і нафтопродуктами шляхом ввезення їх з інших країн (яскравим прикладом цього є Японія).

На сьогоднішній день одним із найбільш раціональних напрямків підвищення ефективності вироблення важковидобувних запасів нафти у світі є застосування систем розробки горизонтальними (ГС) і розгалужено-горизонтальними (РГС) свердловинами в поєднанні з вертикальними (ВС). Лідерами в цьому є США (70% ГС світу) і Канада (25%). У США близько 90% усіх ГС пробурено в карбонатних колекторах із метою перетину природних тріщин і підвищення продуктивності свердловин. У Канаді близько 45% ГС пробурено на родовищах високов'язкої нафти з високопроникними теригенними колекторами, близько 40% – у тріщинуватих карбонатних колекторах із легкою нафтою для мінімізації конусоутворення, а решта – для розробки низькопроникних і тонких пластів [26; 27].

Співвідношення продуктивностей ГС і ВС становить у США 3,2, у Канаді – 4,1; накопиченого відбору – 2–5, підвищення кінцевого нафтовилучення на 10–20%, а приріст видобувних запасів на 8–10%. Показник прибутку – відношення відносної продуктивності по ГС і ВС до відповідних відносних витрат – становить 1,6–1,9 [25].

У світі вже пробурено низку горизонтальних стовбурів довжиною близько 8000–9000 м. Вагомих наукових (гідрогазомеханіка припливу до ГС, доцільні умови їх застосування) і виробничих здобутків (реалізація проектів горизонтального буріння) Україна вже досягнула в цьому плані, але роботи слід активно продовжувати [2; 6; 17; 18].

Особливо актуальною є проблема створення наукових основ і технології розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ горизонтальними й розгалужено-горизонтальними свердловинами, як це робиться у світі, де рекордна довжина горизонтальної ділянки знаходиться на рівні 11000 м. Горизонтальні ділянки стовбурів свердловин дають змогу з великою ймовірністю охопити “цілики” застійної та залишкової нафти як за площею, так і в тектонічно-ізолюваних пластах-блоках, розкрити високопроникні фільтраційні канали, що забезпечує підвищення коефіцієнта нафтовилучення та збільшення поточного видобутку нафти [1]. Для цього можна пробурити нові горизонтальні свердловини, забурити похилі, горизонтальні чи розгалужено-горизонтальні стовбури в ліквідованих, малодобітних чи аварійних вертикальних свердловинах, яких на сьогодні є чимало на кожному родовищі, або створити додаткові розгалужено-горизонтальні стовбури в існуючих свердловинах [23]. Потребує вдосконалення конструкція стовбурів розгалужених свердловин (існуючі конструкції на Долинському і Бориславському родовищах виявилися невдалими). Ми усвідомлюємо існування низки проблем горизонтального буріння, проте існують підстави без зволікань переходити від дослідних робіт до ширшого освоєння й впровадження горизонтального буріння.

Потребують розширення дослідні роботи з питань розробки родовищ горизонтальними свердловинами (у т. ч. одночасно з вертикальними) та експлуатації горизонтальних свердловин (щодо способів експлуатації, дослідження, підземного й капітального ремонту, діяння па привибійну зону пласта).

Аналіз розробки 60 об'єктів західного регіону свідчить, що традиційними технологіями з надр буде вилучено лише 17,5% балансових запасів нафти. Для досягнення проектного нафтовилучення – 23,1% – необхідно додатково пробурити понад 700 ущільнювальних вертикальних видобувних свердловин. Але, як відомо, одна горизонтальна свердловина може замінити сьогодні 3–5 вертикальних свердловин. Звідси необхідно значно розширити фундаментальні наукові та промислові роботи із застосування горизонтальних свердловин із метою вилучення нафти з нових та енергетично виснажених родовищ, у т. ч. і для розробки газових родовищ та на підземних газосховищах з огляду на світову тенденцію з цієї проблеми (комплексні дослідження в галузях геології, геофізики, петрофізики, фізики пласта, буріння, підземної гідрогазомеханіки, розробки родовищ, експлуатації та ремонту свердловин).

Застосування горизонтальних свердловин є сучасним й одним з ефективних методів збільшення видобутку нафти та газу й підвищення вуглеводневилучення з покладів. Це одне з найсуттєвіших досягнень в

області технології видобування нафти та газу за останній період. Ефективність застосування горизонтальних свердловин визначається значним збільшенням продуктивності (з урахуванням умов стійкості роботи, які визначаються геолого-промисловою характеристикою об'єкта розробки і технологією видобування) і розширення зони дренування (як за площею, так і за товщиною продуктивної частини родовища), і, зрештою, стабілізацією рівня видобутку (на пізніх стадіях розробки) й підвищенням кінцевих коефіцієнтів газо- та нафтовилучення. Існують підстави вважати, що і буріння нових горизонтальних свердловин, і перетворення існуючих (особливо малодебітних чи аварійних, вертикальних свердловин) у розгалужені або горизонтальні є одним із найбільш ефективних напрямків вирішення проблеми забезпечення приросту видобутку власної нафти в Україні, у т. ч. в акваторіях Чорного та Азовського морів.

З розвитком технології і техніки горизонтального буріння розроблялись і наукові основи теорії припливу вуглеводнів для однієї і групи горизонтальних свердловин (у т. ч. у комбінації з існуючими вертикальними) коли на родовищах, які розробляються мережею вертикальних свердловин, з метою інтенсифікації видобування нафти пробурюють горизонтальні свердловини між існуючими вертикальними. У даній роботі узагальнюються наші здобутки в області створення гідрогазомеханіки горизонтальних свердловин, розробки принципів підходів і критеріїв вибору об'єктів доцільного горизонтального буріння свердловин, а також імовірнісних моделей розкриття горизонтальними свердловинами застійних об'ємів ("ціликів") нафти при просторовому розгляді покладів, тектонічно відокремлених нафтогазових покладів-блоків, високопровідних тріщин пласта. Це уможливило викласти окремим розділом основи підземної гідрогазомеханіки горизонтальних свердловин у підручнику для студентів ВНЗ нафтогазового профілю 3–4 рівня акредитації [5].

Накопичений досвід свідчить, що метою горизонтального й похилого буріння є більш-менш рівномірне охоплення розробкою покладів, зменшення витрат на освоєння родовищ, збільшення поточних дебітів і підвищення нафтогазовилучення. На основі аналізу світового досвіду можна виділити чотири групи принципів, за якими застосовуються горизонтальні свердловини, а саме: географо-екологічні, геологічні, технічні та економічні [4; 14].

Географо-екологічні принципи зумовлені необхідністю обійти чи зберегти об'єкти, що розташовані на поверхні нафтогазоносною території (населені пункти, промислові споруди і будівлі, акваторії морів, чорноземні поля і ліси (особливо заповідної зони) охоронні санітарні і курортні зони, гористу місцевість із крутим рельєфом тощо).

Об'єкти горизонтального буріння вибирають здебільшого за геологічними принципами. Геолого-промислова характеристика покладу зумовлює ефективність застосування складнопрофільних свердловин. Так, унаслідок безсистемного розподілу пористості, тріщинуватості й кавер-

нозності рифових вапняків і різкої несталості їх за проникністю по всіх напрямках (навіть за відстані між експлуатаційними свердловинами 100 м) сусідні свердловини часто давали найрізноманітніші дебіти – від 1–3 до 200–300 т/добу. Вибір місця закладання горизонтальної свердловини здійснюють з урахуванням сейсмічних ознак тріщинуватих зон на сейсмічних розрізах.

З технічних позицій вибір між похилим чи горизонтальним випадком свердловин може зумовлюватися необхідністю забурювання в більш нафто-газонасичені зони нових стовбурів в існуючих свердловинах із метою збільшення дебіту малопродуктивних свердловин, які можуть підлягати ліквідації; відновлення недіючих чи ліквідованих свердловин та свердловин із зім'ятою експлуатаційною колоною, що не піддається ремонту, аварійних свердловин; забурювання "прицільних" свердловин для ліквідації відкритих газових і нафтових фонтанів.

Економічні принципи супроводжують більшість із названих принципів і полягають у зменшенні витрат на розвідку, освоєння, розробку чи дорозробку родовища.

Успішність застосування горизонтальних свердловин залежить від вибору конструкції горизонтальних свердловин (просторове розміщення в покладі, довжина і форма горизонтальної ділянки стовбура, кут нахилу, обладнання вибою і т. д), системи розміщення горизонтальних і існуючих вертикальних свердловин в об'ємі продуктивної товщі, встановлення раціонального технологічного режиму експлуатації свердловин. Системи розміщення горизонтальних свердловин можуть бути локальними, площинними, об'ємними, припокрівельними, міжпластовими, комбінованими, вторинними [2; 15; 16; 18].

Науково-методичні основи конкретного впровадження горизонтальних свердловин повинні містити три моделі:

а) інформаційну (геологічна характеристика – ефективні товщини, коефіцієнти пористості та проникності й технологічні показники розробки родовища – дебіти, відбори, кількість свердловин, конструкції і т. д);

б) геометричну модель (серію карт полів параметрів – геолого-петрофізичних тощо);

в) математичну (диференціальні рівняння, аналітичні вирази дебітів, параметрів флюїдів і т. д.).

Дослідження припливу рідини до свердловини, яка довільно розміщена в однорідному пласті обмеженої товщини призводить до постановки складних просторових (тривимірних) задач [19; 20]. Для усталеного процесу фільтрації необхідно розв'язати диференціальне рівняння другого порядку з коефіцієнтами, які враховують анізотропію пласта за проникністю вздовж трьох просторових координат. Унаслідок складності задачі та з метою одержання практично придатного розв'язку нами застосовано методи фрагментів, ізотропізуючої деформації простору, джерел і стоків, відображення джерел і стоків, суперпозиції [20]. У результаті одержано формулу дебіту однієї горизонтальної гідродинамічно недосконалої свердловини в просторово-анізотропному круговому

пласті за довільного її розміщення відносно покрівлі (чи подошви) пласта [1; 10; 21].

Показано, що дебіт горизонтальної свердловини в смугоподібному (стосовно до форми зони дренування) вертикально-анізотропному пласті з двостороннім контуром живлення лінійно зростає зі збільшенням довжини горизонтальної ділянки. Товщина пласта також призводить до росту дебіту. Зростання коефіцієнта анізотропії проникності у вертикальному напрямку призводить до зменшення дебіту. Горизонтальні свердловини недоцільно застосовувати в товстих (понад 20–30 м) і високоанізотропних смугоподібних пластах, оскільки їх вплив взаємопов'язаний. Зміщення свердловини до покрівлі (чи подошви) пласта незначно впливає на дебіт [3; 20].

Аналіз фільтрації нафти в круговому пласті показав, що зі збільшенням довжини горизонтальної свердловини до 300–500 м дебіт практично прямолінійно зростає. Зі збільшенням товщини пласта за довжини свердловини 500 м дебіт зростає, але за великих коефіцієнтів анізотропії і товщинах (понад 100–150 м) це зростання практично відсутнє [20].

Постає також питання про доцільність горизонтальної свердловини порівняно з вертикальною. Для відповіді горизонтальну свердловину нами подано еквівалентною їй вертикальною свердловиною зі зведеним радіусом [24]. Аналізом встановлено, що в однорідному пласті горизонтальна свердловина є ефективнішою від вертикальної. Для компенсації впливу анізотропії проникності необхідно пробурювати горизонтальні свердловини із щораз більшою довжиною. Якщо коефіцієнт анізотропії рівний 20, то горизонтальна свердловина довжиною 500 м стає неефективною порівняно з вертикальною за товщини пласта понад 70 м.

Коли ставиться умова одержання найбільшого дебіту, то горизонтальна свердловина повинна розміститися в просторово-анізотропному пласті перпендикулярно до горизонтальної осі, вздовж якої проникність є найбільшою [7; 12].

Отримані формули забезпечують набагато точніші результати порівняно з відомими (різним ступенем спрощення, частковими випадками) формулами S.D. Joshi (1988, 1991), Renard і Dupuy (1991), Ю.Борисова (1964), В. Григулецького (1992), А. Пірвердяна, В. Пилатовського, З. Алієва і В. Шеремета (1995) та ін. [20; 22].

Під час видобування нафти шляхом нагнітання агентів витіснення з температурою нижчою від початкової пластової температури (зокрема холодної води) в пласті можуть утворюватися об'ємні “цілики” застійної малорухомої нафти, яка набуває неньютонівських властивостей, особливо за умови граничного насичення парафіном. Тому досліджено вплив неньютонівських в'язко-пластичних властивостей нафти на її фільтрацію до горизонтальної свердловини [20]. Аналіз свідчить, що зі збільшенням динамічного напруження зсуву нафти дебіт лінійно зменшується, причому аномальні властивості нафти можуть зумовлювати зменшення дебіту горизонтальної свердловини до 50% [20].

Тріщинна анізотропія проникності і деформівність тріщинуватого пласта призводять до значного зменшення дебіту горизонтальної свердловини, що необхідно враховувати під час спорудження та підготовки свердловин до експлуатації [9].

Розглянуто технологічну доцільність застосування двох паралельних й однаково напрямлених горизонтальних свердловин для розкриття пластів великої товщини на основі розв'язування задачі інтерференції горизонтальних свердловин (ярусне розміщення свердловин) [20].

Приплив рідини до вертикальної свердловини можна звести до плоско-радіального потоку, а потік до горизонтальної свердловини є виключно просторовим. Тому задачі інтерференції горизонтальних і вертикальних свердловин слід розглядати як просторові у тривимірному просторі, а реалізувати їх можна за кінцево-різницею методом за допомогою ПЕОМ. Аналітично показано, що цілком допустимо горизонтальну свердловину, яка знаходиться в покладі серед вертикальних свердловин, подавати або однією еквівалентною їй вертикальною свердловиною (перший підхід), або поряд з еквівалентними вертикальними свердловинами з відстанню між ними, яка дорівнює товщині пласта, а їх кількість брати наближено рівною відношенню довжини горизонтальної свердловини до товщини пласта (другий підхід) [23]. Для підвищення точності розрахунку слід розрахувати для кожної окремої свердловини свій зведений радіус. У результаті складний просторовий потік зводимо до плоского потоку, а плоскі задачі взаємодії свердловин розв'язуються аналітичними методами або за допомогою ПК.

З позицій теорії геометричних імовірностей показано, що спрямування стовбура свердловини в просторі відповідно до геологічної будови й стану вилучення запасів нафти уможливорює з апіорі заданою імовірністю забезпечити розкриття свердловиною високопродуктивних каналів і тріщин, охоплення “ціликів” застійної, залишкової нафти, а значить – підвищити поточні дебіти і нафтовилучення.

Тріщинуватість порід зумовлює одержання високих чи промислово-допустимих дебітів нафти, хоч може призводити до передчасних проривів витіснювальних агентів. Зважаючи на її подвійну роль, з метою регулювання процесів нафтогазовилучення щодо до конкретного просторового розміщення тріщин виконано аналітичну оцінку ймовірностей розкриття вертикальних і похилих паралельних і взаємоперпендикулярних плоских тріщин вертикальними, горизонтальними, похилими, похило- і горизонтально-розгалуженими свердловинами. Задачу реалізовано у вигляді плоскої моделі, в якій тріщини представлені прямими, а свердловина – відрізком певної довжини (горизонтальною проекцією). За ймовірну міру прийнято довжину [13].

Реально тріщина по своїй довжині може мати розриви, особливо це стосується мікро- і макротріщин. Імовірність неперервності тріщин  $P_{\text{нп}}$  можна подати як частку, з якою одиниця довжини покривається тріщинами. Тоді з метою уточнення знайдені імовірності для таких випадків необхідно перемножити на цю імовірність  $P_{\text{нп}}$ . Одержані формули дали

зможу, зокрема, встановити, що вертикальні мікротріщини (відстані між ними становлять 0,01–0,1 м) вірогідно розкриваються вертикальними свердловинами. Імовірність розкриття макротріщин (при відстані між ними 0,02–1,0 м), які вибірково розвиваються по більш густій мережі мікротріщин, уже може зменшуватися до 0,2, а мегатріщин (відстані 100–1000 м) становить дуже малу величину –  $2 \cdot 10^{-3}$  –  $2 \cdot 10^{-4}$ , тобто вертикальні мегатріщини практично не розкриваються вертикальними свердловинами. Мегатріщини з високою надійністю розкриваються горизонтальними чи похилими свердловинами, коли довжина горизонтальної проекції свердловини втричі перевищує середньостатичною відстань між тріщинами. Аналіз оберненої задачі – визначення густоти тріщин у пласті – свідчить, що мегатріщини можуть розміщатися на відстанях 10–34 м при надійній імовірності 0,66, а це на порядок менше тих величин, які зазвичай приймаються [13].

У процесі розробки нафтових покладів можуть утворюватися застійні зони (“цілики”) нафти. Використовуючи з теорії геометричних імовірностей метод розміщення на досліджувану ділянку випадкової прямої (січної), знайдено математичне сподівання суми інтервалів довжини  $l_i$  перетину січної з “ціликами”:  $M(\sum l_i) = P_{ц}L$ , де  $P_{ц}$  – частка площі “ціликів” від загальної площі родовища;  $L$  – довжина горизонтальної свердловини. Отже, з одного боку, зі збільшенням  $L$  зростає сумарна довжина перетину свердловини з “ціликами”, а з другого, – як показано вище, збільшується її дебіт, отже, горизонтальна свердловина на пізніх стадіях розробки забезпечує залучення до вироблення застійні об’єми нафти в зонально-неоднорідних покладах [20]. Це засвідчує досвід дорозбурювання Бориславського і Долинського родовищ розгалужено-горизонтальними свердловинами (В.Й. Михалевич, Н.Н. Гунька та ін.) та Гнідинцівського і Леляківського родовищ (горизонт К-1) вертикальними свердловинами (Л.М. Середницький, Л.Е. Мірзоян та ін.).

За матеріалами аерокосмогеологічних та інших досліджень обґрунтовано блокові моделі родовищ (П.Ф. Шпак, В.В. Бабаєв), а за даними аналізу розробки блоків Долинського родовища розглянуто ефективність вироблення запасів окремих блоків та гідрогазодинамічний зв’язок між ними (М.І. Бучковська, І.І. Музичко, Ю.М. Смур). У зв’язку з цим уперше з позицій теорії геометричних імовірностей виконано кількісну оцінку можливостей літологічного й гідрогазодинамічного зв’язку між продуктивними частинами розрізів двох суміжних блоків та охоплення окремих блоків покладу вертикальними свердловинами і “хаотично” розподілених в об’ємі стратиграфічної структури блокових, тектонічно екранованих пластів-покладів похилими й горизонтальними свердловинами. Одержано теоретичні залежності на основі детермінованого й стохастичного підходів. Імовірнісні моделі дають змогу бурити горизонтальні свердловини з найбільшою імовірністю розкриття високопрвідних тріщин, застійних об’ємів нафти при просторовому розгляді покладу й тектонічно відокремлених блоків, а також встановлювати гідрогазодинамічний зв’язок між сусідніми блоками [20].

У результаті розроблено новий теоретико-імовірнісний метод визначення ефективності застосування горизонтальних свердловин для розробки й дорозробки нафтових родовищ.

Практика експлуатації горизонтальних свердловин, за даними її аналізу, свідчить про такі переваги: інтенсифікується видобування нафти і газу та підвищується нафтогазовилучення; продовжуються терміни ефективної експлуатації водонафтогазових покладів; спостерігається мінімальне забруднення довкілля й зберігаються екологічно чистими великі площі поверхні; зменшується кількість свердловин, необхідних для розробки родовищ; в експлуатацію залучаються родовища, які раніше вважалися промислово нерентабельними (забалансовими).

Перспективи застосування горизонтальних свердловин в Україні для видобутку нафти і газу визначаються за географо-екологічними, геологічними і технічними принципами. Так, Г.Ю. Бойко показав, що й утворення покладів, і промисловий приплив нафти до свердловин визначається наявністю розломів і тріщинуватістю порід. Усі відомі у Внутрішній зоні Передкарпаття поклади вуглеводнів приурочені лише до верхніх частин виділених резервуарів, які сьогодні іноді взаємодіють між собою, що пов’язується з інтенсивною тріщинуватістю. Тріщини (їх розкриття – 10–20 мкм) розвинуті переважно в алевролітах і аргілітах, орієнтовані перпендикулярно, паралельно і під кутом до шаруватості; коефіцієнт абсолютної пористості за керновими даними піщано-алевролітових порід незначний (1–12%), найчастіше не перевищує 4–6%, коефіцієнт проникності менший ( $10$ – $3 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>). Такі породи можуть бути колектором тільки за наявності тріщин. Характерною особливістю родовищ ДДЗ є переважне зосередження їх поблизу розривних порушень. Сформувалася тенденція до відкриття родовищ із малими запасами. Перспективи нарощування видобутку тут пов’язуються з прибортовою зоною ДДЗ.

Таким чином, за умов високого ступеня виснаженості основних родовищ, погіршення структури запасів вуглеводнів, сформованої тенденції приросту запасів за рахунок відкриття родовищ із незначними запасами або на великих глибинах чи у шельфовій зоні як приросту запасів вуглеводнів, так і значного збільшення поточних обсягів видобутку нафти і газу в Україні можна досягнути шляхом застосування горизонтальних свердловин.

1. Бойко В. С. Гідродинамічна характеристика підземного водозбору горизонтальними свердловинами / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // Матеріали українсько-польської наук.-техн. конф. “Сучасні проблеми водопостачання і знешкодження стічних вод”. – Львів, 1996.
2. Бойко В. С. Оптимізація просторового розміщення горизонтальних і похилих стовбурів свердловин у нафтогазовому пласті / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // Зб. доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. “Проблеми і

- шляхи енергозабезпечення України”, 7–10 грудня 1993 р., м. Івано-Франківськ. – Івано-Франківськ, 1994.
3. Бойко В. С. Основи підземної газогідродинаміки горизонтальних нафтових і газових свердловин / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // Матеріали наук.-практ. конф. “Нафта і газ України-96”. – Харків, 1996. – С. 11–12.
  4. Бойко В. С. Перші аспекти щодо доцільності застосування горизонтальних свердловин на газонафтових родовищах України / В. С. Бойко, Р. В. Бойко ; ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1996. – 26 с. – (Деп. в ДНТБ України 08.06.96).
  5. Бойко В. С. Підземна гідрогазомеханіка : підручник / В. С. Бойко, Р. В. Бойко. – Львів : Апріорі, 2005. – 452 с.
  6. Бойко В. С. Проводка горизонтальних і похилих свердловин як метод ефективного освоєння і розробки покладу / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України : тези доповідей і повідомлень наук.-практ. конф., 28–30 березня 1995 р., Львів. – Львів, 1995. – С. 151.
  7. Бойко В. С. Регулювання розробки нафтових родовищ застосуванням горизонтальних і розгалужено-горизонтальних свердловин / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // 36. доповідей Міжнар. наук.-практ. конф. “Нафта і газ України”, 17–19 травня 1994 р., м. Київ. – Львів : УНГА, 1995. – С. 209–212.
  8. Бойко В. С. Методологія освоєння низькопродуктивних нафтових родовищ з малими запасами в Україні / В. С. Бойко, Р. В. Бойко, Т. Р. Бойчук // Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України : тези доповідей і повідомлень наук.-практ. конф., 28–30 березня 1995 р., Львів. – Львів, 1995. – С. 82–83.
  9. Бойко Р. В. Дослідження припливу нафти до горизонтальної свердловини в деформівному тріщинуватому пласті / Р. В. Бойко // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Розробка нафтових і газових родовищ : Держ. міжвід. наук.-техн. зб. – Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, 1995. – С. 82–89.
  10. Бойко Р. В. Теоретичні засади ефективного освоєння малих нафтових родовищ шляхом застосування горизонтальних і похилих свердловин / Р. В. Бойко, Т. Р. Бойчук // Тези наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу ун-ту. Ч. 1. – Івано-Франківськ : ІФДТУНГ, НДІ НГТ, 1995. – С. 60.
  11. Бойко Р. В. Приплив до горизонтальної свердловини в круговому анізотропному пласті / Р. В. Бойко, В. С. Бойко // Нафтова і газова промисловість. – 1995. – № 2.
  12. Бойко Р. В. Дослідження фільтрації рідини до горизонтальної свердловини в анізотропному овальному пласті / Р. В. Бойко. – Івано-Франківськ : [б. в.], 1994. – 12 с. – (Деп. в ДНТБ України 15.12.94, № 2487 – Ук 94).

13. Бойко Р. В. Імовірність розкриття тріщин продуктивного пласта свердловинами різного профілю / Р. В. Бойко // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Розробка нафтових і газових родовищ : Держ. міжвід. наук.-техн. зб. – 1994. – Вип. 31. – С. 14–27.
14. Бойко Р. В. Принципи і критерії вибору об'єктів горизонтального буріння свердловин / Р. В. Бойко // Нафт. і газова пром-сть. – 2000. – № 6. – С. 30–33.
15. Бойко Р. В. Приплив рідини до багатовибійної свердловини в анізотропному пласті за нелінійним законом фільтрації / Р. В. Бойко ; ІФІНГ. – Івано-Франківськ, 1993. – 13 с. – (Деп. в ДНТБ України 25.10.93, №2063 – Ук 93).
16. Бойко Р. В. Приплив рідини до похилої свердловини в анізотропному пласті за нелінійним законом фільтрації / Р. В. Бойко ; ІФІНГ. – Івано-Франківськ, 1993. – 12 с. – (Деп. в ДНТБ України 25.10.93, № 2065 – Ук 93).
17. Бойко Р. В. Регулювання дорозробки нафтових родовищ України шляхом добурювання свердловин із скерованим профілем / Р. В. Бойко // Тези наук.-техн. конф. проф.-виклад. складу інст. нафти і газу. – Івано-Франківськ, 1994. – Ч. 1. – С. 71.
18. Бойко Р. В. Регулювання розробки нафтових родовищ застосуванням горизонтальних і розгалужено-горизонтальних свердловин / Р. В. Бойко ; ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1994. – 17 с. – (Деп. в ДНТБ України 10.01.95, № 76 – Ук 95).
19. Бойко Р. В. Регулювання розробки нафтових родовищ застосуванням горизонтальних свердловин : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Р. В. Бойко; УкрНГІ. – К., 1996. – 18 с.
20. Бойко Р. В. Регулювання розробки нафтових родовищ застосуванням горизонтальних свердловин : дисертація на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук / Р. В. Бойко ; УкрНГІ. – К., 1996. – 306 с.
21. Бойко Р. В. Розрахунок дебіту горизонтальної свердловини / Р. В. Бойко ; ІФДТУНГ. – Івано-Франківськ, 1994. – 37 с. – (Деп. в ДНТБ України 15.12.94).
22. Борисов Ю. П. Разработка нефтяных месторождений горизонтальными и многозабойными скважинами / Ю. П. Борисов, В. П. Пилатовський, В. П. Табаков. – М. : Недра, 1964. – 154 с.
23. Дослідження інтерференції горизонтальних і вертикальних свердловин / В. С. Бойко, Р. В. Бойко, С. І. Іванов, І. В. Копач // Нафт. і газова пром-сть. – 2004. – № 2. – С. 27–29.
24. Інтенсифікація видобування газу і нафти з допомогою горизонтальних свердловин / В. С. Бойко, Я. В. Курило, Р. В. Бойко [та ін.] // Матеріали науково-практичної конференції “Стан і перспективи впровадження технологій інтенсифікації видобування газу та нафти на родовищах України”, 17–19 жовтня 2001 р. – Івано-Франківськ. – С. 146–153.

25. Практика буріння і експлуатації свердловин із горизонтальними стовбурами / К. О. Оганов, Я. В. Кунцяк, Я. С. Гаврилов, І. І. Наритник. – К. : Наук. думка, 2002. – 200 с.
26. Don't overlook the Bakken / McCaslin John; Oil and Gas J. – 1990. – 89. – № 20. – P. 66.
27. Horizontal drilling activity booms / Moore S. D. // Petrol. Eng. Int. – 1990. – 62, № 11. – P. 15–16.

## PROBLEMS AND EFFICIENCY OF INTRODUCTION OF HORIZONTAL MINING HOLES IN GAS AND OIL-EXTRACTING INDUSTRY

V.S.Boyko<sup>1</sup>, R.V.Boyko<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine  
ph. +380(342) 99-41-96, e-mail: [public@ifdtung.if.ua](mailto:public@ifdtung.if.ua)

<sup>2</sup>GPOu "Lvivgazvidobouvannya" DC "Oucrgazvidobouvannya"  
79026, Lvov, voul. And. Roubchaca, 27  
tel. (0322) 23-36-64, e-mail: [R.Boyko@LGV.com.ua](mailto:R.Boyko@LGV.com.ua)

*In the article the expedience and efficiency of application of horizontal mining holes is analysed for development of oil and gas deposits in Ukraine.*

*Key words: development, oilfield, gas deposit, horizontal mining hole, efficiency.*

УДК 622.692.4

## СТАН І ПРОБЛЕМИ РОЗВИТКУ ГАЗОТРАНСПОРТНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

В.Я. Грудз

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 21 57; e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)

*Подается характеристика технического стану газотранспортної системи України, зокрема транзитних газопроводів, розглядаються проблеми на шляху її розвитку.*

*Ключові слова: газопровід, газотранспортна система, експлуатаційна надійність, компресорна станція.*

Завдяки своєму географічному положенню на континенті Україна може бути віднесена до однієї з найбільших транспортних держав. Великі запаси сировини на Сході і потужні індустріальні споживачі на Заході вимагають існування транспортних маршрутів сировини – нафти і газу – для енергозабезпечення економіки. Зауважимо, що найбільш виправданими з економічної, техніко-технологічної та політичної точок зору є маршрути, що пролягають через територію України. Як північний (через Білорусію і Польщу), так і південний (через Туреччину і Балкани) маршрути характеризуються значно більшою протяжністю трубопроводних магістралей і суттєво складнішими умовами їх спорудження. На завершення до сказаного, наявність в Україні кваліфікованого експлуатаційного персоналу робить трансукраїнські маршрути набагато вигіднішими від інших.

Газотранспортний комплекс України являє собою систему, що містить близько 35 тис. км газопроводів, 167 компресорних станцій загальною потужністю понад 8.5 млн кВт та понад 1300 газорозподільчих станцій. До системи найбільших газопроводів входять газові магістралі "Союз", "Уренгой–Помари–Ужгород" та "Прогрес" з умовним діаметром труб 1400 мм, що перетинають Україну від східного до західного кордонів і можуть забезпечити транзитне перекачування газу в об'ємі понад 100 млрд куб. м за рік.

За загальною протяжністю газопроводів Україна займає друге місце на континенті, а за їх щільністю (довжиною на одиницю площі території) впевнено посідає перше місце.

Найбільшими й найважливішими газопроводами, що проходять територією України, є газопроводи трансукраїнської газотранспортної системи "Союз", "Уренгой – Помари – Ужгород" та "Прогрес", які є продовженням трансконтинентальної системи, що бере початок на півночі Росії та в Оренбурзі й використовується для постачання російського газу споживачам Західної Європи. Унікальність указаної системи в світовому

маштабі визначається великою протяжністю (понад 1000 км тільки територією України), гігантською пропускною здатністю (понад 120 млрд куб. м за рік), яка забезпечується максимально можливими діаметрами труб (1420 мм) і наявністю гірської ділянки на західному кордоні України. Пересічений профіль траси в районі проходження Карпат не тільки призводить до складних трасових умов спорудження й технічного обслуговування (ремонт) лінійної частини газопроводів, але й суттєво впливає на характеристики режимів роботи.

Одним із найважливіших понять, що характеризує систему з точки зору забезпечення споживачів газом, є надійність. Загальновідомо, що показники надійності залежать від терміну експлуатації об'єкта. Для магістральних газопроводів юридично встановлено граничний ресурс експлуатації 33 роки, після закінчення якого необхідна реконструкція або капітальний ремонт для відновлення показників надійності.

Серед газотранспортних магістралей України 17.27% експлуатуються вже понад 33 роки, а до завершення терміну експлуатації ще 13.66% магістралей залишилося менше 10 років.

Отже, 30.93% газопроводів від загальної їх протяжності вимагають проведення невідкладних заходів із метою не тільки підвищення експлуатаційної надійності, але й для забезпечення їх живучості.

Слід зауважити, що на сьогодні експлуатаційними службами вже ведуться роботи з діагностування стану газопроводів різноманітними методами, в тому числі із застосуванням інтелектуальних поршнів. Результати досліджень свідчать, що на окремих ділянках стан лінійної частини газопроводів критичний. Корозійні процеси призвели до зменшення робочої товщини стінки труб до розмірів, за яких подальша експлуатація газопроводів під робочим тиском є життєво небезпечною.

Отже, важливою проблемою експлуатації газотранспортної системи України є удосконалення методів діагностування реального стану лінійної частини й розробка комплексу заходів для проведення капітальних ремонтів чи реконструкції газопроводів. Ця проблема має низку аспектів, основним з яких є фінансово-економічний: для проведення вказаного комплексу робіт необхідні значні капіталовкладення. Однак цей аспект не є єдиним. Важливим є раціональне планування ремонтних робіт й забезпечення передової технології їх проведення, адже на час проведення ремонту знижується об'єм поставок газу споживачам (у тому числі й зарубіжним), що може призвести до виникнення конфліктних ситуацій, а прогресивні технології ремонту уможливають не лише скорочення термінів їх проведення, але й забезпечення надійності й довговічності газопроводів після їх відновлення. Тому важливе значення у вирішенні проблеми відводиться розв'язанню її науково-технічного аспекту.

Значний термін експлуатації газотранспортної системи вплинув не тільки на стан лінійної частини газопроводів, але спричинює моральне і фізичне старіння обладнання компресорних станцій.

На компресорних станціях України експлуатується понад 20 типів газоперекачувальних агрегатів. Серед них машини, к.к.д. яких менший 20%. Експлуатація існуючого парку агрегатів призводить до значної перевитрати паливного газу й погіршення техніко-економічних показників процесу перекачування.

В Україні існує можливість заміни морально й фізично застарілих машин сучасними агрегатами. Так, АТ “Мотор Січ” розроблено двигун Д-336-2, а НВП “Машпроект” – ДН-80, які не мають аналогів у світовій практиці за габаритами та к.к.д., який складає 36% (для нових імпортованих агрегатів він не перевищує 27%). Промислово-дослідна експлуатація таких агрегатів на компресорних станціях показала їх високі функціональні якості упродовж близько 5000 годин, після чого почала зростати частота їх відмов. Отже, оновлення парку газоперекачувальних агрегатів спонукає до проведення додаткових наукових досліджень і впровадження нових конструкторських розробок із метою підвищення збільшення ресурсу безвідмовної роботи машин, що вимагає додаткового фінансування.

Наступна проблема стосується параметрів вологості некондиційного газу, що постачається з Росії, особливо того, що поступає в газотранспортну систему України транзитом із Білорусії. Наявність надлишкової вологи не тільки вимагає додаткових затрат на осушування газу, але й призводить до конденсації рідкої фази в газопроводах. Під час руху двофазної системи в трубопроводі різко зростає його гідравлічний опір, що призводить до зниження пропускної здатності системи, з одного боку, і зростання енергозатрат на транспорт – з іншого. Для основних газотранспортних магістралей України (“Братерство”, “Союз”, “Уренгой–Помари–Ужгород”, “Прогрес”) середня гідравлічна ефективність, що характеризує ступінь зниження пропускної здатності, не перевищує 80%. Це значить, що приблизно 20% паливного газу на компресорних станціях витрачається марно. Для підвищення гідравлічної ефективності загальноприйнято застосовувати періодичне очищення газопроводів механічними очисними засобами. Однак за наявності значної кількості рідини в газопроводі виникає проблема забезпечення стійкості та міцності повітряних переходів під час очищення, що вимагає додаткових досліджень і нових технічних рішень.

До першочергових слід віднести також проблему оптимізації режимів роботи газотранспортного комплексу України. Зауважимо, що залежно від режиму можна зекономити або марно витратити понад 1 млрд куб. м газу на рік тільки в системі “Союз” – “Уренгой–Помари–Ужгород” – “Прогрес”.

Крім указаних, існує ще багато інших проблем, пов'язаних із вимірюванням витрати газу, підвищенням ефективності процесів його очищення та осушення, режимами роботи газопроводів у комплексі з підземними сховищами газу та ін. Однак усі проблеми газотранспортного комплексу України можуть бути успішно вирішені за наявності відповідного фінансування та господарського підходу до справи. Тільки в



такому випадку можна забезпечити належне функціонування унікальної газотранспортної системи України й одержувати значні прибутки від її експлуатації.

## BEING AND PROBLEMS OF DEVELOPMENT OF GAS-TRANSPORT SYSTEM OF UKRAINE

**V.Y. Grudz**

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankiv'sk, 76019, Ukraine  
ph. +380 (3422) 4 21 57; e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*Description of the technical state of the gas-transport system of Ukraine is given, in particular transits gas pipelines, problems are examined on the way of its development.*

**Key words:** *gas pipeline, gas-transport system, operating reliability, compressor station.*

УДК 622.691

## ВИЯВЛЕННЯ МІСЦЬ ВИТОКУ ВУГЛЕВОДНІВ ІЗ ТРУБОПРОВОДІВ

**Л.М. Заміховський, Л.О. Штаєр**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*Представлено новий спосіб виявлення місць витоку вуглеводнів із технологічних трубопроводів. Спосіб дозволяє локалізувати місця витоку шляхом цифрової обробки відбитих хвиль тиску, які ідентифікують зміну стану трубопровідної системи.*

**Ключові слова:** *виток із трубопроводу, імпульсна характеристика, відбита хвиля, цифрова обробка сигналу.*

### Вступ

Лінійна частина розгалуженої мережі магістральних газопроводів, нафтопроводів і нафтопродуктопроводів експлуатується у складних природних умовах, зазнаючи широкого спектра навантажень і впливів. Це призводить до аварійних витоків вуглеводнів, які виникають у результаті порушення герметичності труб. Витоки поділяються на великі та малі [1].

Відносний розмір малих витоків не перевищує 1% від номінальної пропускної здатності газопроводу (5–10 мм), їх вплив на параметри режиму трубопроводу, на відміну від великих витоків, несуттєвий (максимальна зміна тиску газу внаслідок появи малого витоку – 0,05 МПа), тому виявити їх важко.

Незважаючи на значну кількість нормативних документів і заходів щодо підвищення надійності нафтогазотранспортної системи, кількість випадків виникнення аварій у процесі транспортування вуглеводнів нафто-, газо- та продуктопроводами залишається значною. Статистичні дані про сумарне число виявлених відмов нафтогазопроводів в Україні, у тому числі аварійних (із впливом на довкілля), змінюються від 0,25 до 0,5 рік<sup>-1</sup> на 1000 км. Починаючи з 1993 року кількість відмов збільшилась, що пов'язано з крадіжками рідкого палива. Наслідками аварій на трубопроводах є людські втрати, забруднення атмосфери, водойм, ґрунту, економічні збитки.

Аналіз даних про НС (надзвичайні ситуації), пов'язаних із витокami нафтогазопродуктів із трубопроводів, за 2006–2007 рр. свідчить, що основними причинами появи аварійних витоків на трубопроводах України є метеорологічні умови та пошкодження під час проведення неконтрольованих земляних робіт – 60 % від загальної кількості витоків (рис. 1).

Значна кількість витоків (16 %) є наслідком несанкціонованого врізання в нафто-, газо- та продуктопроводи, що призводить до значних економічних утрат та завдає великої шкоди довкіллю.

Надійність технологічних трубопроводів є найважливішою умовою їх експлуатації. Втрата працездатності частини трубопроводу, який, як правило, не має резервної лінії, може призвести до аварії й повної зупинки промислового об'єкта. Зважаючи на інтенсивність появи витоків із трубопроводів, контроль стану трубопровідних систем і пошук дефектів залишаються найбільш актуальними завданнями, які потребують оперативного вирішення.



**Рис. 1.** Причини і розподіл відмов на трубопроводах, пов'язаних із появою витоків, у відсотках від загальної кількості (за даними 2006–2007 рр.)

### Методи пошуку місць витоків вуглеводнів

Відомі системи виявлення витоків найчастіше базуються на використанні акустичного методу (прийом акустичних сигналів із двох точок трубопроводу, між якими знаходиться витік). Обробка сигналів здійснюється на основі кореляційного, кепстрального аналізу або аналізу акустичних збурень, які виникають у металі трубопроводу під час врізання [2–4] або на основі обробки акустичних сигналів, одержаних із пари акустичних датчиків у гідравлічно-збуреному середовищі); методу акустичної емісії; лінійного балансу (вимірювання в контрольних вузлах перепаду тиску між тиском у трубопроводі і “реперним” тиском, який створюється автономним джерелом, величину якого попередньо встановлюють для кожного контрольованого вузла [5]); електромагнітних методів.

Перспективним є односторонній метод, суть якого [7] полягає в розташуванні на великій відстані один від одного пари акустичних перетворювачів і виявлення витоків із трубопроводу за інтервалом часу між зондуючою і відбитою в місці витоків хвилями.

За множиною амплітудних значень різних частотних компонент із обох давачів виявляють місця витоків. Спосіб підвищення чутливості

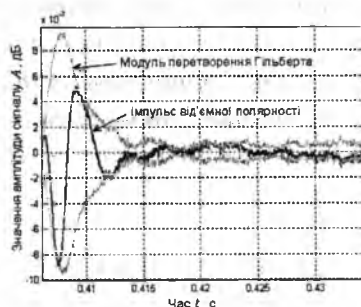
виявлення малих витоків рідини з трубопроводу за інтервалом часу між зондуючою і відбитою в місці витоків гідроударними хвилями наведено в [8–9]. Особливістю вказаного підходу до вирішення проблеми пошуку витоків є те, що зондуючі хвилі посилюються послідовно з малою амплітудою і частотою їх проходження, яка плавно змінюється до настання резонансу амплітуд коливань рідини в трубопроводі на ділянці від генератора хвиль до місця витоків. При цьому визначають резонансну частоту. Відстань до витоків визначається за швидкістю розповсюдження хвиль, поділену на чотирикратну частоту проходження [8].

Недоліком наведених способів реалізації методів виявлення витоків є: високий ступінь затухання акустичних коливань у металі трубопроводу, що покритий теплоізоляційною оболонкою з високими віброгасаючими й вібропоглинаючими властивостями; низька чутливість методів реєстрації акустичних коливань, яка не дозволяє відрізнити експлуатаційні збурення від збурень, викликаних появою свищів; відносно сильне затухання електромагнітних хвиль у трубопроводі за наявності в ньому електропровідних рідин чи стиснутих газів зі струмопровідними домішками.

### Односторонній метод виявлення витоків вуглеводнів

Система виявлення витоків із промислових трубопроводів пропонуваної структури покликана забезпечити: підвищення точності визначення місця витоків; безпечність експлуатації й забезпечення контролю стану трубопроводу та його незалежність від впливу кліматичних і природних умов.

На сьогодні серед засобів технічного контролю трубопроводів немає пристроїв, робота яких ґрунтується на генеруванні та обробці відбитих хвиль у середовищі транспортування. Основною проблемою систем, які здійснюють процес пошуку цілі, є вибір виду зондуючих сигналів та подальша їх обробка з метою одержання інформації про характеристики цілі. Особливістю вказаного методу є взаємодія безпосередньо із середовищем транспортування (гідроакустичний канал передачі інформації) для виявлення стану трубопроводу (наявність чи відсутність витоків), що зменшує вплив сторонніх завад при фіксуванні й обробці відбитих від неоднорідностей сигналів (reflected waves). До неоднорідностей у середовищі транспортування відносяться різкі повороти, місця відгалужень і встановлення клапанів, місця витоків тощо. Вказаний метод діагностування дає змогу фіксувати прояви витоків (витоків) у трубопроводі, визначати його розташування по трасі (локалізація) та оцінювати умовний діаметр отвору в стінці трубопроводу, з якого відбувається витікання вуглеводнів.



**Рис. 2.** Модуль перетворення Гільберта для сигналу-відгуку

Поява наскрізних витоків у трубопроводі є причиною додаткового впливу на процес розповсюдження хвиль у середовищі транспортування за рахунок акустичного опору отвору, який визначається за формулою:

$$Z_{отв.} = j\rho ck / Y_{отв.}, \quad (1)$$

де  $\rho$  – густина середовища;  $k = \omega / c$  – хвильове число;  $Y_{отв.}$  – провідність отвору  $Y_{отв.} = 2\pi r_{отв.}^2 / (2h_{отв.} + \pi r_{отв.})$ ,  $r_{отв.}$  і  $h_{отв.}$  – радіус і глибина (товщина стінки труби) отвору. Це дозволяє узагальнити наведену вище модель для випадку існування витоків по довжині трубопроводу з урахуванням зміни акустичного опору (імпедансу) каналу передачі (рідина чи газ) і виявляти діагностичні ознаки наявності витоку за видом імпульсної характеристики трубопровідної системи.

Для визначення місця витоку в трубопроводі за пропонуваним методом необхідно визначити швидкість поширення збурених у середовищі транспортування акустичних хвиль. Стосовно трубопроводу процес розповсюдження таких хвиль носить назву “гідралічного удару”. Гідралічний удар, який створюється у трубопроводі, має властивість розповсюджуватись у середовищі транспортування й відбиватись від місць зміни конфігурації трубопроводу, на чому й ґрунтується ідея виявлення витоків. Швидкість розповсюдження ударної хвилі залежить від роду речовини, матеріалу труби, її діаметра, товщини стінок і визначається з умови рівності кінетичної енергії речовини, яка рухається трубопроводом, та суми робіт на стискання речовини і розтяг труби:

$$c = \sqrt{K / \rho} \left( \sqrt{1 + \frac{Kd}{E\delta}} \right)^{-1}, \quad (2)$$

де  $K$  – модуль пружності речовини (величина, обернена до коефіцієнта стиску);  $\rho$  – густина речовини;  $E$  – модуль пружності матеріалу труби;  $d, \delta$  – внутрішній діаметр і товщина стінки труби. Якщо матеріал труби абсолютно непружний ( $E = \infty$ ), то вираз (2) набуває вигляду  $c = \sqrt{K / \rho}$ , а швидкість розповсюдження ударної хвилі дорівнюватиме швидкості розповсюдження звуку в середовищі транспортування.

Спосіб локалізації місця витоку речовини з трубопроводу полягає у створенні тестового сигналу з первинних хвиль тиску в межах рідкого або газоподібного середовища транспортування та обробці відбитих сигналів, які ідентифікують зміну стану трубопровідної системи [10]. Первинні хвилі розповсюджуються зі швидкістю звуку в межах середовища, зумовлюючи генерацію вторинних відбитих хвиль на неоднорідностях (відгалуженнях трубопроводу, витоках, запірній арматурі, різких згинах і т. д.) трубопроводу. Прийняті датчиком тиску системи вторинні відбиті хвилі, перетворені в електричні, а далі – у цифрові сигнали, після об-

робки за допомогою алгоритму обчислення автокореляційної функції, формують у пам'яті мікропроцесорного пристрою імпульсну характеристику трубопроводу, яка дозволяє виявити всі значні його неоднорідності. Імпульсна характеристика трубопроводу містить у собі всю інформацію про неоднорідності, включаючи топологію трубопроводу та фізичні характеристики речовини, що транспортується. Для виявлення нових неоднорідностей система за допомогою мікропроцесорної програми здійснює віднімання експериментальної імпульсної характеристики від еталонної, формуючи різницеву імпульсну характеристику. При цьому з експериментальної імпульсної характеристики усуваються відомі неоднорідності, зумовлені топологією трубопроводу й залишаються тільки нові неоднорідності, виявлені під час вимірювання. Система локалізації не має обмежень щодо середовища транспортування в трубопроводі.

За відомою різницею часу ( $T1 - T2$ ) між пуском тестового сигналу та прийманням відбитої хвилі й швидкістю розповсюдження хвиль у середовищі транспортування визначається координата  $L$  неоднорідності трубопроводу:

$$L = v \cdot (T1 - T2) / 2.$$

Різниця ( $T1 - T2$ ) визначається за максимумом взаємкореляційної функції тестового завадостійкого сигналу та зареєстрованого сигналу-відгуку.

#### Будова експериментального стенда

Для дотримання відповідності при моделюванні процесу розповсюдження хвиль у моделі трубопроводу з метою виявлення малих витоків діаметри отворів при моделюванні вибирались із критерію забезпечення відповідних реальних розмірів витоку та врахування наявності товстої стінки.

Експериментальний лабораторний стенд включав: поліетиленові труби високої густини (HDPE) класу PE 80 довжиною 2 м із зовнішнім і внутрішнім діаметрами, відповідно 50 і 46 мм, з отворами різного діаметра (4, 5, 6 і 8 мм), компресор потужністю 400 Вт, який працює в режимі нагнітання; мікрофон, який відіграє роль перетворювача сигналів у системі; комп'ютер, призначений для реєстрації сигналів із мікрофона та їх обробки; з'єднувальні елементи трубопроводу; а також поліетиленові труби з отворами різного діаметра (4, 5, 6, і 8 мм).

Для проведення експериментальних досліджень визначено відносний розмір витоку  $l = S_o / S$ , де  $S = 0,25\pi D_o^2$  – площа перерізу трубопроводу,  $D_o$  – внутрішній діаметр трубопроводу,  $S_o$  – площа витоку. Розмір  $l$  змінювався в діапазоні 0,007–0,03 (витоки такого розміру відносяться до “малих”).

Дослідження можливості використання відбитих хвиль із метою виявлення наявності витoku та його локалізації проводилось у двох варіантах – за відсутності руху середовища і при нагнітанні повітря в трубопроводі. Загальна довжина трубопроводу  $L = 24$  м. Відношення діаметра до довжини складає  $0,046/24 \approx 0,002$ . Результати проведених досліджень представлені в [11].

### Обробка сигналів

Стабільність форми для зонduючого й відбитих сигналів не характерні, оскільки вони формуються здебільшого під впливом середовища. Тому для отримання достовірних даних про характеристики (якість) середовища безпосередньо вимірюваними значеннями імпульсу відбитих сигналів (амплітуда, полярність, час запізнення, ширина осциляції) – слід передбачити можливість варіації його параметрів.

За основу алгоритму виявлення зонduючих сигналів і визначення їх характеристик пропонується використовувати перетворення Гільберта. Модуль перетворення Гільберта для зонduючих і відбитих імпульсів довільної форми – гладка аналітична однополярна функція, яка має тільки один максимум, тому виявлення сигналу на часовій осі зводиться до пошуку максимумів модуля перетворення. Полярність імпульсу визначається за значенням хвильової функції в момент часу, який відповідає максимуму модуля.

Приклад побудови огинаючої реєстрованого сигналу наведено на рис. 2.

Алгоритм первинної обробки реєстрованих сигналів із використанням перетворення Гільберта включає такі кроки: попередня цифрова фільтрація (не обов'язкова); розрахунок перетворення Гільберта; пошук локальних максимумів модуля перетворення Гільберта; визначення ширини осциляцій.

У випадку використання завадозахищених сигналів (наприклад, коди Баркера) як вхідних первинна обробка реєстрованих сигналів зводиться до обчислення автокореляційної функції сигналу. Ці сигнали володіють такою властивістю: незалежно від числа позицій  $M$  значення їх автокореляційної функції  $B_u(n)$ , при всіх  $n \neq 0$  не перевищують одиниці; енергія цих сигналів, тобто  $B_u(0)$ , чисельно дорівнює  $M$ .

Алгоритм первинної обробки реєстрованих сигналів із використанням АКФ включає такі кроки: попередня цифрова фільтрація (не обов'язкова); розрахунок АКФ; пошук локальних максимумів АКФ.

### Висновок

Як свідчать результати проведених досліджень, особливістю запропонованого способу локалізації місця витoku вуглеводнів із трубопроводу є можливість за одностороннього доступу до середовища транспо-

ртування виявити та визначити координату неоднорідності в трубопроводній системі та підвищити достовірність одержаної інформації шляхом цифрової обробки прийнятих сигналів.

1. Ионин Д. А. Современные методы диагностики магистральных газопроводов / Д. А. Ионин, Е. И. Яковлев. – Л. : Недра, 1987. – 232 с.
2. Method and apparatus for detecting leaks in pipelines using cross-correlation techniques. US Patent 5205173, Int. Cl. G01M 003/00 / Allen, Trevor J. ; Application No. 718746 filed on 06/21/1991 ; Issued on April 27, 1993.
3. Спосіб визначення місцезнаходження течі в трубопроводах: пат. UA 20569 А, МПК5 G01M3/24 / Ігуменцев Є. О. – № 961124779 ; заявл. 23.12.96 ; опубл. 27.02.98, Бюл. № 1.
4. Латышев Л. Н. Система обнаружения несанкционированных врезок в магистральный нефтепровод / Л. Н. Латышев, З. Р. Насырова // Нефтегазовое дело. – 2006. – [http://www.ogbus.ru/authors/Latyshev/Latyshev\\_1.pdf](http://www.ogbus.ru/authors/Latyshev/Latyshev_1.pdf) – 10 с.
5. Спосіб контролю герметичності діючого трубопроводу і пристрій для його здійснення : пат. UA 25160 А, МПК<sup>6</sup> F17D05/02 / Я. М. Кутинський. – № 96051833 ; заявл. 12.05.96 ; опубл. 25.12.98, Бюл. № 6.
6. Способ определения расстояния до места повреждения трубопровода : пат. SU 642575, МПК F17D5/06 / Белкин А. П., Рошин А. П., Виноградов Н. И. – № 2186949-08 ; заявл. 04.11.75 ; опубл. 15.01.79, Бюл. № 2.
7. Method of detecting a leakage of fluid : US Patent 4543817, Int. Cl. G01M 3/24, F17D 5/00, F17D 5/06 / Sakae S. ; Application o. 06/480787 filed on 03/31/1983. – Issued on October 1, 1985.
8. Способ определения места утечки жидкости из трубопровода : пат. SU 1707429 А1, МПК F17D5/02. / Белкин А. П., Спасенов В. Я. – № 4744740/29 ; заявл. 03.10.89 ; опубл. 23.01.92, Бюл. № 3.
9. Способ определения мест утечки жидкости из трубопровода : пат. RU 2197679 С2, МПК F17D5/02 / Галиакбаров В. Ф., Гольянов А. А., Коробков Г. Е. – № 2001108766/06 ; заявл. 03.04.01 ; опубл. 27.01.03.
10. Спосіб локалізації місця витoku речовини з трубопроводу та система для його здійснення : пат. UA 83290, МПК G01N 29/04, G01M 3/24 / Заміховський Л. М., Ровінський В. А., Шгаєр Л. О. – № a200610331 ; заявл. 28.09.06 ; опубл. 25.06.08, Бюл. № 12.
11. Заміховський Л. М. Контроль стану трубопроводу з використанням імпульсних характеристик / Л. М. Заміховський, Л. О. Шгаєр // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – Харьков, 2006. – № 4/1 (22). – С. 18–19.

## EXPOSURE OF SOURCES FROM PIPELINES

L.M. Zamihovski, L.O. Shayer

Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, 76019, Ukraine  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)

*A new method of exposure of sources from technological pipelines, which at one-sided access to the environment of transporting allows to expose a source on the basis of treatment of the removed waves of pressure, is represented. Treatment of information includes previous filtration of the set type of signal, forming of impulsive description of pipeline and after its change the localization of source.*

**Key words:** *escaped from a pipeline, impulsive description, removed wave, digital signal processing.*

УДК 622.691.4.004.67

## АНАЛІЗ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Д.Ф. Тимків, Р.Г. Онацко, Д.Д. Матієшин

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 93 58; e-mail: [public@ifdtung.if.ua](mailto:public@ifdtung.if.ua)

*Проаналізовано математичні моделі роботи складних газотранспортних систем та доцільність їх використання для оптимального керування експлуатаційними режимами газопроводів.*

**Ключові слова:** *газопровід, експлуатаційний режим, компресорна станція, оптимальне керування.*

Газотранспортна система України є однією з найпотужніших у світі за обсягом транспортування та збору газу (рис. 1). Ця система є буфером між газовидобувними регіонами Росії, Центральної Азії, а також Сходу і Півдня України та споживачами нашої держави й промислово розвиненої Європи. Тобто ГТС інтегрована в загальноєвропейську газову мережу. Її пропускна спроможність на вході складає 290 млрд м<sup>3</sup>, на виході – 180 млрд м<sup>3</sup> газу на рік (до країн Європи – 142 млрд м<sup>3</sup>).

Основна функція ГТС – надійне забезпечення газом внутрішніх споживачів України та безперебійне постачання транзитного природного газу через нашу територію європейським споживачам газу.

У зв'язку з цим на систему покладено такі функції:

- транспортування та збір газу з національних родовищ природного газу споживачам України;
- транзит газу через територію України до країн Центральної і Західної Європи, а також Молдови, Білорусі та південних областей Росії;
- зберігання природного газу в підземних сховищах газу (ПСГ).

Система газопостачання України є однією з найрозгалуженіших в Європі: траси МГ проходять через всі області України і Республіку Крим, що створило сприятливі умови для їх газифікації, переведення на газове паливо теплових електростанцій, металургії, машинобудування, харчової промисловості, дозволило створити могутню хімічну промисловість на основі газової сировини. Тому одним із найголовніших стратегічних завдань є підтримка на високому технічному рівні об'єктів системи та подальшого розширення ГТС України для забезпечення надійності постачання газу на європейський та внутрішній ринки.

Через ГТС 2004 року було транспортовано 202 млрд м<sup>3</sup> природного газу; у тому числі 68 млрд м<sup>3</sup> – споживачам України і 120,4 млрд м<sup>3</sup> – до країн Західної Європи. Основними напрямками транзиту газу через Україну 2004 року були Словаччина (82,6 млрд м<sup>3</sup>), Угорщина (11,6 млрд м<sup>3</sup>),

Польща (4,6 млрд м<sup>3</sup>) та Балканські країни (21,6 млрд м<sup>3</sup>). У ПСГ було закачано 16,1 млрд м<sup>3</sup> газу, відібрано – 17,1 млрд м<sup>3</sup>.

Транзит російського газу через територію України до країн Європи становить близько 85% загального обсягу російського й середньоазійського експорту газу, що складає більш ніж чверть загального обсягу споживання газу в Європі.

Енергетична політика європейських країн спрямована на диверсифікацію джерел постачання природного газу, що в поєднанні зі зростанням потреб газу в країнах Західної, Центральної та Східної Європи вимагає збільшення об'ємів його постачання. За прогнозами очікують збільшення споживання газу в Західній Європі до 2010 р. на 24%, а до 2025 р. – на 27%, споживання газу складе, відповідно, 550–575 млрд м<sup>3</sup> та 580–600 млрд м<sup>3</sup>. Це зумовлює збільшення потоків газу з Росії та Середньої Азії.

Магістральні газопроводи – це головна складова частина паливно-енергетичного комплексу України. Основним оператором ГТС є ДК “Укртрансгаз” – дочірня компанія Національної акціонерної компанії “Нафтогаз України”. До складу ДК “Укртрансгаз” входить 18 підприємств та організацій, у тому числі 6 управлінь магістральних газопроводів, будівельні та сервісні підрозділи, науково-дослідний інститут, Об'єднане диспетчерське управління та інші.

ГТС ДК “Укртрансгаз” включає в себе понад 35,6 тис. кілометрів магістральних газопроводів та газопроводів-відгалужень.

Структура газопроводів за діаметром така: ДУ 1400 – 15,28%, ДУ 1200 – 10,74%, ДУ 1000 – 12,48%, ДУ 800 – 5,28%, ДУ 700 – 9,19%, ДУ 500 – 47,03%.

Довжина магістральних газопроводів складає 22,6 тис. км, газопроводів-відгалужень – 13,0 тис. км. Кількість газорозподільних станцій – 1358.

Проектна пропускна здатність ГТС на вході в Україну 292 млрд м<sup>3</sup> на рік, на виході – 170 млрд м<sup>3</sup>. У 111 компресорних цехах на 71 компресорній станції працює 708 газоперекачувальних агрегатів загальною потужністю 5388,4 МВт.

Важливою складовою ГТС і одним з основних елементів її надійності є 12 підземних сховищ газу загальною потужністю 32 млрд м<sup>3</sup>, найбільші з яких розташовані в географічному центрі Європи – на заході України (Більче-Волинське підземне сховище, Дашавське, Угерське, Богородчанське, Лопарське).

Природний газ із Росії та Білорусії поступає в ГТС України по 9 ГВС, які розташовані на українському кордоні. Це Сохранівка, Писарівка, Серебрянка, Валуйки, Суджа, Мозир, Кобрин.

Транзитні експортні поставки російського газу здійснюються здебільшого газопроводами “Союз”, Уренгой – Помари – Ужгород, “Прогрес”, Елецк – Курськ – Кременчук – Кривий Ріг, Ананьїв – Тирасполь – Ізмаїл, Долина – Ужгород – Держдордон та Київською системою газо-

проводів через газовимірювальні станції Ужгород, Берегово, Дроздовичі, Орловка і Теково.

Обсяги споживання газу в Україні з урахуванням технологічних потреб у процесі видобування та транспортування 2000 року склали 73,4 млрд м<sup>3</sup> (у т. ч. технологічні потреби – 7,7 млрд м<sup>3</sup>).

Структура споживання природного газу в Україні така: населення та компобут – 37,5%, електроенергетика – 17,4%, технологічні проблеми газового комплексу – 10,4%, металургія – 12,8%, хімія – 11,3%, інші промислові споживачі – 10,6%.

Газопроводи перетинають понад шість тисяч штучних і природних перепон (близько однієї тисячі водних об'єктів і більше п'яти тисяч автомобільних і залізничних доріг).

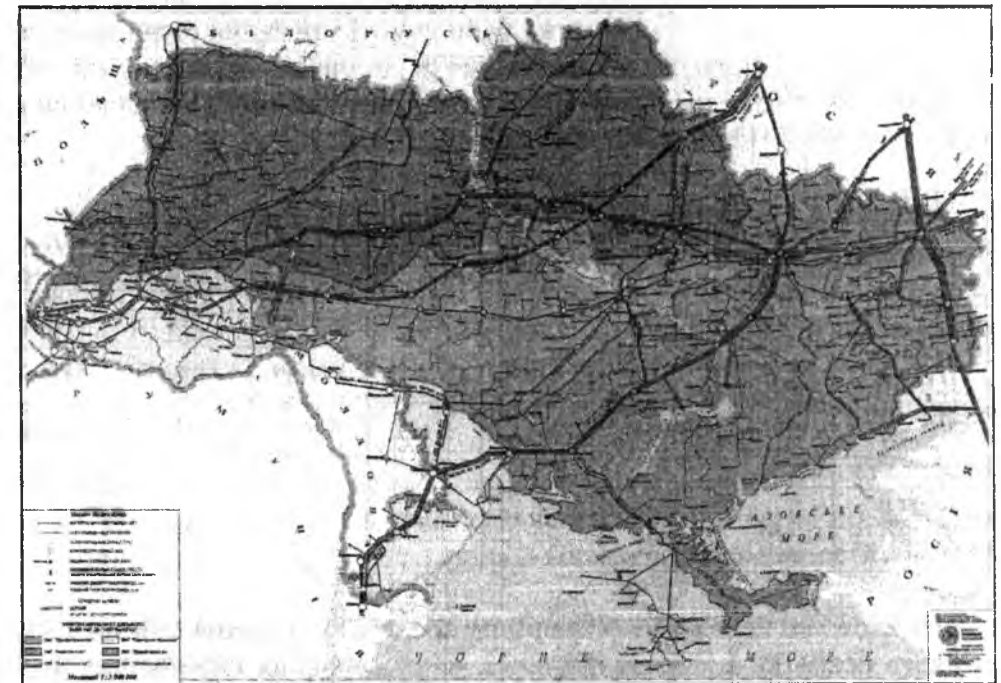


Рис. 1. Газотранспортна система України

На об'єктах лінійної частини експлуатують більше дванадцяти тисяч одиниць запірно-регульованої арматури.

ГТС України є складним промисловим комплексом, газопроводи якої мають технологічні перемички і з'єднані з ПСГ. Це дає можливість працювати в єдиному технологічному режимі та забезпечувати високий рівень надійності й маневровості в процесі цільового постачання газу, а також постачання газу в екстремальних ситуаціях.

Основні техніко-економічні показники ГТС наведені в таблиці 1.

Для порівняння, на магістральних газопроводах і підземних сховищах газу Росії функціонує 261 компресорна станція (КС) із загальною кількістю цехів – 693. Кількість встановлених газоперекачувальних агрегатів складає 4024. Їх загальна встановлена потужність – 42,6 млн кВт.

Розподіл за типами агрегатів такий:

- 3085 – газотурбінні установки, загальною потужністю 35,867 млн кВт;
- 729 – електропровідні, загальною потужністю 6,433 млн кВт;
- 228 – газомоторні агрегати, загальною потужністю 0,3 млн кВт.

Розвинена інфраструктура трубопровідного транспорту України й газової промисловості, зокрема, дає можливість ефективно інтегруватися в єдину Європейську систему постачання енергоносіїв. За таких умов зростають вимоги до надійності газопровідних систем. Проте проблема її забезпечення та безаварійної роботи об'єктів ГТС України щороку набуває все важливішого значення, оскільки відбувається процес старіння основних фондів. За умов обмеженого фінансування й обмеження ресурсів на реконструкцію та технічне переозброєння обсяг старих основних фондів постійно зростає, що може спричинити зниження рівня надійності роботи ГТС і, як наслідок, призвести до зривів плану подачі газу споживачам, втрати продукту, простою експлуатаційного обладнання та нанесення екологічних збитків докільцю.

Таблиця 1. – Основні техніко-економічні показники ГТС України

Найменування	Київ-трансгаз	Харків-трансгаз	Черкаси-трансгаз	Донбас-трансгаз	Львів-трансгаз	Прикарпат-трансгаз	Укр-трансгаз
Кількість КС	15	9	17	6	11	13	71
Кількість КЦ	23	13	23	7	20	23	109
Потужність ГПА, кВт	1027644	407100	1668500	376820	829180	1100660	5323104
Протяжність ГТС, км	9193,3	6595,3	5054,4	5136,1	5495,5	4971,4	36446
Кількість ПСГ	3	2	–	2	4	1	12
Загальна активна ємність ПСГ, млрд м <sup>3</sup>	3,01	1,7	–	0,83	24,2	2,3	32,04

На сьогодні перед ГТС України гостро стоїть завдання забезпечення стійкого розвитку в умовах значного зносу основних виробничих фондів (рис. 2) та обмежених інвестиційних можливостей щодо їх реконструкції та технічного переозброєння.

Газотранспортна система України складна, має ряд особливостей, що впливають на підходи до створення систем управління режимами роботи.

По-перше, це значні її розміри. Переважна більшість трубопроводів побудовані давно, стан їх ізоляції та міцність із часом погіршилися, що вимагає впровадження телемеханічного контролю за лінійною частиною МГ для контролю її технологічних параметрів та параметрів, що характеризують безпеку експлуатації.

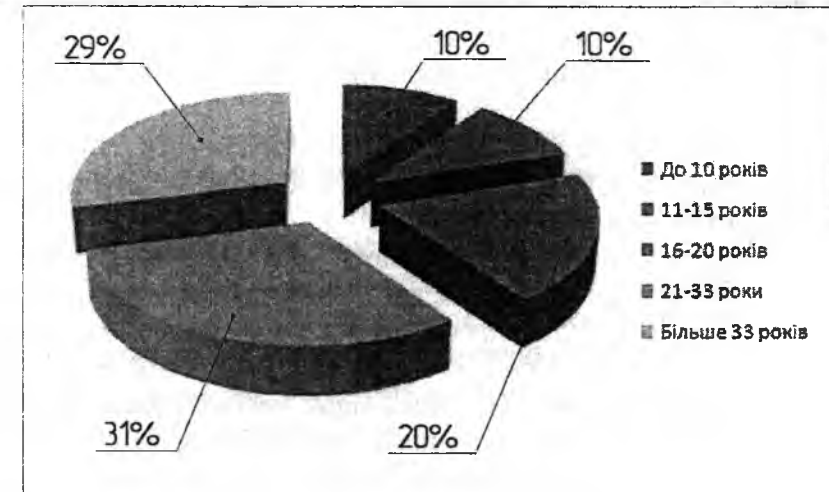


Рис. 2. Діаграма технічного стану магістральних газопроводів

По-друге, основне технічне обладнання МГ – газоперекачувальні агрегати – характеризуються значною різноманітністю й довготривалими термінами експлуатації.

По-третє, газотранспортна система України здійснює транзит у Західну Європу й розподіл споживачам на території держави дуже дорогого імпортного газу. У зв'язку з цим на перший план виходять такі проблеми:

- вимірювання й комерційний облік витрат газу, який надходить на територію держави і виходить за її межі, а також споживається по Україні;
- прогнозування можливих аварійних ситуацій як на лінійній частині, так і на компресорних станціях із метою їх запобігання;
- зменшення витрат газу під час аварій.

Газотранспортна система України специфічна, оскільки працює не лише як газотранспортна, але і як газозбірно-газорозподільна система. Газ, що поступає до неї майже із сотні газових і газоконденсатних родовищ України, подається в газові мережі населених пунктів.

Оперативне керівництво та контроль за роботою газотранспортної системи здійснює Об'єднане диспетчерське управління (ОДУ ДК Укртрансгаз).

Організаційна система оперативно-диспетчерського управління газотранспортною системою України розподіляється на три рівні [37; 38]:

- рівень ДК “Укртрансгаз” (ОДУ ДК “Укртрансгаз”);
- рівень Управління магістральних газопроводів (ДП УМГ);
- рівень лінійного виробничого управління (ДП ЛВУ) або ПСГ.

Окрім того, роль підгрунтя для систем оперативно-диспетчерського управління відіграють два рівні керування технологічними об'єктами нижнього рівня:

- компресорними цехами КС, ПСГ та допоміжними об'єктами КС;

– газоперекачуючими агрегатами, допоміжними об'єктами компресорного цеху (КЦ) та іншими локальними технологічними агрегатами.

Трирівнева система управління поєднує в собі вимоги щодо централізації управління єдиним технологічним процесом і децентралізації управління великим і складним об'єктом.

Газотранспортна система здебільшого має складну геометричну структуру: наявність кількох ниток, з'єднаних перемичками, лупінгів, численних простих та складних за структурою відгалужень до споживачів тощо. Енергетичними об'єктами є компресорні станції (КС), що мають цехи з різними типами ГПА. Внаслідок реконструкції системи в кожному цеху працюють ГПА з різними характеристиками. Тому можливі варіанти їх роботи за типами працюючих ГПА, за схемою їх спільної роботи (послідовна, паралельна, послідовно-паралельна) і, зрештою, за режимами роботи кожного ГПА (число обертів нагнітача). У зв'язку з цим виникає велика множина варіантів роботи й широке коло для оптимізації.

Складність структури ГТС створює додаткові труднощі в експлуатації. По-перше, функціонування газопроводу в заданому гідравлічному режимі вимагає чіткої узгодженості роботи всіх елементів мережі, особливо в аварійних ситуаціях. По-друге, необхідна підтримка певного температурного режиму, оскільки цей режим уздовж траси не сталий і залежить від характеру ґрунтів.

Окрім того, різке збільшення чи зменшення забору газу призводить до неусталеності його течії трубопроводом. До аналогічних наслідків призводить і зменшення (чи збільшення) підкачки газу, раптове увімкнення чи вимкнення КС, відкриття чи закриття засувки.

Перехідні режими роботи газопроводу супроводжуються значною та інтенсивною зміною тиску, що порушує нормальну роботу газопроводу, а в деяких випадках призводить до його руйнування. Для підтримки оптимальних параметрів роботи газопроводу в заданих режимах необхідно розробити математичні моделі оперативного керування складними газотранспортними системами.

Вибір методу розрахунку неізотермічних неусталених режимів складних систем магістральних газопроводів залежить від багатьох чинників: геометрії задачі, стаціонарності чи нестаціонарності течії, стискуваності, точності розрахунку, числа необхідних вузлових значень тощо. Під час оцінювання того чи іншого методу необхідно враховувати його складність, гнучкість, пристосовуваність. Тому не можна виділити один якийсь конкретний метод як оптимальний для всіх випадків.

Рівняння транспортування газу включає в себе змінні коефіцієнти при похідних, тому вказати, до якого типу рівнянь відносяться розглядані вирази, практично неможливо. Внаслідок цього постає проблема вибору універсального методу розрахунку вказаної системи диференціальних рівнянь. Розрахунок режимів роботи магістральних газопроводів

для оперативного керування потрібно провести в достатньо стислі терміни; з іншого боку, довжина ділянки, що розраховується, може досягати сотень кілометрів. Отже, вибраний метод повинен бути швидкодіючим за умови достатньої точності розв'язку.

Слід відзначити, що в літературі практично відсутні поради щодо вибору методу розв'язання подібних задач. Як правило, автори різних праць теплові та гідродинамічні задачі розглядають окремо [1; 2], а вивчення окремих задач суттєво допомагає при виборі чисельного методу розв'язання і його реалізації на ЕОМ. Різницею методів розв'язання задач гідродинаміки розглянуті в [3]. Цікавий огляд і досить повні відомості про найбільш часто застосовувані в працях зарубіжних авторів методи розв'язку подано в [4].

Аналіз дослідження робіт різних авторів [4] показав, що більшість неявних схем, безумовно стійких, у разі застосування до диференціальних рівнянь із постійними коефіцієнтами не можуть бути такими ж у випадку застосування їх до системи рівнянь, що описують течію стискуваної рідини. На сьогодні нелінійні задачі течії газів більш успішно розв'язуються за допомогою явних схем [4], хоча в майбутньому неявні схеми розрахунку течій стискуваного середовища можуть набути важливого значення. У зв'язку з цим постає питання про застосування в задачах транспортування природного газу інших методів, таких, як метод “прямих”, метод характеристик, метод контрольного об'єму, інтегральний метод тощо. Метод “прямих” є одним із багатокрокових за часом методів з явною схемою по просторових змінних. У цьому методі сітка вводиться тільки для частини змінних, які розглядаються як дискретні, а одна змінна (переважно час  $t$ ) залишається безперервною. При цьому рівняння в часткових похідних апроксимується диференційно-різницею аналогами, які становлять систему зі значною кількістю звичайних диференціальних рівнянь. Для розв'язання такої системи рівнянь зазвичай застосовують метод Рунге–Кутта з автоматичним вибором кроку. Перевагами цього методу є швидкодія, точність і можливість широкої реалізації на ЕОМ. Розходження спостерігаються тільки під час побудови схем. Найчастіше застосовується схема четвертого порядку точності, яка утворює сім'ю чотиричленних схем.

Метод “прямих” дає змогу ефективно розв'язувати різноманітні задачі, які виникають у процесі моделювання динамічних властивостей трубопроводних систем. Недоліком цього методу є те, що під час розрахунку ділянки в магістральних газопроводах довжиною в декілька сотень кілометрів доводиться розв'язувати систему великої кількості диференціальних рівнянь. Крім того, у процесі зведення початкових рівнянь до звичайних диференціальних опираються на неперервність початкових функцій та їх похідних по всій області інтегрування. Тому метод “прямих” не слід застосовувати за наявності ступінчастих збурень.

Метод характеристик – це метод, суть якого зводиться до відшукування таких напрямків, де часткове диференціальне рівняння може бути спрощене до звичайного диференціального рівняння. Він незручний для



розрахунку складних схем, які описуються нелінійними диференціальними рівняннями. Крім того, різкі зміни параметрів системи (наприклад, перепад тиску в магістральному газопроводі) призводять до неможливості розв'язання цих задач методом характеристик.

Метод контрольного об'єму та інтегральний метод близькі до кінцево-різницевого методу, тому в деяких випадках вони можуть призвести до однакових різницевого виразів похідних.

Інтегральний метод добре проявляє себе при непрямокутних межах. Крім того перевага цього методу полягає в консервативності його схем, тобто він забезпечує виконання певних інтегральних законів збереження, справедливих для початкових диференціальних рівнянь. Зауважимо, що за допомогою кінцево-різницевого методу можна також одержати консервативні схеми, але консервативність не обов'язково підвищує точність схем. Наприклад, використання для диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами неконсервативного методу може дати більш точні результати, ніж консервативний. Метод контрольного об'єму ґрунтується на мікроскопічних фізичних законах, а не на використанні математичного апарату неперервних функцій. Це особливо важливо в тих випадках, коли диференціальні рівняння не мають всюди неперервних розв'язків, які можна було б у кожній точці подати у вигляді рядів Тейлора. Однак у розглядуваній задачі не існує розв'язків із розривами, тому використання методу контрольного об'єму не дає помітних переваг порівняно, наприклад, із кінцево-різницевим методом.

У ряді практичних випадків доцільно застосовувати метод Монте-Карло. Для розв'язку задач такого типу використовують закони великих чисел.

Оцінки  $f_1, f_2, \dots, f_n$  шуканої величини  $f$  отримують на основі статичної обробки матеріалу, пов'язаного з результатами деяких багатократних випадкових випробувань. При цьому вимагається, щоб випадкова величина  $f_n$  при  $n \rightarrow \infty$  за ймовірністю збігалась до шуканої величини  $f$ , тобто для будь-якого  $\varepsilon > 0$  повинно мати місце співвідношення

$$\lim_{n \rightarrow \infty} (P\{|f - f_n| < \varepsilon\}) = 1,$$

де  $P$  – ймовірність.

Шукана величина  $f$  трактується як математичне сподівання деякої випадкової величини.

У [4; 5] виділено три основні підходи до використання методів Монте-Карло для розв'язання крайових задач:

- 1) дискретизація задачі з подальшим розв'язанням системи лінійних алгебраїчних рівнянь;
- 2) подання розв'язку у вигляді континуального інтеграла і його обчислення;
- 3) зведення початкової диференціальної задачі до спеціального інтегрального рівняння та розв'язання його.

Перший підхід найбільш універсальний і зводиться до простих чисельних алгоритмів. Однак у ряді випадків вони виявляються значно трудомісткішими, ніж алгоритми, що базуються на інших підходах або детермінованих методах. Зокрема, ймовірнісні методи розв'язку системи алгебраїчних рівнянь, викладені в працях [5], свідчать, що їх застосування не має переваги порівняно з детермінованими методами, коли основна матриця розряджена. Таку матрицю одержують при кінцево-різницевій апроксимації розглянутих нами диференціальних рівнянь. Аналогічні висновки зроблено в [2], де аналізуються основні методи розв'язку систем диференціальних рівнянь у часткових похідних, пов'язані з кінцево-різницевою апроксимацією. При цьому автори відзначають, що для деяких крайових задач (наприклад, задачі Діріхле) метод дає значну перевагу, якщо необхідно знайти розв'язок у деяких точках.

Отже, перший підхід до побудови методів Монте-Карло, пов'язаних із кінцево-різницевою апроксимацією, менш перспективний, ніж другий чи третій, і в задачі, яка розглядається, не дає помітної переваги порівняно з детермінованими алгоритмами. Застосування інших статистичних підходів також ускладнене через відсутність добре розроблених теорій та алгоритмів. Крім того, програмування цих методів пов'язане з алгоритмічними труднощами. Причому оцінити переваги методу можна тільки після закінчення розробки програми.

Найсучаснішим методом розв'язку систем диференціальних рівнянь є метод кінцевих елементів (МКЕ) і його подальша розробка – метод суперелементів (МСЕ). Як і в методі кінцевих різниць, за використання МКЕ для розв'язку крайової задачі, яка описується диференціальним рівнянням, пошук невідомої функції замінюють знаходженням її значень у кінцевому числі так званих вузлових точок. На цих вузлових точках будується сітка дискретизації області визначення функції як сукупність кінцевого числа підобластей, які не перетинаються і пов'язані між собою тільки у вузлових точках. У кожній такій підобласті шукана функція локально апроксимується неперервними функціями, які однозначно визначають її значення в будь-якій точці підобласті через вузлові параметри, а також задовольняють критерії сходження послідовності наближених розв'язків до точного результату в разі зменшення розмірів підобласті. При цьому локальна апроксимація на підобластях дає змогу розглядати останні незалежно один від одного. Такі підобласті з побудовою апроксимації шуканої функції через її вузлові параметри називають кінцевими елементами.

Далі на основі варіаційних принципів із використанням побудованих апроксимуючих функцій у кожній із підобластей знаходиться вид підінтегрального виразу у функціоналі  $e(u)$ , який відповідає характеру задачі, що розглядається. З умови стаціонарності функціоналу  $e(u)$  одержимо

$$\delta e(u) = 0.$$

До переваг МКЕ слід віднести виняткову індивідуальність відносно геометрії області, яка розглядається, крайових умов задачі, законів зміни властивостей середовища та зовнішніх впливів на область. Крім того, МКЕ наділений простою фізичною інтерпретацією основних його обчислювальних операцій. Загальними недоліками цього методу є необхідність обробки великих об'ємів інформації, що часто дуже складно навіть у випадку використання найдосконаліших ЕОМ, а також значна затрата праці під час підготовки початкових даних для реалізації МКЕ. До того ж МКЕ широко застосовується для рівнянь параболічного типу, які розв'язують задачі механічно деформованих середовищ, а для рівнянь гіперболічного типу одержання підінтегрального виразу в мінімізуючому функціоналі та побудова системи алгебраїчних рівнянь доволі складна задача. Досить важко в разі застосування МКЕ знайти розбиття області визначення шуканої функції на кінцеві елементи, оскільки алгоритмів розбиття, а тим більше машинних програм, явно недостатньо.

На відміну від методів, які опираються на кінцево-різницеві схеми низького порядку, методи кінцевих елементів можуть забезпечити високий рівень точності, а отже, і зменшити розміри системи рівнянь, що підлягають розв'язанню. Тому вимоги до обробки даних виявляються менш жорсткими, і з метою підвищення величини кроку за часом можна скористатися багатоступінчастими різницевиими схемами за часовою змінною. Водночас у разі розв'язання нелінійних задач за допомогою цих методів доводиться на кожному кроці за часом обчислювати інтеграл; у результаті цього об'єм арифметичних операцій на кожному кроці виявляється значно більшим, ніж у разі використання кінцево-різницевих схем низького порядку. Отже, незважаючи на більшу точність, ці процедури високого порядку, пов'язані зі застосуванням МКЕ для розв'язку нелінійних задач гідравліки та теплообміну, не дають суттєвих переваг у часі порівняно з методами кінцевих різниць при заданій точності розрахунків.

Зіставлення розглянутих методів дає підстави зробити такі висновки:

- а) під час розрахунку неусталених неізотермічних режимів для задач в одновимірній постановці ефективніше застосовувати метод сіток, причому перевагу дають неявні схеми;
- б) у разі розв'язування задач у двовірній постановці для газопроводів невеликої довжини зручно використовувати схему МСЕ;
- в) для газопроводів великої протяжності, а також для розрахунків складних газотранспортних систем при двовірному описі течії газу доцільно скористатися методом "прямих";
- г) для розв'язування задач із непрямокутними межами (зокрема задачі теплообміну з ґрунтом, який має складну поверхню) можливе застосування інтегрального методу;
- д) використання методу сіток ефективніше, якщо застосовується схема інтегрування за часовою змінною не нижче другого порядку.

Сучасні умови господарювання вимагають нового підходу до оптимального керування газотранспортною системою України. Водночас бурхливий розвиток новітніх технологій комп'ютерної техніки дає змогу перейти до вивчення нестационарного неізотермічного руху газу в газотранспортній системі з урахуванням тепло- і масообміну з навколишнім середовищем, а також використанням реальних термодинамічних властивостей газу.

Як раніше було доведено, рух газу в трубопроводах є нестационарним. Причинами нестационарності є нерівномірне споживання і підкачування газу зі газосховищ, пуск газопроводу після ремонту й аварійних зупинок, підключення і відключення споживачів, газоперекачуючих агрегатів і т. ін. Причини, які зумовлюють нестационарний рух газу, умовно можна поділити на дві групи:

- швидкозмінні процеси в трубопроводах (розрив труб, вмикання або вимикання газоперекачуючого агрегату, передаварійний та аварійний стани компресорної станції);
- нерівномірне споживання газу протягом певного періоду часу, підключення або відключення сховищ підземного зберігання газу.

Обидві ці групи нестационарних процесів необхідно досліджувати й вивчати з метою урахування під час оперативного керування режимами роботи газотранспортного комплексу. З наведеного випливає, що нестационарний неізотермічний процес руху газу в магістральних трубопроводах з урахуванням усіх можливих факторів (а задача керування ними є багатофакторною), що на нього впливають, на даний момент вивчено недостатньо. Отже, для розв'язання завдань оптимального керування газотранспортною системою України необхідно:

1. Провести аналітичні дослідження термогазодинамічних процесів у складних системах, встановити закономірності розподілу потоку газу з урахуванням змінних геометричних характеристик і характеру гідравлічного опору.
2. Провести аналітичне дослідження процесів пуску й зупинки компресорних станцій для вибору математичних моделей нестационарних процесів у газопроводах із метою здійснення оптимального керування експлуатаційними режимами.
3. Розробити моделі розрахунку режимів роботи складної газотранспортної системи для рівномірного завантаження різномісних газоперекачуючих агрегатів на компресорних станціях за мінімальних значень витрат паливного газу.

1. Бабе Г. Д. Идентификация моделей гидравлики / Бабе Г. Д., Бондарев Э. А., Воеводин А. Ф. и др. – Новосибирск, 1980.
2. Грудз В. Я. Пускові динамічні параметри газу на ділянці магістрального газопроводу / Грудз В. Я., Тутко Т. Ф. // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія : Транспорт і зберігання нафти і газу. – 2001. – Вип. 38 (т. 5) – С. 45–61.

3. Золотарев Л. Г. Автоматизация диспетчерского управления МГ и ГТС Украины : сборник тезисов докладов / Л. Г. Золотарев, О. Т. Михалевич, Ю. В. Черпакова. – М. : [б. и.], 2002.
4. Роуч П. Вычислительная гидродинамика / Роуч П. – М. : Мир, 1980. – 287 с.
5. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло / И. М. Соболев. – М. : [б. и.], 1973. – 286 с.

### ANALYSIS OF MATHEMATICAL MODELS OF ADJUSTING OF OFFICE HOURS OF THE DIFFICULT GAS-TRANSPORT SYSTEMS

**D.F. Timkiv, R.G. Onatsko, D.D. Matieshyn**

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas  
15, Carpats'ka street, Ivano-Frankiv'sk, 76019, Ukraine  
ph. +380 (3422) 4 93 58; e-mail: [public@ifdtung.if.ua](mailto:public@ifdtung.if.ua)*

*In the article the mathematical models of work of the difficult gas-transport systems and expedience of their use are analyzed for the optimum management by the operating modes of gas pipelines.*

**Key words:** *gas pipeline, operating mode, compressor station, optimum management.*

## Інформаційні технології

УДК 004.94:622.691.4.052

### СТВОРЕННЯ КОМП'ЮТЕРИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ І ТРЕНАЖУ ОПЕРАТОРІВ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

**Л.М. Заміховський, Р.М. Матвієнко**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [ktsu@au.nung.if.ua](mailto:ktsu@au.nung.if.ua)*

*Обґрунтовано необхідність створення комп'ютерних тренажерів для операторів газоперекачувальних станцій, описано призначення та структуру промислових тренажерів, подано типи і напрямки розвитку моделей складних технічних об'єктів, розроблено структуру багатофункціональної системи навчання та тренажу операторів.*

**Ключові слова:** *промисловий тренажер, газоперекачувальна станція, оператор, інформаційна модель.*

#### Вступ

Стрімкий розвиток можливостей комп'ютерної техніки та її впровадження в автоматизовані системи управління загострює одну з ключових інженерно-психологічних проблем – розподіл функцій між людиною та автоматикою. Незважаючи на те, що автоматика призначена для полегшення і спрощення трудової діяльності людини, зменшення помилок, що допускаються нею, зниження чисельності персоналу, підвищення ефективності й безпеки процесів управління, саме автоматизація є причиною багатьох аварій і катастроф.

У ході розроблення нових технічних об'єктів існує тенденція до повної автоматизації, жорсткого контролю за діями операторів, що об'єктивно призводить до витіснення людини з процесів управління.

Проте з розвитком автоматизації роль людини в управлінні змінюється й набуває рис диспетчера, планувальника автоматики. Оператор вводить у комп'ютер загальні цілі, отримуючи інформацію про виконання поставлених завдань на дисплеях, а комп'ютер реалізує безпосереднє управління. Тому виключення з діяльності операторів відносно простих виконавчих операцій призводить до необхідності виконання нових, складніших дій, пов'язаних із програмуванням засобів автоматики. Відповідно, виникає і новий вигляд помилок.

Високий рівень автоматизації виробничих процесів породжує низку специфічних психологічних проблем у сфері людино-машинної взаємодії, пов'язаних із пасивністю й зниженням провідної ролі операторів в управлінні.

По-перше, навіть новітні автоматизовані системи не застраховані від помилкових спрацьовувань сигналізації попередження про небезпеку. Це збільшує напруженість у діяльності операторів і призводить до зниження безпеки.

По-друге, зриви автоматичного обладнання викликають недовіру до нього операторів. Якщо користувач має свободу вибору, він зазвичай не вибирає те, чому він не довіряє. Оператори можуть не довіряти автоматичній навіть у випадку її нормального функціонування й прагнути до виконання управлінських дій у ручному режимі.

По-третє, у зв'язку з автоматизацією зростають вимоги до кваліфікації операторів. Вони повинні вміти працювати з обладнанням як в ручному, так і в автоматичному режимі. Крім того, автоматичний режим позбавляє оператора практики ручного управління. Ця втрата професіоналізму може стати причиною труднощів у ситуації, коли необхідно використовувати ручний спосіб управління системою.

По-четверте, проектувальникам не завжди вдається передбачити всі нові проблеми, що створюються автоматизованими системами, і забезпечити належну якість їх роботи за певного поєднання негативних чинників. А оператор, що повністю довіряє автоматичній, може не виявити навіть, здавалося б, очевидну невідповідність її функціонування характеру ситуації, що склалася. Він повністю покладається на автоматику й не помічає відхилення в роботі системи.

По-п'яте, автоматизація перетворює операторів швидше в спостерігачів, ніж в управляючий персонал. Не всім операторам подобається ця роль. У ній оператор може виявитися психологічно не підготовленим до того, щоб взяти на себе управління в аварійній ситуації, що виникла несподівано [1].

### Постановка проблеми

Проблема підвищення ефективності професійної підготовки операторів складних технологічних процесів, зокрема операторів газотранспортних підприємств, набуває великої актуальності в умовах зростання рівня технічної оснащеності виробництва. Від адекватної та оптимальної діяльності оператора-технолога, його вміння своєчасно знайти й прийняти в складній ситуації вірне рішення залежить ефективність виконання завдань з управління тим або іншим складним технічним об'єктом.

Найбільш ефективним засобом формування знань і професійних навичок, необхідних оператору-технологу в реальних умовах діяльності, є промислові тренажери.

Специфіка газотранспортного підприємства полягає, з одного боку, в значній віддаленості та закритості окремих об'єктів контролю, а з іншого, – у складності управління газоперекачувальними агрегатами

(ГПА), неможливості відпрацювання на реальному об'єкті всіх можливих штатних і нештатних ситуацій, що висуває на перший план проблему розробки такої тренажерної системи, яка б уможливила здійснення процесу навчання та підвищення кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Найбільш ефективними для формування професійних знань та навичок операторів компресорних станцій слід вважати комп'ютерні тренажерні комплекси, оскільки при цьому спрощуються зображення мнемосхем; регуляторів технологічних параметрів, агрегатів, пультів, що дає можливість швидше знаходити необхідну інформацію; використовуються різні кольори для виділення найважливішої інформації й розділення нормальних і сигнальних аварійних умов їх експлуатації; зберігаються звіти про хід процесу навчання та тренажу для подальшого аналізу; з'являється можливість введення різноманітних збурень і відмов обладнання для їх багаторазового відпрацювання; прискорюється процес заміни однієї навчальної програми іншою [2].

### 1. Актуальність розробки та призначення промислових тренажерів

Призначення будь-якого промислового тренажера полягає в забезпеченні формування й розвитку професійних навичок шляхом виконання вправ, що сприяє появі вірних уявлень і відображень у свідомості оператора про стан об'єктів управління й зовнішнього середовища та полегшує в подальшому прийняття управлінських рішень у нештатних та аварійних ситуаціях функціонування обладнання. При цьому повинні в комплексі виконуватися такі завдання [3]:

- Формування динамічних стереотипів. Високий ступінь навчання інформаційним та концептуальним моделям визначеної структури "людина-машина" досягається шляхом систематичного тренування та полягає в автоматичному реагуванні оператора на виникнення нештатних ситуацій і швидкому прийнятті правильних рішень, що закріплюються тренуванням і забезпечують виконання певних видів професійної діяльності із заданою якістю.

- Можливість навчання оператора виконанню відповідальних завдань, які з тієї або іншої причини не можна детально відпрацювати на реальній системі. Тренування на реальному об'єкті (літаку, морському судні, атомній електростанції, компресорному або насосному агрегаті) часто неможливе як за умовами безпеки, так і з міркувань економічного характеру – можуть бути потрібні дуже великі виробничі площі, велика витрата паливно-мастильних матеріалів, відсторонення виробничого обладнання від виконання ним основних функцій і його додатковий знос. Тренажери незамінні для відпрацювання дій в екстремальних умовах, вони дають змогу штучно відтворити таку аварійну ситуацію, яка трапиться, можливо, раз у житті або не трапиться, взагалі, проте до виникнення якої потрібно бути постійно готовим.

- Забезпечення вимог педагогічного характеру. У процесі навчання й підготовки оператор повинен набути не тільки необхідних знань, але й

спеціальних психофізіологічних навичок завдяки застосуванню:

- алгоритмів для формування необхідних навичок і аналізу дій суб'єктів навчання шляхом зміни масштабу часу (представленням події в прискореному або сповільненому темпі);

- алгоритмів багаторазового відтворення на тренажері тих чи інших виробничих ситуацій;

- алгоритмів моделювання процесу “замороження”, тобто зупинки в будь-який момент часу з метою проведення інструктажу операторові або фіксації його уваги на помилкових діях;

- відпрацювання групової взаємодії діяльності операторів, які вирішують сумісне завдання й знаходяться в певних взаєминах (екіпаж літака, зміна авіадиспетчерів, оператори систем зв'язку, зміна операторів на компресорних станціях).

## 2. Структура промислового тренажера

До структури промислового тренажера повинні входити такі функціональні елементи:

1. Моделюючий пристрій, або модуль, який є основною ланкою будь-якого промислового тренажера; за допомогою якого створюється учбова інформаційна модель технічного об'єкта, формуються необхідні дані й забезпечуються задані параметри навколишнього середовища на робочому місці суб'єкта навчання, характерні для нормальних, а за необхідності – і для нештатних аварійних режимів функціонування обладнання. Оператор, сприймаючи учбову модель технічного об'єкта, аналізує інформацію й приймає рішення відповідно до поставлених перед ним завдань.

2. Апаратний або програмний засіб контролю й оцінки якості діяльності оператора, а за необхідності – і його функціонального стану, що є особливо важливою обставиною в тих випадках, коли тренажер створюється на стадії проектування або виробництва реального об'єкта управління. Інформація про функціональний стан операторів й успішність їх дій в імітованих ситуаціях дає змогу уточнити шлях вирішення задач щодо розподілу функцій між “людською” і “машинною” ланками системи, обґрунтувати програми підготовки фахівців з експлуатації реальних об'єктів.

3. Імітаційні ефекти реального робочого місця. Залежно від поставленої мети навчання й тренажу робоче місце оператора може достатньо повно відтворювати реальне робоче місце оператора як за виконанням, так і за розташуванням засобів відображення інформації та органів управління.

У ряді випадків для створення повної ілюзії реального робочого середовища відтворюються й супутні ефекти: шум двигунів, компресорів, насосів, звукові, світлові та вібраційні ефекти, перешкоди в ефірі і т. п. Тренажери, які призначені для відпрацювання подібних завдань, можуть бути громіздкими й дорогими інженерними спорудами.

4. Сучасні засоби відображення інформації й органи управління для забезпечення процесу навчання на інтелектуальному й психомоторному

рівні. Такі характеристики органів управління відіграють вирішальну роль у промисловому тренажері для їх пізнання за виглядом, місцеположенням, на дотик, при цьому певна сенсомоторна реакція є складовою частиною завдання, що відпрацьовується оператором.

Якщо метою навчання є відпрацювання окремої функції оператора, яка може бути виділена із загального процесу трудової діяльності, можливим стає використання для створення учбової інформаційної моделі та контролю якості навчання персональних комп'ютерів. Уся програма тренінгу може бути розміщена на компакт-диску або в локальній ЕОМ. Це значно знижує витрати на створення й обслуговування тренажерів і забезпечує їх високу мобільність і широку доступність [3].

## 3. Принципи побудови моделей складних технічних об'єктів

Розглянемо детальніше принципи побудови моделі для проведення віртуального експерименту. Суть моделювання об'єкта (або явища) полягає в проведенні на ЕОМ експерименту з моделлю, яка є деякою програмою, що описує поведінку елементів системи в процесі їх взаємодії один з одним та із зовнішнім середовищем.

Кожна модель будується за такими принципами:

1. Повнота моделі. Модель повинна бути повною, щоб надавати експериментаторові різні набори характеристик.

2. Змінність моделі. Модель повинна бути достатньо гнучкою, щоб існувала можливість відтворювання різних ситуацій.

3. Модульність моделі. Модель повинна бути блоковою, тобто допускати можливість заміни, додавання й виключення деяких частин без переробки моделі.

4. Адекватність моделі. Модель повинна допускати можливість вибору необхідної точності завдання її параметрів.

5. Ефективність моделі. Модель повинна забезпечувати ефективно (за швидкодією) функціонування програми моделі, зручність роботи з нею.

При цьому модель повинна задовольняти такі вимоги:

- бути достатньо простою (для оптимізації часу її створення);

- забезпечувати можливість роботи моделі з банком даних системи;

- забезпечувати можливість проведення цілеспрямованих експериментів із використанням дослідних даних для оцінки адекватності моделі;

- допускати зміни системи, якщо результати моделювання істотно відрізняються від результатів фізичного експерименту [4].

Аналіз існуючих засобів моделювання і вирішуваних із його допомогою завдань дає підстави зробити висновок, що комплексне вирішення проблем побудови імітаційних систем можливе лише на основі єдиної формальної математичної схеми. При математичному описі складний об'єкт (система) представляється кінцевим числом елементів (об'єктів), між якими зберігаються зв'язки.

4. Схема розвитку й використання моделей під час створення нових технологій та агрегатів, що їх реалізують

На рис.1 зображено типи моделей і напрям їх розвитку на вказаних стадіях. Дослідницька модель I рівня є найпростішим математичним описом процесу (фізичного ефекту), що дає змогу виконати прогноз параметрів процесу і лабораторної установки. На основі результатів експериментальної перевірки і вивчення явища на установці модель I рівня розвивається в модель II рівня, за допомогою якої встановлюються параметри технології й конструкції дослідчено-промислової установки. Далі, в результаті експериментальних досліджень, на цій установці за допомогою моделі III рівня, отриманої на основі моделі II рівня, визначаються параметри технології та конструкції промислового агрегату. На останній стадії створення системи управління технологічним процесом і агрегатом, а також розробки та уточнення технології обслуговування агрегату виникає необхідність в імітаційній моделі, автоматизованому робочому місці технолога (АРМ інженера) і комплексі моделей для навчання, атестації й тренінгу обслуговуючого персоналу. Імітаційні моделі відрізняються від дослідницьких тим, що вони доповнені алгоритмами управління основним фізичним процесом і дають змогу імітувати дію різних методів управління на цей процес [5].



Рис. 1. Типи і напрям розвитку моделей складних технічних об'єктів

### 5. Структура комп'ютеризованої системи контролю і тренажу (КСОТ)

У даний час авторами ведуться роботи зі створення навчально-тренувального комплексу моделей, а саме: навчальної, атестаційної моделей та тренажера оператора. Зв'язок між цими складовими можна представити у вигляді комп'ютеризованої системи контролю й тренажу (рис. 2).

Багатофункціональні КСОТ можна вважати найбільш перспектив-

ними системами, які містять гнучкі імітаційні моделі функціонування об'єкта, що вивчається, засновані на віртуальній реальності і такі, що володіють можливістю дії на них з боку оператора, мають "активний" довідковий матеріал, а також засоби контролю й формування професійних умінь і навичок, що сприяють підвищенню індивідуалізації та інтенсифікації процесу навчання [6].

Теоретичне й практичне навчання проводиться тут в єдиному середовищі із застосуванням одних і тих самих засобів. Оператор, вивчаючи роботу системи автоматичного управління ГПА (САУ ГПА), звертається до довідкового матеріалу, представленого у вигляді алгоритмів функціонування ГПА. Після ознайомлення з відповідними матеріалами для кращого розуміння будови ГПА і режимів його роботи оператор запускає навчальну модель, що являє собою набір навчальних відеофайлів, що в наочній формі зображають газоперекачувальний агрегат під час дії. Таким чином, оператор, навіть не бачивши раніше самого агрегату, будує у своїй уяві концептуальну модель даного об'єкта. Після перегляду навчальних відеоматеріалів працівник може звернутися до тренажера-оператора ГПА, що імітує панель управління САУ ГПА.

Навчальний тренажер являє собою мультимедійний анімаційний імітатор, призначений для імітації зміни станів фізичного обладнання (приладів, пристроїв) за різних умов, створюючи ілюзію дій із фізичною апаратурою. Основною їх особливістю є максимально повне відтворення зовнішнього вигляду фізичних пристроїв (передніх панелей, шкал, стрілок та інших елементів приладів відображення та реєстрації) та елементів управління ними (кнопок, тумблерів, перемикачів), а також рухи окремих елементів відповідно до дій користувача на основі створення анімаційних об'єктів і складних сцен.

Тут оператор може виконати деякі віртуальні дії (запустити агрегат, зупинити, перевести в режим холостого ходу і т. п.), спостерігаючи при цьому значення основних параметрів і показників перекачування газу. Відтак оператор має можливість перейти до атестаційної моделі ГПА, що являє собою набір тестів для перевірки знань і навичок операторів САУ ГПА. У даній моделі створюються різні тренінгові сцени та ситуації, в яких оператор повинен швидко та правильно прийняти рішення. У випадку успішного проходження даного тестування видається відповідне повідомлення й результат тестування зберігається в базі даних. У цьому випадку оператор вважається готовим до роботи з реальним агрегатом.



Рис. 2. Структурна схема програмних засобів КСОТ

### Висновки

Створення промислових тренажерів є дуже важливим завданням. Розвиток техніки, науки та інформаційних технологій уможливило створення віртуальних тренажерів складних технічних промислових об'єктів, максимально наближених до реальних об'єктів. Правильно побудована інформаційна модель забезпечує оператора вірогідною інформацією про об'єкт, що дає змогу в подальшому уникнути помилок під час експлуатації та управління складним технічним об'єктом.

У результаті досліджень алгоритмічних і технічних засобів складних технічних об'єктів створюються нові методи побудови тренажерних комплексів, засновані на системі структурного моделювання, що забезпечують віртуальне представлення необхідних ситуацій у вигляді, наближеному до природних форм.

На основі проведених досліджень у процесі проектування буде створений пакет програмних засобів комп'ютерної системи навчання й тренажу операторів ГПА, що дасть змогу здійснити:

- ознайомлення з агрегатом, що вивчається;
- вивчення структури, принципів функціонування окремих систем і режимів роботи агрегату;
- відпрацювання управляючих дій режимами експлуатації агрегату й оцінки його технічного стану у випадку відхилення основних параметрів від номінальних значень;
- автоматичний хронометраж, контроль результатів і протоколювання ходу відпрацювання завдань навчання, тренажу й атестації.

1. Задачи инженерной психологии // [http://www.sea-safety.ru/article/human\\_engineering/human\\_engineering21.htm](http://www.sea-safety.ru/article/human_engineering/human_engineering21.htm).

2. Тимофеев В. А., Тулупов В. В. Система оценки деятельности оператора при дистанционном обучении на компьютерном тренажере / В. А. Тимофеев, В. В. Тулупов // Сборник трудов 8 Международной

конференції “Образование и виртуальность-2004”. – Х. ; Ялта : УАДО, 2004. – С. 157–162.

3. Сав'юк Л. О. Методологічні підходи до створення промислових тренажерів / Л. О. Сав'юк, Р. М. Матвієнко // Збірник праць III Міжнародної конференції “Нові інформаційні технології в освіті для всіх : система електронної освіти”. – К. : [б. в.], 2008. – С. 218–230.

4. Яковенко В. П. Разработка математических моделей, комплексов программ и моделирующих стендов для систем обучения и тренировок операторов АСУ и ИУС / В. П. Яковенко. – Таганрог : [б. в.], 2006. – 178 с.

5. Кабаков З. К. Применение математического моделирования при освоении новых технологий и в образовании / З. К. Кабаков, П. З. Кабаков // Сборник трудов III общероссийской конференции “Новейшие технологические решения и оборудование”. – Кисловодск : [б. в.], 2005. – С. 85.

6. Нижегородов А. А. Компьютерная система обучения и тренинга операторов сложных технических комплексов / А. А. Нижегородов, О. В. Романов, В. В. Семенов // Итоговый отчет НИР “Ковров-2002”. – Серпухов : ВИРВ, 2003. – 72 с.

## CREATION OF THE COMPUTERIZED CHECKING SYSTEM AND TRAINING OF OPERATORS OF GAS PUMPING-OVER AGGREGATES

L.M. Zamihovsky, R.M. Matvienco

Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019  
tel. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [ktsu@au.nung.if.ua](mailto:ktsu@au.nung.if.ua)

*The necessity creation of computer trainers is grounded for the pumping-over gas stations operators, industrial trainers' setting and structure is described, types and direction of difficult technical objects models. development are presented, the structure of the operators' studies and training multi-function system is developed.*

**Key words:** industrial trainer, operator, pumping-over gas stations informative model.

## АНАЛІЗ ВИМОГ ДО ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМ ТЕСТУВАННЯ РІВНЯ ЗНАНЬ СТУДЕНТІВ

**Л.М. Заміховський, В.П. Якубовський**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [ktsu@au.nung.if.ua](mailto:ktsu@au.nung.if.ua)*

*Розглянуто засоби взаємодії між викладачем і студентом при дистанційній формі навчання. Проведено аналіз вимог до програмного забезпечення систем тестування рівня знань студентів як при дистанційному, так і при традиційному навчанні.*

**Ключові слова:** дистанційне тестування навчання, система тестування знань, програмне забезпечення.

### Вступ

Сучасний навчальний процес неможливий без інтенсивного використання інформаційних технологій. Розвиток новітніх комп'ютерних технологій у сучасних умовах значно збільшив кількість методів навчання. Поряд із такими традиційними методами, як лекції, практичні, лабораторні заняття, виконання курсових робіт, проходження навчальної та виробничої практики, виконання різних видів самостійної та індивідуальної роботи викладачі мають можливість упроваджувати в навчальний процес системи дистанційного навчання, електронні підручники з мультимедійними заняттями, навчальними файлами, тренінгами, симуляторами тощо [1]. Слід зазначити, що сучасні комп'ютерні технології дають змогу значно прискорити процес навчання, а також підвищити його якість та ефективність.

Але в процесі впровадження більш прогресивних методів навчання виникає низка питань, які необхідно вирішити викладачам для досягнення поставленої мети. Такими питаннями є інтеграція новітніх методів навчання в систему існуючих та добре перевірених на практиці способів ведення навчального процесу й пошук нових способів об'єктивного діагностування знань студентів.

### 1. Огляд засобів взаємодії в процесі дистанційного навчання студентів

Проаналізувавши системи діагностування рівня знань студентів із використанням сучасних інформаційних технологій [2], можна виділити такі групи (рис. 1):

- домашні контрольні роботи, що передаються викладачеві електронною поштою;
- спілкування текстовими повідомленнями в режимі реального часу через мережу Internet (так званий Chat);
- відеоконференція через мережу Internet;

- тестування на ЕОМ у межах навчального закладу або через глобальну мережу Internet;
- виконання лабораторних робіт за допомогою програм-симуляторів (так звані віртуальні лабораторії).

Проте тільки два останні пункти з наведеного вище переліку вимагають від програмного забезпечення наявності певних алгоритмів оцінки дій користувача, тобто діагностування його рівня знань.

Коротко проаналізуємо ті групи, що не вимагають наявності алгоритмів оцінки знань у програмному забезпеченні.

*Домашні контрольні роботи, що передаються викладачеві за допомогою електронної пошти [2].* Цей спосіб не вимагає наявності будь-якого специфічного програмного забезпечення. Тут достатньо звичайної поштової програми та наявності електронної адреси у викладача та студента. Проте дана група має два способи реалізації, а саме: безпосереднє надсилання контрольної роботи студентом викладачеві та надсилання контрольної роботи методистові з подальшою реєстрацією її, а також надсилання підтвердження про отримання. Недоліком такого способу контролю рівня знань є те, що відсутній контроль за процесом виконання контрольної роботи і, як наслідок, відсутність гарантії виконання даної роботи студентом особисто.



Рис. 1. Види систем діагностування рівня знань студентів

*Спілкування короткими текстовими повідомленнями в режимі реального часу через мережу Internet (Chat) [3].* Даний спосіб діагностування рівня знань є, в певному сенсі, більш гнучким, ніж попередній, оскільки дозволяє викладачеві за потреби задати додаткове запитання з метою більш точної уяви про рівень знань студента з даного предмета. Проте основними недоліками такої системи є синхронізація в часі: викладач і студент повинні одночасно перебувати в Chat-і, а також немож-



ливність роботи з групою студентів, оскільки викладач може приділити увагу одному, максимум трьом студентам одночасно. Програмне забезпечення, необхідне для реалізації даної системи, – це Web-сервер із проінстальованою та налаштованою службою Chat-повідомлень. Важливим є той факт, що всі повідомлення між викладачем і студентом потрібно зберігати в базі даних або текстовому файлі навіть після завершення сеансу зв'язку на випадок виникнення непорозуміння чи необхідності перегляду повідомлень у майбутньому.

*Відеоконференція через мережу Internet* є порівняно новою технологією [3], оскільки раніше її популяризація обмежувалася недостатньою швидкістю передачі даних каналами зв'язку. Дана система оцінки знань позбавлена таких недоліків, як можливість допомоги студентові сторонніми особами. Проте недоліками даної системи є синхронізація в часі, необхідність наявності каналу зв'язку з достатньо високою пропускну здатністю та наявність апаратних засобів для передачі відео- та аудіоінформації.

*Контроль рівня знань студента на ЕОМ шляхом здавання ним тестових завдань* має як переваги, так і недоліки. До переваг даної системи діагностування рівня знань можна віднести відсутність людського фактора під час перевірки результатів тестування, можливість здавання студентом тестів у будь-який зручний для нього час, незалежно від присутності викладача на даний час на робочому місці. Недоліком даного методу є складність авторизації особи і, як наслідок, відсутність гарантій щодо здачі студентом тестів особисто.

*Виконання лабораторних робіт за допомогою програм-симуляторів (так званих віртуальних лабораторій)* [4] дає змогу студентові самостійно виконувати лабораторні роботи без використання високовартісного обладнання. Перевагами даної системи є можливість використання в лабораторних роботах симуляторів високовартісного, а іноді й рідкісного обладнання, неможливість псування обладнання шляхом невірної його використання. До недоліків даної системи можна віднести значні накладні витрати на реалізацію таких лабораторій, які в більшості випадків є невиправданими, оскільки за умов дистанційного навчання будь-які лабораторні роботи є віртуальними, навіть у тих випадках, коли доводиться симулювати досить дешеве обладнання, витрати на проектування такої віртуальної лабораторії можуть перевищувати вартість покупки даного обладнання. Використанням безкоштовних програмних продуктів типу LabView і розробкою спеціалізованих програм під конкретне обладнання тих чи інших навчальних лабораторій можна усунути вказаний недолік.

## 2. Аналіз вимог до програмного забезпечення діагностування рівня знань

Виходячи з проведеного аналізу вищезазначених систем, можна сформулювати вимоги до програмного забезпечення систем діагностування рівня знань студентів (рис. 2):

- надійність програмного забезпечення;

- швидкодія системи;
- зрозумілість інтерфейсу системи;
- ергономічність розміщення елементів управління та інформаційного наповнення;
- низька вартість програмного забезпечення;
- захищеність від несанкціонованого доступу;
- мінімізація трафіка під час роботи в мережі Internet;
- ведення журналізації роботи користувачів;
- підтримка декількох видів тестів;
- можливість дистанційного здавання тестів.



Рис. 2. Вимоги до програмного забезпечення систем діагностування

*Надійність програмного забезпечення систем діагностування рівня знань студентів, як і будь-яких інших систем, відіграє важливу роль у функціонуванні системи. Вимоги щодо надійності систем такого типу є підвищеними, оскільки за умов дистанційного навчання студент самостійно працює із системою, і поруч відсутній викладач чи працівник обслуговуючого складу, який допоможе в усуненні певних несправностей у функціонуванні системи.*

*Швидкодія системи* є також важливою вимогою, оскільки більшість систем діагностування рівня знань студентів мають визначені часові межі на виконання тестування. Тому повільна робота системи може негативно вплинути на об'єктивність оцінювання знань.

*Незрозумілий інтерфейс користувача системи* також може призвести до необ'єктивного результату діагностування рівня знань, оскільки може відібрати частину часу користувача на вивчення інтерфейсу системи.

*Ергономіка* як наука також накладає свій відбиток і на програмне забезпечення, в тому числі й систем діагностування рівня знань студентів. Для того, щоб студент міг максимально зосередитись на тестуванні, система повинна бути максимально зручною.

*Низька вартість* системи є важливою ознакою, оскільки будь-які засоби, що використовуються в навчальному процесі, повинні бути економічно доцільними.

*Захищеності від несанкціонованого доступу* слід приділити особливо багато уваги, оскільки за її відсутності може відбутись витік інформації, що призведе до унеможливлення точного діагнозу стосовно рівня знань у тих студентів, які володіють даною інформацією.

*Мінімізація трафіка* при роботі в мережі Internet необхідна, оскільки призводить до зменшення вартості послуг провайдера Internet та до покращення зручності роботи із системою користувачів, робочі місця яких обладнані каналами зв'язку з невисокою швидкістю передачі даних [3].

*Ведення журналізації* (запису всіх дій користувача) необхідне для вирішення спірних питань, що можуть виникнути між користувачами в процесі роботи із системою [4].

*Підтримка декількох видів тестів* потрібна для збільшення об'єктивності оцінювання знань студентів та для підвищення гнучкості системи [5].

Виходячи з вимог швидкості роботи та мінімізації трафіка, можна сформулювати похідну вимогу – підтримка клієнт-серверної архітектури. Клієнт-серверна архітектура полягає в тому, що зі сторони клієнта формується запит на виконання тієї чи іншої операції над базою даних (наприклад, вибір серед множини значень тих, що відповідають певній вимозі), сервер виконує цей запит і повертає клієнтові лише результат виконання [6]. Завдяки такому алгоритму роботи суттєво зменшується навантаження на канал зв'язку та знижуються вимоги до апаратного забезпечення клієнтської частини.

Слід зазначити, що використання технології клієнт-сервер не завжди буває виправданим. Розробник повинен провести повний аналіз вимог до системи перед тим як вирішити, чи є технологія клієнт-сервер дійсно тим засобом, який необхідний для вирішення потрібних завдань. Крім того, слід врахувати, що системи клієнт-сервер досить дорогі. До їх вартості входить мережеве програмне забезпечення, серверна операційна система, сервер бази даних й апаратні засоби, які відповідають програмному забезпеченню цього рівня. Також мають місце затрати часу й засобів на вивчення користувачами роботи із серверною операційною системою й програмним забезпеченням баз даних.

Типова архітектура клієнт-сервер передбачає наявність кінцевого користувача (клієнта) [6], який має доступ і можливість обробляти дані, що зберігаються на віддаленому комп'ютері – сервері. Не існує ніякого стандартного визначення того, що таке клієнт і чим займається сервер. Проте можна з упевненістю стверджувати, що сервер пропонує деякий

сервіс, а клієнт запитує його у нього. До одного й того ж сервера можуть звертатися декілька клієнтів із вимогою запропонувати їм деякий сервіс, і лише сервер вирішує, як обробити подібні запити. Крім цього, в системі клієнт-сервер може існувати ще й третій елемент [3].

У середовищі клієнт-сервер останній відіграє набагато важливішу роль, ніж роль простого розподільника даних. Фактично сервер виконує основну частину роботи системи. Він управляє тим, як клієнт буде отримувати доступ й обробляти дані. Реально клієнтське програмне забезпечення є лише засобом для представлення даних користувачеві і передачу їх серверу.

Клієнти – це свого роду програма, яка забезпечує графічний або неграфічний інтерфейс із користувачем. Клієнтське програмне забезпечення надає користувачеві інтерфейс для управління даними на сервері. Тільки через клієнтську програму користувач дістає доступ до функціональних можливостей сервера.

Прикладом дій клієнта щодо сервера можуть бути додавання запису в існуючу базу даних, формування різного роду запиту і т. п. У цьому випадку клієнт просто надсилає запит і дає серверу необхідні для його виконання дані (умови запиту). Сервер несе відповідальність за обробку запиту. Це не означає, що клієнт не може виконувати ті чи інші логічні дії самостійно. Цілком можливо, що клієнт реалізує більшу частину (якщо не всю) підтримки бізнес-логіки програми. Така програма називається товстим клієнтом.

Сервер пропонує сервіс клієнту. Він чекає поки клієнт зробить запит, а потім обробляє цей запит. Сервер повинен володіти можливістю обробляти запити від декількох клієнтів, а також уміти розподіляти запити за пріоритетами. Здебільшого серверна програма працює постійно, забезпечуючи при цьому безперервний доступ до її послуг.

Клієнт і сервер не обов'язково повинні розташовуватися на різних комп'ютерах. Часто фонові задачі обробки даних для клієнтів виконуються на тому ж комп'ютері, де працює сервер.

### Висновок

Серед відомих вимог, які висуваються до програмного забезпечення систем діагностування рівня знань студентів, найбільш значимими є ті, що мають яскраво виражений акцент у бік високої надійності та захищеності від несанкціонованого доступу.

1. Аминов Н. А. Некоторые теоретические аспекты дифференциальной психодиагностики специальных способностей / Н. А. Аминов. – М. : [б. и.], 1994.
2. Андреев А. А. Применение телекоммуникаций в учебном процессе / А. А. Андреев. – М. : [б. и.], 1998.
3. Семенов Ю. А. Сети Интернет : архитектура и протоколы / Ю. А. Семенов. – М. : Сиринь, 1998.

4. Практикум дистанційного навчання / под ред. В. Кухаренко. – 2-е изд. – К. : Миллениум, 2003.
5. Основи професійної підготовки державних службовців : навч. посіб. / за заг. ред. Є. І. Бородіна, В. Г. Логвинова, О. Ф. Мельникова [та ін.]. – К. : Миллениум, 2004.
6. Фролов А. В. Локальные сети персональных компьютеров. Использование протоколов IPX, SPX, NETBIOS / А. В. Фролов, Г. В. Фролов. – М. : Диалог-МИФИ, 1993.

#### ANALYSIS OF REQUIREMENTS TO SYSTEMS SOFTWARE OF TESTING OF LEVEL OF KNOWLEDGES OF STUDENTS

**L.M. Zamihovsky, V.P. Yacoubovsky**

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankiv'sk, Ukraine, 76019  
tel. +380 (3422) 4 21 23; e-mail: [ktsu@au.nung.if.ua](mailto:ktsu@au.nung.if.ua)*

*In this article facilities are considered co-operation between teacher and student at the controlled from distance method of teaching. The analysis of requirements is conducted to testing software of students knowledge level at the use both distance and traditional teaching.*

**Key words:** *controlled from distance testing of study, system of testing of knowledges, software.*

## **Економіка та організація виробництва**

УДК 338.45:678

#### АНАЛІЗ РИНКУ ПОЛІМЕРІВ ТА НАПРЯМИ ПОСИЛЕННЯ АКТИВНОСТІ ЙОГО УЧАСНИКІВ

**М.О. Данилюк, Л.Р. Семотюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
кафедра економіки підприємства, тел. +380 (3422) 4 23 08,  
e-mail: [econpid@nung.edu.ua](mailto:econpid@nung.edu.ua)*

*Проводиться огляд низки проблемних питань, з якими зіткнулася хімічна промисловість в умовах фінансової кризи, що стосуються скорочення діяльності та зниження прибутковості підприємств даного профілю; аналізу виробництва та споживання полімерів в Україні за попередній рік; коливання цін на полімерну сировину та наслідки таких змін для виробників; визначення напрямків посилення активності основних учасників ринку.*

**Ключові слова:** *хімічна промисловість, ринок полімерів, поліетилен, поліпропілен, оптимальна система продажу.*

**Актуальність проблеми.** В умовах світової фінансової кризи хімічна промисловість зазнала сильного удару. Це спонукало до перегляду обсягів виробництва на підприємствах і до формування нових стратегій розвитку в мінливих умовах на підприємствах. Щоб правильно визначити подальший вектор діяльності, необхідно проаналізувати та вибрати найоптимальніші джерела постачання, дослідити тенденції на світовому ринку, які б дали можливість передбачити розвиток подій на декілька кроків наперед.

**Аналіз останніх наукових досліджень.** Теоретичними та практичними проблемами аналізу ринку полімерів як важливої складової економіки присвячено низку праць вітчизняних та зарубіжних учених, аналітиків: Ю.А. Гончарова, Ю.К. Долгорукова, А.І. Бондаренка, Є.Я. Карайченцева, І.Є. Дмитріїва, М.О. Селихова, Я.І. Тарасової, Г.М. Щицької.

**Мета роботи** полягає в дослідженні проблемних питань в умовах скорочення діяльності та зниження прибутковості підприємств хімічної

промисловості; аналізу виробництва та споживання полімерів в Україні за попередній рік; коливання цін на полімерну сировину та наслідки таких змін для виробників; визначення напрямків посилення активності основних учасників ринку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ринок полімерів характеризується значною залежністю від імпорту. Загальна сума імпорту полімерів за 9 місяців 2008 року становить приблизно 6,5 млрд грн. Ринок полімерів у 2008 році мав тенденцію до зростання як у кількісному, так і у вартісному визначенні. Причому зростання у вартісному визначенні має випереджаючий характер за рахунок зростання рівня цін на полімерну сировину. Формування структури ринку у 2008 році здійснено з урахуванням певних змін у структурі споживання полімерів та з використанням статистичних даних за 9 місяців цього року. Надалі всі дані формуватимуться на основі екстрапольованого аналізу з урахуванням напрямків розвитку ринку. Приблизний прогнозований баланс ринку полімерів України на 2008 рік у розрізі основних складових частин та з порівнянням відповідних даних за 2007 рік подано в таблиці 1.

Таблиця 1. Характеристики ринку полімерів України [6]

Назва товару	Рік	Загальне споживання*		Виробництво в Україні		Експорт		Імпорт	
		Кількість, тонн	Сума, млн грн.	Кількість, тонн	Сума, млн грн.	Кількість, тонн	Сума, млн грн.	Кількість, тонн	Сума, млн грн.
Поліетилен високого тиску (LDPE)	2007	92703	939,8	-	-	124	0,9	92827	940,7
	2008	136298	1605,6	-	-	-	-	136298	1605,6
Поліетилен низького тиску (HDPE)	2007	146288	1533,8	107400	1126,1	106210	809,9	145098	1 217,6
	2008	132037	1592,7	56520	490,7	56520	490,7	132037	1592,7
Лінійний поліетилен (LLDPE)	2007	37562	422,5	-	-	-	-	37562	422,5
	2008	45497	526,9	-	-	-	-	45497	526,9
Поліпропілен	2007	97892	975,5	79420	791,4	48945	354,7	67417	538,8
	2008	88494	1001,5	69881	652,6	55215	515,7	73828	864,6
Полістирол	2007	53274	629,7	26001	307,3	12150	104,4	39423	426,8
	2008	46299	622,3	23275	320,5	13480	185,6	36504	487,4
Полівінілхлорид	2007	66318	451,3	-	-	2134	10,6	68452	461,9
	2008	125922	1451	-	-	-	-	125922	1451
Поліетилентерифталат	2007	149807	1279,4	-	-	-	-	149807	1 279,4
	2008	163782	2029,9	-	-	-	-	163782	2029,9
Всього	2007	643844	6232	212821	2224,8	169563	1280,5	600586	7 176,3
	2008	738329	8829,9	149676	1463,8	125215	1192	713868	8558,1

\*Усі сумарні обсяги наведено за середніми цінами по Україні.

Що найперше вражає, це величезний обсяг споживання базових полімерів (майже 8,83 млрд грн). Крім того, варто зауважити, що імпорт полімерів є однією з найпотужніших статей імпорту держави, що загалом значно поступається лише обсягам імпорту базових енергоносіїв. На формування балансу ринку мали б істотно впливати наявні на території держави виробники первинних полімерів, але неоптимальна това-

рна структура виробництва призвела до вимушеного експорту, який існує внаслідок фактично наявного перевиробництва за окремими товарними позиціями. Загалом понад 40% експорту формує поліетилен низького тиску однієї марки (HXF 4810), який виробляється у м. Калуш Івано-Франківської області на підприємстві, що належить концерну "ЛУКОЙЛ". Фактично на експорт відправляється понад 99% продукції цього підприємства. Така ситуація виникла внаслідок того, що підприємство працює на імпортній давальницькій сировині й не бажає сплачувати ПДВ за продаж товару на внутрішньому ринку, а також за рахунок надто вузького асортименту, який фактично складається з одної товарної позиції, рівень споживання якої на території України є набагато нижчим за рівень виробництва. Проте, варто зауважити, що близько 40,0 тис. тонн на рік продукції цього підприємства реекспортується нерезидентами на територію України. Причому рівень споживання цього продукту постійно зростає за рахунок його якісних та цінових конкурентних переваг. У другій половині 2008 року відбулися значні зміни в розподілі ринку плівочного поліетилену низького тиску, який випускався ВАТ "Карпатнафтохім" (м. Калуш), оскільки це підприємство було повністю зупинене й запуск його планується не раніше квітня-травня 2009 року. Товариство використовує цю подію для збільшення своєї присутності на ринку.

Експорт поліпропілену та полістиролу має сталий характер. Щомісячні обсяги експорту залежать від кон'юнктури цін на внутрішньому та зовнішньому ринках і можливого споживання виробленого ними продукту на теренах України. Варто зауважити, що 2008 року зросли обсяги експорту поліпропілену з Лисичанського заводу, де були вищі ціни придбання, ніж загалом по Україні, що також зумовлено жорсткою конкуренцією на українському ринку полімерів. Загальний розподіл питомої ваги контролю над ринком подано в таблиці 2.

Таблиця 2. Питома вага учасників ринку полімерів у забезпеченні товаром, % [4]

Назва товару	Українські виробники полімерів		Самостійний імпорт крупними виробниками		Трейдери-імпортери		ТЗОВ Компанія Рона	
	2007 р	2008 р	2007 р	2008 р	2007 р	2008 р	2007 р	2008 р
Поліетилен високого тиску (LDPE)	0	0	18,30	20,24	78,20	72,01	3,40	7,75
Поліетилен низького тиску (HDPE)	0,80	0	23,40	28,60	74,00	63,50	1,80	7,90
Лінійний поліетилен (LLDPE)	0	0	29,00	41,00	71,00	59,00	0	0
Поліпропілен	31,10	13,67	22,30	24,20	41,50	48,18	5,00	13,95
Полістирол	26,00	21,68	13,20	15,40	60,40	62,92	0,40	0
Полівінілхлорид	0	0	22,00	31,21	78,00	68,79	0	0
Поліетилентерифталат	0	0	67,00	38,50	33,00	61,50	0	0
Всього	7,70	3,10	30,70	35,40	59,80	57,08	1,80	4,42

Загалом, найважливішим висновком із таблиці 2 є те, що структура ринку полімерів є дуже імпортозалежною. Ця ситуація стала чітко вираженою у 2008 році, коли експортна переорієнтація українських заводів на ринок Російської Федерації зумовила майже повну втрату ними внутрішнього українського ринку. Питома вага поставки товару з-за кордону становила у 2007 році 92,3%, а у 2008 – уже 96,9%. Таким чином, вітчизняні виробники безпосередньо за прямими договорами забезпечували лише 7,7% ринку у 2007 році і, відповідно, 3,1% у 2008.

Імпортна частина формування ринку складається із двох секторів, одним з яких є власний імпорт безпосередньо переробниками. Такий імпорт виник унаслідок існування крупних підприємств переробників, які мають можливість самостійно закуповувати товар за кордоном, володіючи значними обсягами обігових коштів і забезпечуючи постійний рівень споживання окремих товарних позицій. Серед цієї категорії імпортерів є не дуже крупні виробники, але які працюють із заводами-постачальниками понад 10 років, і тому мають можливість отримувати товар за прямими контрактами. Питома вага більшості з таких імпортерів не перевищує 0,5–1,3% від загального обсягу споживання товару в Україні. Але існує невелика кількість підприємств (ВАТ Укрпластик, Рубіжанський трубний завод, ВКФ “Пласт модерн” та інші), де цей показник становить близько 2–2,5%. Чисельність цієї групи не перевищує на сьогодні 20 підприємств [1].

Загалом найбільшу питому вагу на ринку мають трейдери. Їх кількість нині становить близько 100 підприємств. ТзОВ “Компанія Рона” входить до п’ятірки найкрупніших учасників полімерного ринку серед трейдерів.

Споживання полімерної продукції має постійний характер. Але протягом року спостерігаються сезонні коливання обсягів споживання, які пояснюються сезонністю обсягів виробництва, а відповідно, і споживання полімерів в окремих галузях національної економіки. На рис.1 представлені обсяги споживання полімерів, виражені в мільйонах гривень за кожний місяць року.

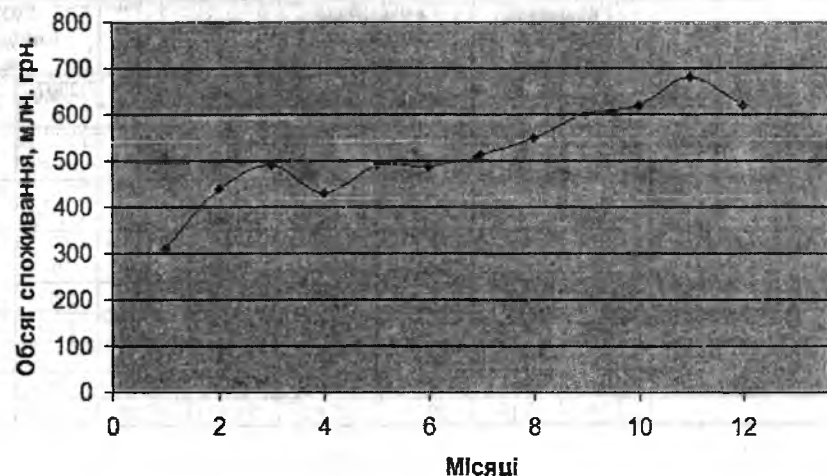


Рис.1. Сезонні обсяги споживання полімерів

2008 року на ринку існували певні особливості, які не дозволили обсягам продажу в 4-му кварталі досягти домінуючих позицій, що пов’язано з двома значними факторами: світовим падінням цін на ринку полімерів, що формує позицію очікування, та, безперечно, світовою і внутрішньою українською економічною кризою [5].

Основні постачальники полімерів поділяються на три великі групи: вітчизняні, постачальники з країн колишнього Радянського Союзу, постачальники з країн Східної Європи. До окремих четвертої та п’ятої груп входять виробники з країн Західної Європи та виробники з інших частин світу. Виробники, що входять до окремої групи, мають певні спільні риси. Так, наприклад, *постачальники з країн колишнього Радянського Союзу* – це здебільшого потужні нафтопереробні заводи з певною мірою застарілим обладнанням, яке не дає можливості виготовляти полімери в широкому асортименті та відповідної якості. У структурі продукції, що виготовляється, переважає поліетилен високого тиску, питома вага якого в загальному обсязі споживання постійно скорочується. Загальна конкурентна позиція всіх цих підприємств базується на низькій конкурентоспроможній ціні, що сформована за рахунок більш дешевих енергетичних ресурсів вуглеводневого походження, які є основною сировиною для виробництва полімерів. За останні роки деякі з цих підприємств викуплені інвесторами, здебільшого великими російськими компаніями, що володіють значними запасами нафтових чи газових ресурсів. До таких підприємств належать: ВАТ “Томськнафтохім”, АТ “Ставролен”, ЗАТ “Нижньокамськнафтохім” та два з трьох вітчизняних виробників, а саме: ВАТ “Лисичанськнафтооргсинтез” і ТОВ “Карпатнафтохім”. Окрему нішу в цій групі сформували середньоазійські виробники, які, володіючи фактично дуже дешевими ресурсами, демпінгують на ринку, і лише аж надто низька якість продукту не дає їм повністю захопити ринки. Загалом серед виробників із країн колишнього Радянського Союзу немає надпотужних спеціалізованих підприємств із виготовлення полімерів. Усі вони є частками загальних хімічних виробництв. Така ситуація зумовлена тим, що вони були споруджені у 70–80 роках, коли полімери ще не відігравали такої значної ролі в економіці.

*Вітчизняні заводи* не є надпотужними виробниками полімерів і також сформовані як частина крупних нафтохімічних комплексів. Проведена реконструкція допомогла підняти якість продукції, що вивело ці підприємства на зовнішні ринки. Експорт продукції сповна забезпечив реалізацію товару, оскільки наявна структура готового продукту створювала за окремими позиціями надлишкові обсяги виробництва, що не могли бути спожиті українським ринком.

*Виробники із країн Східної Європи* створюють групу підприємств зі своїми відмінностями, яка все ж поділяється на дві підгрупи. До першої підгрупи відносяться Комбінат TVK, Концерн “Basell”, Slovnaft та Chemopetrol. Ці виробники придбані західними компаніями, які інвестували значні кошти в розвиток цих підприємств. Фактично на базі наф-

топереробних заводів створено дуже потужні полімерні виробництва, які забезпечують досить широкий асортимент та відмінну якість продукції. Повністю замінено обладнання та технологію виробництва. Ці підприємства спрямовані здебільшого на Європейський ринок, але постійно зростаючий ринок України є для них дуже цікавим. Усі ці виробники є експортноорієнтованими, оскільки рівень споживання у країнах, де вони розташовані є дуже низьким порівняно з обсягами виробництва[2]. Другу підгрупу становлять підприємства, викуплені постачальниками сировини переважно російського походження. До них належать Lukoil Bourgas, Rompetrol Petrochemicals, Petrohemija. Ці підприємства певною мірою модернізовані, забезпечені дешевою сировиною, проте кардинальних змін у технологію та структуру виробництва тут не внесено.

Окрему групу формують *виробники країн Західної Європи*. Здебільшого це дуже потужні виробництва, що працюють за найновішими технологіями виробництва полімерів, забезпечують повний асортиментний ряд продукції та найвищу якість. У структурі виробництва полімерів переважають новітні високотехнологічні марки полімерів із вузькою спеціалізацією та дуже високими параметрами задоволення споживчого попиту саме конкретного сегмента споживання. Основними перепонами для масового проникнення цих полімерів на ринок України є надто високі ціни та незначна питома вага сучасного переробного обладнання, яке дає можливість відчувати всі переваги використання високотехнологічних марок полімерів.

Загальне забезпечення потреб ринку України також має структурний характер. Так, зокрема, виробники країн колишнього Радянського Союзу створюють основу забезпечення поліетиленом високого тиску, полістиролом та полівінілхлоридом. Східноєвропейські виробники здебільшого забезпечують ринок поліпропілену та поліетилену низького тиску. Постачання лінійного поліетилену як високотехнологічної дорогої сировини контролюють виробники країн Західної Європи. Ринок поліетилентерифталату захопили виробники зі Східної Азії. Незначну частину цього полімеру Україна отримує із Західноєвропейських країн [3].

Загалом створена система постачання формується за географічним принципом, тобто постачання на ринок України в основному здійснюється з підприємств, які територіально розташовані найближче. Ринок є імпортозалежним, внутрішнє виробництво не покриває обсягів споживання. Хоча слід зауважити, що 2008 року завдяки зусиллям ТзОВ “Компанія Рона” питома вага крупних європейських виробників на українському ринку зростала.

Отже, розглянувши особливості функціонування підприємств у галузі в умовах світових тенденцій на ринку полімерів, можна виокремити такі напрями зміцнення ринкових позицій його учасників.

#### **Диверсифікація джерел постачання та формування оптимальної системи продажу**

Основним завданням тут є розвиток мережі постачальників, усунення залежності від будь-кого з них та залучення в обіг нових марок поліетилену та поліпропілену. Така політика створює умови для забез-

печення широкого асортименту, а це дає можливість розширення кола покупців і значного зростання обсягів продажу або можливості вибору найкращої угоди серед постачальників. Важливим елементом є отримання розширеного фінансування, оскільки це укріпить позиції підприємства на ринку полімерів України. Мережа постачальників повинна функціонувати таким чином, щоб забезпечити повний асортимент необхідних підприємству товарних позицій із можливістю їх внутрішньої взаємозаміни.

#### **Обмежена та повна монополізація окремих торгових марок**

Цей етап базується на отриманні виключних прав на дистрибуцію окремих товарних позицій на території України або повного викупування дефіцитних товарних позицій в окремих виробників. Такий шлях є цілком реальним, якщо підприємство володіє реально діючою схемою поставки товару в цінах, наближених до цін виробників, але забезпечує весь сервіс для покупця: постійна наявність асортименту товару, доставка до покупця, відсутність митних процедур, наявність товарного кредиту. Наявна схема роботи з постачальниками за умови виконання першого пункту плану перспективного розвитку дасть можливість створити підприємство, умови продажу на якому будуть реально конкурентними порівнянно з придбанням товару безпосередньо у виробника. Така ситуація створює об'єктивні передумови для отримання статусу представника з обмеженим чи повним контролем над ринком. На певному етапі виробник сам прагнучим до пошуку потужного торговця для формування регіонального представництва, оскільки рівень продаж певної торгової марки на сьогоднішній день формується трейдерами, їх активною діяльністю, створенням конкурентних переваг, формуванням клієнтської бази, а не виробниками, які безпосередньо не мають чіткого бачення українського ринку і стратегії його захоплення. Створення виробником власних підприємств-представників не дало успіху й не матиме його в недалекому майбутньому, оскільки такі підприємства є неповороткими, залежними від продукції одного постачальника і одразу ж після створення отримують як конкурента не тільки інші заводи виробники, але й безпосередньо трейдерів з усіма їхніми можливостями оптимізації витрат, налагодженою системою передоплати постачальникові та розгалуженою клієнтською базою. Другим великим мінусом представництва є те, що завод-виробник вимагає від них продавати товар за чітко встановленими цінами та без гнучких умов оплати, що є цілком нереальним для українського ринку. Ще однією дуже вагомою проблемою представництва є наявність товарних позицій конкретного виробника, які не враховують реалій роботи переробних підприємств, де споживається багато різних видів продукції та існує потреба в комплексній їх закупівлі. Тому, на мою думку, наступним еволюційним кроком у стратегії захоплення ринку конкретним виробником буде пошук крупного торговця, який зможе створити умови для просування товару на ринок, при цьому вирішуючи всі місцеві логістичні проблеми, створюючи гнучку систему продаж та з наявними можливостями фінансування закупівлі товару

власними чи запозиченими обіговими коштами без втягування в проблему розрахунків із покупцем безпосередньо виробника.

Можливість монополізації окремих товарних позицій доступна підприємствам-постачальникам за таких умов:

- постійне підтримання значних обсягів закупівлі товару;
- підтримання асортиментного запасу товару на складі для створення умов успішного його просування на ринок;
- дотримання постійних термінів оплати за товар без урахування сезонності.

Виконання цих умов вимагатиме значних вкладень обігових коштів, але значно збільшить прибутковість діяльності. Досить високі обсяги вкладень й обсяги реалізації уможливають володіння статусом представництва двох-трьох виробників та можливість підтримувати повний асортиментний ряд продукції, необхідний для повноцінної торгівлі полімерною сировиною.

#### **Створення логістичної інфраструктури**

Ця пропозиція передбачає закупівлю за лізингом усіх необхідних транспортних засобів, а саме: залізничних вагонів та вантажних автомобілів, спорудження власних складів, створення власного митного ліцензійного складу та реєстрацію підприємства як самостійного митного брокера, забезпечення всім необхідним складським вантажним та іншим обладнанням і складськими приміщеннями.

Здійснення цього заходу можливе за певної визначеності щодо реалізації двох попередніх шляхів підвищення прибутковості, сформування сталого товаропотоку у визначених напрямках та детального опрацювання маршрутів зворотного завантаження транспортних засобів, що вестиме до значного економічного ефекту від здійснення цього етапу перспективного розвитку.

Перспектива організації підприємства з усіма технологічними аспектами торгової фірми створить можливість для набуття повної конкурентної переваги порівняно з виробниками, які самостійно намагаються налагодити прямі зв'язки з переробними підприємствами, адже транспортні витрати, які становлять значну частину витрат підприємства, будуть суттєво знижені, а митний ліцензійний склад дасть можливість проводити митне оформлення в міру необхідності продажу товару, а не безпосередньо під час його прибуття, що дозволить додатково зменшити потребу в обігових коштах. Наявна власна матеріально-технічна база буде визначальною конкурентною перевагою в середовищі трейдерів.

#### **Формування торгового підприємства як крупно оптового трейдера європейського типу**

Даний пункт плану перспективного розвитку передбачає формування на основі власної логістичної бази (транспорт, складська та митна інфраструктура) оптового гіпермаркету полімерів із надзвичайно широким асортиментом позицій та залучення постачальників для використання матеріальної бази Товариства при створенні регіональних складів товару певних торгових марок.

Крім того, повне забезпечення підприємства ресурсом обігових коштів дасть можливість формувати запаси в період мінімального цінового параметра, що створить умови для одержання значних додаткових обсягів чистого прибутку.

**Закупівля обладнання з переробки полімерів або переробки місцевої сировини з повним циклом аж до виготовлення кінцевого продукту, яке б забезпечувало найновіші технічні вимоги до виробництва й відповідало останнім вимогам щодо витратних показників переробки, забезпечувало найвищу якість та найменшу собівартість продукції.**

Цей етап вимагатиме значних вкладень коштів; можливий за наявності певної суми власних коштів та можливостей залучення значної суми запозичених коштів. Дана пропозиція є досить капіталомісткою, оскільки обладнання, необхідне для проведення повного циклу, має високу вартість. Вкладення в обладнання можливе виключно після детального розрахунку ризиків, тривалого вивчення ринку споживання та самого ринку обладнання з порівняльними характеристиками всіх можливих варіантів.

**Висновки та перспективи подальших наукових розробок в даному напрямі.** Дослідження свідчить, що ринок полімерів характеризується значною залежністю від імпорту (імпорт за останні 9 місяців складає 6,5 млрд грн). Адже імпорт полімерів – одна з найпотужніших статей імпорту держави й загалом значно поступається лише обсягам імпорту базових полімерів. Якщо розглядати формування балансу ринку, то тут істотний вплив мали наявні на території держави виробники первинних полімерів. Проте неоптимальна товарна структура виробництва призвела до вимушеного експорту, який існує внаслідок фактичного перевиробництва за окремими товарними позиціями.

В умовах світової фінансової кризи важливим питанням для учасників ринку є утримання власних позицій на ринку підприємств даної галузі, що є не простим завданням. На сьогодні маємо ситуацію, коли значно скорочуються обсяги виробництва продукції, а відповідно, і споживання полімерів. Щоб у подальшому функціонувати на ринку, необхідно застосувати низку заходів, які можуть спричинити захоплення більшої частки ринку. Важливим напрямком покращення ситуації є диверсифікація джерел постачання та формування оптимальної системи продажу шляхом розвитку мережі постачальників, усунення залежності від будь-кого з них та залучення в обіг нових марок, що забезпечить широкий асортимент продукції і, відповідно, збільшення кола покупців. Наступним кроком є обмежена й повна монополізація окремих торгових марок, отриманням виключних прав на дистрибуцію окремих товарних позицій. Створення логістичної інфраструктури, формування великого оптового трейдера європейського типу, закупівля обладнання для переробки полімерів. Поступове виконання цих завдань допоможе підвищити прибутковість підприємства, проте для їх реалізації потрібні чималі обігові кошти, а це можуть дозволити собі лише окремі учасники ринку.

1. Дмитріїв І. Є. Поліпропілен-2008 / І. Є. Дмитріїв // Полімери – Гроші. – 2008. – № 3 (29). – С. 16–17.
2. Карайченцев С. Я. Аналіз цін на поліетилен / С. Я. Карайченцев // Полімери – Гроші. – 2008. – № 4 (30). – С. 15–16.
3. Селихов М. О. Полімерні вироби і синтетичні смоли / М. О. Селихов // Хімія України. – 2008. – № 4 (202). – С. 39–42.
4. Тарасова Я. І. Тенденції полімерної галузі / Я. І. Тарасова // Полімери – Гроші. – 2007. – № 3 (23). – С. 5–12.
5. Щицька Г. М. Аналіз цін на полімери: поліетилен / Г. М. Щицька // Полімери – Гроші. – 2007. – № 3 (23). – С. 16–17.
6. Щицька Г. М. Полімерна статистика / Г. М. Щицька // Полімери – Гроші. – 2007. – № 3 (23). – С. 18–19.

#### ANALYSIS OF THE POLYMERIC MARKET AND DIRECTIONS OF INCREASING THE ACTIVITY OF ITS PARTICIPANTS

**M.O. Danyliuk, L.R. Semotiuk**

*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivsk, Ukraine, 76019,  
economic department, tel. +380(3422) 4 23 08,  
e-mail: econpid@nung.edu.ua*

*This article deals with the review of the problem questions concerning the reduction of the activity and the decrease of the profit of the enterprises in the field of chemistry; the analysis of manufacturing and consuming of polymers in Ukraine for the previous year; the variety of the prices for polymeric raw material and the consequences of such changes for manufactures; the defining of directions for strengthening the activity of market.*

**Key words:** *chemical industry, market of polymers, polyethylene, polypropylene, optimum system of sale.*

УДК 61:364.3

#### СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНІ ТА ПРАВОВІ ПРОБЛЕМИ ЗАПРОВАДЖЕННЯ СТРАХОВОЇ МЕДИЦИНИ В УКРАЇНІ В КОНТЕКСТІ ЗАРУБІЖНОГО ДОСВІДУ

**Т.М. Орицин, О.М. Орицин**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, кафедра фінансів,  
тел. +380 (342) 50 45 74, e-mail: [fin.@nung.if.ua](mailto:fin.@nung.if.ua)*

*Розвиток страхової медицини є одним з актуальних і перспективних напрямів вирішення проблем фінансування охорони здоров'я. Досвід зарубіжних країн свідчить, що відповідні страхові фонди можуть стати вагомим джерелом фінансування, а механізм формування й витрачання цих коштів може забезпечити його адресність. У цьому контексті пропонується спочатку впровадити загальнообов'язкове державне медичне страхування, яке забезпечуватиме фінансування певного гарантованого рівня соціально-медичних потреб кожному громадянину, а згодом можна перейти до впровадження приватного медичного страхування.*

**Ключові слова:** *медичне обслуговування, бюджет, охорона здоров'я, медичне страхування, система фінансування, цільові внески.*

Однією з основних функцій держави є медичне обслуговування, для забезпечення якого в Україні створено цілу мережу установ, закладів та управлінь. Фінансування цієї галузі здійснюється в основному за рахунок бюджетів різних рівнів. Однак скорочення реальних доходів бюджетів усіх рівнів та зниження платіжної дисципліни вкрай ускладнює ситуацію із забезпеченням їх збалансованості та фінансуванням запланованих видатків та заходів. Водночас постійне посилення соціального навантаження на бюджет, використання багатьма керівниками бюджетних установ й організацій витрат у значно більших розмірах, ніж це передбачено бюджетними призначеннями, негативно позначається на розрахунках. Зважаючи на це, медичне обслуговування в Україні вимагає вдосконалення фінансового механізму через створення бюджетно-страхової системи медичного обслуговування.

Проблемами фінансування установ охорони здоров'я займалися такі відомі вітчизняні та зарубіжні економісти: В.В. Баранов, Й.П. Корич, В. Бочковська, А. Беспалова, С. А. Васильченко, О. Величко, Р. Вінсент, О.М. Голяченко, Й. Денисов, В.Й. Євсєєв, В.І. Журавель, А. Іванов, В. Лешук, В.О. Колоденко, Б.М. Корецький, Г.В. Кобернюк, М.М. Кузьменко, І.Н. Кутузов, А.А. Миронов, А.В. Мостипан, А.Б. Ольховський, Т.М. Писаренко, А.М. Таранов, А.А. Чейда, І.Д. Фаріон, В.Д. Юрченко, Г. Ханг, Ю.В. Шиленко та інші. Зокрема, В. Бочковською та А. Беспаловою створено модель територіального фонду медичного



страхування, проте в ній не передбачено зв'язку з Міністерством охорони здоров'я та запропоновано додаткові податкові навантаження на підприємства, які й без того майже не працюють через податковий тиск. Різні моделі фінансування описуються в статті Б.М. Корецького, який пропонує здійснювати фінансування медичних установ безпосередньо через систему страхових медичних організацій. Але, як відомо, в цілому світі частина коштів у галузь надходить із державного та місцевих бюджетів, тому, на нашу думку, такий варіант фінансування послабить контроль із боку держави й може спричинити збільшення порушень фінансово-бюджетної дисципліни. Такі науковці, як С.А. Васильченко, А.В. Мостипан, Р. Вінсент, Д. Ханг, Й. Денисов, А. Іванов пропонують вирішити фінансову кризу шляхом оптимізації структури галузі, а саме через запровадження сімейного лікаря, що дасть змогу за допомогою розширення його функцій зменшити чисельність лікарів і покращити якість надання медичної допомоги. Інші науковці (О.М. Голяченко та А.О. Голяченко) категорично проти запровадження страхової медицини в Україні, а натомість пропонують покращити фінансовий стан установ охорони здоров'я шляхом перегляду нормативів медичної допомоги, внаслідок чого зменшиться кількість лікарів.

Розвиток страхової медицини є одним з актуальних і перспективних напрямів вирішення проблем фінансування охорони здоров'я. Досвід зарубіжних країн свідчить, що відповідні страхові фонди можуть стати вагомим джерелом фінансування, а механізм формування й витрачання цих коштів може забезпечити його адресність, тобто фінансування не загалом медичних закладів, а конкретних громадян.

У цьому контексті пропонується спочатку впровадити загальнообов'язкове державне медичне страхування, яке забезпечуватиме фінансування певного гарантованого рівня соціально-медичних потреб кожному громадянину. Згодом, урахувавши економічні можливості держави, її політику щодо охорони здоров'я, можна перейти до впровадження приватного медичного страхування.

Зародження елементів соціального страхування й страхової медицини в Україні відноситься до XVIII – початку XIX ст. і проглядається через призму тодішнього державного устрою країни, коли в царській Росії на капіталістичних підприємствах почали з'являтися каси взаємодопомоги. Перше страхове товариство, яке займалося страхуванням від нещасних випадків і страхуванням життя, з'явилося в Росії 1827 р. Через епідемію холери 26 серпня 1866 р. було прийнято тимчасове положення, згідно з яким власники фабрик і заводів зобов'язувалися організувати для своїх робітників лікарні. Це й поклало початок формування так званої фабрично-заводської медицини.

Другий етап розвитку страхової медицини в Україні пов'язаний із переходом країни в березні 1921 р. до непу. Це призвело до відходу від бюджетної системи фінансування й спричинило передачу медичних закладів на фінансування до місцевих бюджетів із подальшим скорочен-

ням фінансування й запровадженням часткової оплати за отриману медичну допомогу.

І лише з прийняттям Закону України “Про страхування” (1996 р.), Основ законодавства України про загальнообов'язкове державне соціальне страхування (1998 р.) та проекту Закону України “Про загальнообов'язкове державне соціальне медичне страхування” (2001 р.) можна говорити про подальший розвиток соціально значущої ідеї обов'язкового медичного страхування в нашій державі [1].

Перш ніж запроваджувати страхову медицину, слід відповісти на запитання, а чи буде вона більш ефективною, ніж діюча, чи зможе радикально вплинути на вирішення насущних проблем? Як свідчить світовий досвід, обов'язкове медичне страхування є однією з багатьох існуючих у світі систем фінансування охорони здоров'я, а її успішність залежить насамперед від загального економічного стану держави та історичних особливостей її розвитку. У світовій практиці медичне страхування є частиною системи медичного забезпечення, яке визначається як захист, що надається суспільством своїм членам за рахунок суспільних заходів і здійснюється у формі обов'язкового медичного страхування, приватного медичного страхування, платної і безоплатної медичної допомоги та спеціальних додаткових медичних програм.

На відміну від інших форм медичного забезпечення, обов'язкове медичне страхування фінансується за рахунок страхових внесків і засноване на принципі солідарності – кожен робить внесок на підтримку інших у випадку їх потреби в медичному обслуговуванні.

Існують деякі розбіжності між різними системами обов'язкового медичного страхування, але необхідно виділити його основні елементи: медичне страхування фінансується за рахунок внесків, які солідарно виплачуються наймачами й працівниками, за можливої участі держави у вигляді додаткових внесків або дотацій за рахунок загальних податків; обов'язковість участі одержувачів медичної допомоги з деякими винятками; внески акумулюються в спеціальних фондах медичного страхування, за рахунок яких оплачується медична допомога; надлишки коштів, які не використовуються фондами на медичну допомогу, інвестуються для одержання додаткового доходу; особисті права на медичну допомогу гарантуються за рахунок обліку внесків без перевірки доходів або рівня малозабезпеченості; розмір внесків та обсягів медичної допомоги не залежать від того, скільки застрахований заробляє.

У різних країнах існують різні системи медичного забезпечення, але об'єднує їх те, що національна політика опирається на правову базу, погоджену із загальноновизнаними міжнародними нормами і стандартами, які викладені в багатьох міжнародних правових актах Організації Об'єднаних Націй (ООН), Ради Європи (РЄ), Всесвітньої організації охорони здоров'я (ВООЗ), Міжнародної організації праці (МОП) та ін. Наприклад, статтею 25 Загальної декларації прав людини, прийнятою Генеральною Асамблеєю ООН 10 грудня 1948 р., передбачено, що кож-

на людина має право на медичний огляд, який є необхідним для підтримання її здоров'я, а також здоров'я членів її сім'ї.

Більшість країн – членів Організації економічної співдружності та розвитку (ОЕСР) у вирішенні питань фінансування та організації охорони здоров'я дотримуються основних принципів:

- забезпечення рівного доступу до охорони здоров'я (певних видів) для усіх громадян, заснованого на солідарній участі бідних і багатих, хворих і здорових, молодих і старих – незалежно від місця проживання;
- висока якість послуг охорони здоров'я, тобто добрий стан здоров'я населення й задоволення потреб пацієнтів за прийнятих витрат;
- макроекономічна ефективність, що визначає максимально допустиму питому вагу національних ресурсів, яку можна спрямувати на задоволення потреб охорони здоров'я.

Мінімальний перелік медичних послуг, які мають бути надані, в тому числі й за рахунок страхування, на міжнародному рівні визначено статтею 10 Конференції МОП 1952 р. № 102 “Про мінімальні норми соціального забезпечення”. Відповідно до Конференції МОП 1969 р. № 130 “Про медичну допомогу і допомогу у зв'язку із захворюванням” громадяни кожної з країн, що ратифікували цю Конференцію, повинні отримувати принаймні такі види медичної допомоги (стаття 13) : а) загальну лікарську допомогу, зокрема допомогу вдома; б) допомогу, яку надають спеціалісти стаціонарним або амбулаторним хворим та допомогу спеціалістів, яка може бути надана за межами лікарні; в) відпускання необхідних медикаментів за рецептом лікаря або іншого кваліфікованого спеціаліста; г) госпіталізацію за необхідності; д) стоматологічну допомогу, якщо це передбачено національним законодавством; е) медичну реабілітацію, в тому числі надання, ремонт і заміну протезів або ортопедичних засобів, якщо це передбачено національним законодавством.

Розвиток страхової медицини – це перспективний напрям розв'язання проблем фінансування охорони здоров'я, яка є однією з найважливіших галузей сфери послуг. Досвід зарубіжних країн свідчить, що відповідні страхові фонди можуть стати вагомим джерелом фінансування, а механізм формування й витрачання цих коштів може забезпечити саме його адресність, тобто фінансування не загалом медичних закладів, а конкретних громадян. У деяких розвинутих країнах Європи, а також у США і Канаді фінансування охорони здоров'я складає від 8% до 17% ВВП країни. В Україні також потрібно впроваджувати медичне страхування з урахуванням досвіду країн із розвинутою ринковою економікою.

Роль медичного страхування в загальній системі охорони здоров'я різних країн світу добре висвітлює загальний аналіз джерел його фінансування. У більшості країн світу застосовуються три моделі фінансування охорони здоров'я: із суспільних фондів споживання, з приватних фондів та зі змішаних фондів.

Особливістю першої моделі є те, що для збору коштів до суспільного фонду медичного забезпечення використовується два канали: податки або внески в суспільні фонди медичного страхування. Обидва методи базуються здебільшого на розмірах доходів, але оподаткування може від розміру доходів і не залежати. Система фінансування із суспільних фондів може також бути змішаною: за рахунок податків та одночасно за рахунок страхових внесків. Так, за рахунок податків в основному здійснюється фінансування охорони здоров'я в Ірландії, Великобританії, у Скандинавських країнах, Канаді та Іспанії. На суспільному страхуванні в основному заснована схема фінансування охорони здоров'я в Бельгії, Франції, Німеччині, Японії, Люксембурзі та Нідерландах.

Першій моделі фінансування охорони здоров'я певною мірою відповідають загальновизначені системи організації охорони здоров'я, які в “чистому вигляді” на практиці не існують, але організацію охорони здоров'я кожної країни можна віднести до однієї із трьох систем:

1. Система Беверіджа, заснована на фінансуванні охорони здоров'я переважно з державного бюджету й основним провідником якої виступає національна система охорони здоров'я Великобританії. Система досить широко застосовується в Греції, Ірландії, Норвегії, Португалії, Іспанії, Швеції, Данії та Фінляндії.

2. Система Бісмарка, заснована на фінансуванні охорони здоров'я переважно за рахунок суспільного обов'язкового страхування на випадок хвороби. Вперше введена 1881 р. в Німеччині. Ця система широко застосовується в Австралії, Бельгії, Франції, Люксембурзі та Швейцарії.

3. Система Семашко, заснована на фінансуванні охорони здоров'я переважно з державного бюджету при строгому централізованому управлінні та контролі з боку держави, основним провідником якої виступає національна система охорони здоров'я Радянського Союзу. Модель широко використовувалась у колишніх країнах соціалістичної співдружності.

В Україні ще недосконало розроблено концепцію національної страхової медицини. Так, за основу вирішено взяти існуючий до цього часу досвід Німеччини, де медичне страхування ґрунтується на так званій “моделі Бісмарка” (ця модель у французькій модифікації визнана за даними Всесвітньої організації охорони здоров'я у 2000 р. найкращою). Головна відмінність української моделі від німецької полягає у фінансуванні. За кордоном цим займаються страхові компанії. Усе населення, залежно від соціального статусу і фінансових можливостей, поділено на три категорії, кожна з яких отримує диференційовану допомогу.

Застосування моделі Бісмарка можна розглянути на прикладі Німеччини, для якої характерна децентралізована форма організації страхування здоров'я. В її основі лежить принцип, що був сформульований ще 1881 року під час створення цієї системи: уряд не бере на себе відповідальності за фінансування охорони здоров'я (за винятком деяких його сегментів), а створює умови для функціонування

необхідних фондів медичного страхування, а також здійснює нагляд за функціонуванням усієї страхової системи.

Німеччина має найтривалішу історію медичного страхування. Для неї характерна подвійна система страхування здоров'я за участю і приватних, і державних організацій [4].

Згідно із Соціальним кодексом лікарняні каси мають установлений перелік гарантованих послуг:

- превентивні заходи;
- заходи щодо ранньої діагностики хвороби;
- надання лікувальних послуг (амбулаторна медична допомога, стоматологічне лікування, лікарняне обслуговування під час вагітності й пологів, догляд за хворими вдома, проведення реабілітаційних заходів, забезпечення лікарськими, допоміжними засобами, лікування у лікарнях і профілактичних або реабілітаційних установах);
- транспортування хворого.

Особливістю німецької моделі обов'язкового медичного страхування є безпосередня участь застрахованого в оплаті медичних послуг – 80% вартості лікування сплачує лікарняна каса, 20% – сам пацієнт. Це плата і за лікування, і за ліки. Вартість ліків єдина по всій Німеччині.

Тож, у Німеччині діє механізм багатоканального фінансування охорони здоров'я, найвагомим джерелом якого є фонди обов'язкового медичного страхування. Наявність інших джерел фінансування має позитивне значення – зменшує фінансове навантаження на всіх учасників системи (на федеральний і місцевий бюджети, роботодавців, самих застрахованих), чим зумовлюється ефективність і достатність надходжень коштів у цю галузь, сталість системи фінансування охорони здоров'я.

На відміну від німецької моделі, французька модель медичного страхування має централізовану форму управління. Діє система загального страхування на випадок хвороби, якою охоплено 80% населення. Система обов'язкового медичного страхування регламентується законом “Про медичне страхування і фінансування охорони здоров'я”, який передбачає внесення страхових сум як тими, хто працює, так і роботодавцями. Причому роботодавці сплачують 12,5%, а наймані працівники – 7%.

На чолі системи лікарняних кас стоїть національна каса (каса страхування найманих працівників), яка перебуває під контролем Міністерства соціального забезпечення та праці. Національна каса виконує функції визначення розмірів допомог і внесків, загальний контроль за діяльністю лікарняних кас, контроль якості й вартості медичної допомоги. Страхування в касах здійснюється за територіальним принципом. Клієнти практично позбавлені права вибору страхової організації. Державою забезпечується невисока вартість ліків.

Німецька і французька моделі мають такі спільні риси: обов'язковий характер страхування, доступність для всього населення незалежно від ступеня ризику, застосування сучасних технологій, суспільна солідарність, участь держави в оплаті вартості лікування та ліків.

Так, населення сплачує 25% гонорару лікаря за візит, 30% гонорару стоматолога; 20% вартості лікарняного обслуговування; 10% вартості незамінних препаратів; 30% витрат на медикаменти, лабораторні аналізи тощо.

Фінансування системи охорони здоров'я у Франції здійснюється в основному за рахунок трьох джерел фінансування: загального бюджету, обов'язкового медичного страхування (основне джерело фінансування), особистих коштів громадян.

Розподіл фінансових ресурсів у системі обов'язкового медичного страхування покладено на недержавні структури – страхові лікарняні каси. Державні органи на основі законів установлюють розміри допомог і способи фінансування лікарняних кас. Державне медичне страхування здебільшого фінансується системою внесків, які визначаються на основі середнього заробітку, незалежно від специфічності очікуваного ризику [2].

Окрім цього, Франція має розвинуту мережу приватних страхових компаній. У разі отримання страхового поліса в приватній страховій компанії остання, як і будь-яка страхова каса, сплачує госпітальні затрати й рахунки пацієнта за прийом лікарями. Шкала додаткових послуг варіюється і є предметом конкуренції приватних страхових компаній. Перевагою цієї форми організації медичного страхування є відносна простота управління, незначні адміністративні витрати, а недоліком – обмежені можливості при залученні місцевих ресурсів, недостатньо оперативна реакція на потреби населення.

Особливості бюджетної системи охорони здоров'я розглянемо на прикладі Великобританії та Швеції, де держава в неявній формі є єдиним страховиком усього населення, що створює державну монополію. Основна частина коштів надходить із державного бюджету й розподіляється згори вниз по управлінській вертикалі. Централізоване фінансування дає змогу стримувати зростання вартості лікування.

У Швеції страхові закони про медичне страхування були видані 1898 року. Загальне обов'язкове медичне страхування було введено 1955 року. Діє Національна система соціального страхування – загальна й обов'язкова для всього населення країни. Власником засобів виробництва в системі охорони здоров'я є держава, тобто органи центрального, місцевого й міського управління. Вони також здійснюють керівництво службою охорони здоров'я, планують і фінансують її діяльність. Однією з особливостей шведської системи страхування є передача застрахованими страховикам своїх юридичних прав із питань медичного страхування [3].

Система фінансування охорони здоров'я Швеції має такий вигляд: 18% становлять кошти держави; 51% – кошти місцевих органів влади; 31% – кошти роботодавців. Національна система охорони здоров'я у Швеції має чітке соціальне спрямування. Лікарі, як наймані працівники, працюють за контрактами. Лікарняна допомога майже повністю фінансується регіональним бюджетом.

Система організації охорони здоров'я Великобританії в основному схожа на шведську модель. У Великобританії використовується система бюджетного фінансування охорони здоров'я, що зумовлює його державний характер із великим ступенем централізації управління. Закон про страхування, що був прийнятий 1912 року, започаткував принцип обов'язковості й охопив обов'язковим медичним страхуванням третю частину населення Англії, Шотландії та Ірландії, практично всіх осіб, що працюють, і службовців за договором найму. Фінансова основа системи охорони здоров'я Великобританії така: 85% фінансується за рахунок загального оподаткування; 12,5% – надходжень із фондів обов'язкового державного страхування працівників і роботодавців; 2,5% надходить від платежів за послуги. Усі, хто працює, підлягають обов'язковому страхуванню здоров'я, а також непрацюючі жінки в шлюбі, які можуть приєднатися до страхування за добровільними програмами. Таким чином, Національна система охорони здоров'я практично існує за рахунок коштів, що вносяться платниками податків і виділяються урядом на охорону здоров'я зі статті затрат на соціальні потреби.

Загалом організація системи охорони здоров'я в країнах Європейського союзу характеризується надзвичайною різноманітністю форм, оскільки кожна з них несе на собі відбиток особливостей еволюції охорони здоров'я – історичних, політичних, економічних і ментальних. Тому, на нашу думку, під час запровадження обов'язкового медичного страхування в Україні варто враховувати певні чинники. В умовах економічної нестабільності в країні, основною рисою якої є відсутність державних коштів, зростає потреба в жорсткішому плануванні ресурсів. Доцільним є також запровадження централізованої бюджетно-страхової моделі охорони здоров'я з прямою формою організації фінансування з поступовим залученням на ринок медичних послуг страхових компаній.

У нинішніх умовах за відсутності наукових розробок, навичок контролю, кваліфікованих спеціалістів передача обов'язкового медичного страхування страховим компаніям, лікарняним касам є несвоєчасною.

Ураховуючи нерозвиненість економічних і правових відносин у галузі охорони здоров'я, доцільною є акумуляція страхових коштів у єдиному фонді соціального медичного страхування. Фонд – це самоврядна некомерційна організація, що є головним утримувачем коштів в охороні здоров'я й покупцем медичних послуг для населення. Функціонування централізованого фонду медичного страхування з мережею регіональних, відносно автономних філій підвищує передбачуваність відшкодування витрат на медичну допомогу, мінімізує чисельність адміністративного апарату, що займається страхуванням, і, відповідно, зменшує витрати на його утримання до 3–5%, тоді як в інших видах систем адміністративні видатки, за даними Міжнародної організації праці, поглинають 8–10% від загального обсягу видатків за страховими програмами [ 5 ].

Друга модель – система приватного фінансування – практично зовсім не користується фінансуванням охорони здоров'я із суспільних фондів. Такі системи можуть функціонувати у формі приватних страхових фондів охорони здоров'я, використовувати внески включно із приватних джерел або прями виплати виробникові медичних послуг, а також у вигляді комбінацій цих трьох джерел фінансування. Навряд чи можливо відшукати хоча б одну систему фінансування охорони здоров'я, яка була б заснована виключно на приватних принципах. У Швеції існує система добровільного страхування, в Туреччині жодне із джерел фінансування не є основним, в США система приватного страхування зазнає більше половини загальних витрат на охорону здоров'я. Зустрічаються також комбіновані системи приватного і суспільного фінансування.

У багатьох країнах існує третя модель фінансування охорони здоров'я – суспільно-приватна, яка має три найбільш поширені варіанти: 1) із суспільних фондів та із приватних страхових фондів (Нідерланди); 2) із приватних страхових фондів на обслуговування специфічних груп населення (наприклад, суспільне фінансування для бідних і престарілих через такі системи, як Медикейт і Медикер у США); 3) із суспільних та приватних страхових фондів (наприклад, у Канаді оплата лікування здійснюється за рахунок суспільного страхування, а придбання ліків за рецептами амбулаторних клінік та послуги дантистів – за рахунок приватного страхування).

Отже, моделі фінансування систем охорони здоров'я склалися з врахуванням світового досвіду та історичних особливостей окремих країн. Необхідно звернути увагу на особливості систем фінансування охорони здоров'я за рахунок медичного страхування – усі вони забезпечують лікування громадян у випадку їх хвороби, але заходи щодо профілактики хвороб і зміцнення здоров'я ними практично не передбачаються. У багатьох випадках умови страхування фактично виключають надання послуг, які не були чітко визначені як лікувальні.

Фінансування охорони здоров'я може бути бюджетним, соціальним і приватним. Бюджетна система охорони здоров'я найвиразніше була представлена в країнах колишнього СРСР. Соціальна система характерна для країн Західної Європи, а приватна – для США.

За бюджетної системи охорони здоров'я страхування або відсутнє зовсім, або є незначним. Бюджетна система фінансування охорони здоров'я передбачає використання коштів податкових надходжень до бюджету, але саме це не сприяє стабільності фінансового забезпечення охорони здоров'я.

Соціальна система фінансування охорони здоров'я заснована на цільових внесках підприємств, працівників, державних субсидіях. Для цієї системи характерне співіснування державних і приватних систем охорони здоров'я.

Фінансування охорони здоров'я в Україні здійснюється за рахунок Державного бюджету, бюджету Автономної Республіки Крим, бюджетів

місцевого та регіонального самоврядування, фондів медичного страхування, благодійних фондів та будь-яких інших джерел, не заборонених законодавством.

В Україні Указом Президента України від 14 листопада 2000 р. № 1223/ 2000 “Про проведення експерименту щодо впровадження обов’язкового соціального медичного страхування в м. Києві і Київській області” передбачено здійснення відповідного експерименту, який може стати основою загального обов’язкового медичного страхування в державі. Тут планується впровадження страхової медицини, яка ґрунтується на принципі обмеження доступу приватних страхових компаній до формування страхового фонду (принаймні на початковому етапі), що формується на рівні видатків підприємців і підпорядковується державі (у Києві – муніципальній владі). Тому потрібно спочатку впровадити державне загальнообов’язкове медичне страхування, яке забезпечуватиме фінансування певного гарантованого рівня соціально-медичних потреб кожному громадянину. Згодом, урахувавши економічні можливості держави, її політику щодо охорони здоров’я, можна говорити про впровадження приватного медичного страхування.

Необхідно також зазначити, що в багатьох країнах світу, зокрема в країнах ОЕСР, існує жорсткий контроль за видатками на охорону здоров’я, який ґрунтується на одному з наведених нижче прикладів: 1) замороження фінансування на досягнутому рівні: нульове зростання витрат; 2) стабілізація витрат на охорону здоров’я у відсотковому відношенні до національного доходу або до валового внутрішнього продукту; 3) загальний темп зростання рівня витрат на рівні темпів інфляції в країні; 4) темпи приросту обсягу витрат мають від’ємний знак; 5) загальні витрати на охорону здоров’я підвищуються в обумовлених межах; 6) обсяг витрат на охорону здоров’я пов’язується з обсягом надходження податків або внесків до страхових фондів.

Досвід застосування медичного страхування для фінансування охорони здоров’я в Угорщині, Чехії, Латвії, Естонії та інших країнах, які реформують систему медичного забезпечення, свідчить про наявність декількох проблем, що потребують обов’язкового вирішення. По-перше, це структурний дефіцит, який породжується через те, що внески працівників повинні компенсувати потреби найбільших споживачів послуг охорони здоров’я – непрацездатного населення. По-друге, використання для внесків відрахувань від заробітної плати призвело до значного збільшення вартості робочої сили, що спонукає до безробіття та її переходу в тіньовий сектор. По-третє, багато проблем виникає при визначенні механізмів розподілу коштів між надавачами медичних послуг – лікарнями та лікарями. Виникає проблема надмірної медичної допомоги (лікарю вигідно пропонувати хворому додаткове, досить дороге лікування, яке повинна оплачувати страхова компанія).

Стрімке подорожання медичних послуг стало проблемою всіх країн, які фінансують охорону здоров’я за принципом оплати наданих послуг.

Для запобігання цьому процесу встановлюють регульовану систему оплати конкретних послуг.

Особливістю медичного страхування є наявність довгострокових і короткострокових видів страхування. До довгострокових видів належить безперервне страхування здоров’я, договір про яке страхувальник може укласти на невизначений період. Проте “довгостроковість” цього виду не дає підстав віднести його до підгалузі страхування життя, оскільки він не передбачає повернення страхувальникові внесених ним коштів по закінченні терміну дії договору страхування. Так само не можна віднести до підгалузі страхування від нещасних випадків короткострокові види медичного страхування (страхування здоров’я на випадок хвороби, медичне страхування туристів, які від’їжджають за кордон, страхування на період вагітності та пологів тощо), бо в них відсутній момент, характерний для всіх видів страхування від нещасних випадків, а саме: нещасний випадок, який характеризується раптовістю.

Основною особливістю медичного страхування є його адресність, тобто фінансування медичних заходів не загалом, а спрямованих на конкретного громадянина. Крім того, страхова виплата може здійснюватися страховиком двома способами: по-перше, безпосередньо страхувальникові (застрахованому) у вигляді повної страхової суми або її частки; по-друге оплати медичній установі вартості лікування застрахованого (в т. ч. перебування в стаціонарі, фізіотерапевтичні процедури, консультації провідних фахівців, витрати на придбання ліків та ін.). Медичне страхування об’єднує всі види страхування, пов’язані з відшкодуванням витрат страхувальника у зв’язку із захворюванням і необхідністю лікування.

Поетапне реформування системи охорони здоров’я як в Україні в цілому, так і в регіонах із відповідним законодавчим та методичним забезпеченням впровадження медичного страхування дасть змогу зберегти і в подальшому розвивати сучасні організаційні та медичні технології, що слугуватиме населенню соціальною гарантією при забезпеченні його медичною допомогою необхідного обсягу та якості.

1. Проект Закону “Про загальнообов’язкове державне соціальне медичне страхування”. – № 4505-1 від 06.02.2004 р. (Подання І. Шурми).
2. Камінська Т. Про економічну суть медичної послуги / Т. Камінська // Економіка України. – 2003. – № 8. – С. 50–54.
3. Писаренко Т. Зарубіжний досвід державного регулювання економіки / Т. Писаренко // Формування економічних відносин в умовах ринку : збірник наук. праць / за ред. д. е. н. І. Д. Фаріона. – Тернопіль, 1997. – Вип. 1. – С. 194–197.
4. Писаренко Т. Охорона здоров’я в Україні: проблемний аспект / Т. Писаренко // Формування економічних відносин в умовах ринку : збірник наук. праць / за ред. д. е. н. І. Д. Фаріона. – Тернопіль, 1997. – Вип. 1. – С. 168–170.

5. Писаренко Т. Реформування організації обліку та контролю за державними доходами і видатками / Т. Писаренко // Вісник Тернопільської академії народного господарства; Науковий журнал ТАНГ. – Тернопіль : Економічна думка, 1999. – Вип. 6. – С. 153–157.

**SOCIO-ECONOMIC AND LEGAL PROBLEMS  
WITH INTRODUCTION OF MEDICAL INSURANCE  
IN UKRAINE IN CONTEXT OF FOREIGN EXPERIENCE**

**T. M. Oryshchyn, O. M. Oryshchyn**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019,  
Finance department, tel. +380 (342) 50 45 74, e-mail: [fin.@nung.if.ua](mailto:fin.@nung.if.ua)*

*Development of medical insurance is one of the most urgent and perspective direction of funding of public health care programs. Experience of foreign countries shows us that appropriate provident funds could be a significant source of financing, and that mechanism of forming and spending of these funds can guarantee its targeting. In this context it's suggested to embed obligatory state insurance, that would ensure financing of guaranteed level of socio-medical necessities for every citizen, and some time later we can start providing private medical insurance.*

**Key words:** *medical service, budget, health care, medical insurance, financing system, spatial payment.*

УДК 005.32:331.101.3

**ПРО НЕМАТЕРІАЛЬНУ МОТИВАЦІЮ ПРАЦІВНИКІВ  
КОМПАНІЙ В УМОВАХ КРИЗИ**

**М.О. Данилюк, О.Р. Волошинюк**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
кафедра економіки підприємства, тел. +380 (3422) 4 23 08  
e-mail: [econpid@nung.edu.ua](mailto:econpid@nung.edu.ua)*

*Стаття присвячена питанню ефективності нематеріальної мотивації в умовах економічної кризи. Рекомендовано заходи для підвищення ефективності стимулювання та використання трудового потенціалу робітників. На основі аналізу світового досвіду, виділяються основні напрямки на шляхи нематеріальної мотивації, визначається її роль та значення для підприємств в умовах обмежених грошових ресурсів та скорочення витрат на мотивацію персоналу.*

**Ключові слова:** *нематеріальна мотивація, ейчери, внутрішня мотивація, економічна криза, assessment-center (асесмент-центр).*

**Актуальність проблеми.** Внаслідок світової економічної кризи всі підприємства зіткнулися з проблемою підвищення мотивації праці персоналу в умовах обмежених грошових ресурсів. Тому перед топ-менеджерами та ейчерами компаній стоять завдання пошуку шляхів, способів і методів підвищення продуктивності праці працівників із мінімальним використанням коштів. Цього можна досягти за допомогою вдало та ретельно продуманої нематеріальної мотиваційної політики.

**Аналіз останніх наукових досліджень.** Проблему здійснення мотиваційної діяльності на підприємствах розглядали у своїх роботах такі вчені-економісти: А. Сміт, Ф. Тейлор, Г. Емерсон, Е. Мейо; всесвітньо відомі автори теорій мотивації: А. Маслоу, К. Альдерфер, Д. Мак-Клелланд, Ф. Герцберг, Д. Мак-Грегор, В. Оучі, В. Врум, С.Адамс, а також зарубіжні та вітчизняні вчені: А. Афонін, Д. Богиня, В. Гриньова, М. Дороніна, Г. Дмитренко, А. Єгоршин, А. Колот, О. Новікова, В. Онікієнко, Г. Цехановецький.

**Мета роботи.** Дослідження та аналіз проблемних питань у сфері матеріальної мотивації праці працівників підприємств; пошук шляхів мотивації персоналу в умовах кризи; аналіз передового досвіду провідних компаній та управлінців у сфері нематеріальної мотивації; аналіз можливості застосування зарубіжного досвіду для вітчизняних підприємств.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Що може заставити успішну компанію переглянути стан усіх своїх справ, напрямки діяльності, розміри витрат, доцільність певних дій, кадрову чи маркетингову політику? Чергова податкова перевірка? Профілактичний аудит висококваліфікованими спеціалістами незалежної аудиторської компанії? Прихід но-

вого керівництва? Безперечно, так! Але більш дієвого та спонукального мотиву до такого повороту подій, як криза, важко знайти.

Сьогодні не знайти на українському чи світовому просторі компанії, яку б не зачепила економічна криза. Вона виступила свого роду катализатором, що пришвидшив чи сповільнив розвиток бізнес-сектора певних галузей. Компанії, які в “мирний час” встигли розслабитися чи послабити контроль за своєю діяльністю, тепер з усіх сил намагаються ідентифікувати проблемні зони та ліквідувати їх.

Як вважає експерт із лідерства та професор Гарвардської бізнес-школи Джон Коттер (John Kotter), відчуття крайньої необхідності може зіграти компаніям на руку. У своїй новій книзі “Відчуття крайньої необхідності” (A Sense of Urgency) він пояснює, що мається на увазі. Звісно ж, і тут не обійшлося без всесвітньої економічної кризи.

Джон акцентує увагу на тому, яким чином криза може стати потужним мотиватором організаційного розвитку. Але для цього потрібно дотримуватися деяких ключових концепцій:

- До кризи потрібно ставитися як до потенційних нових можливостей, а не лише як до проблем, яких потрібно уникати всіма способами. Криза може бути сприятливою.
- Потрібно пам'ятати, що сама по собі криза не змінює флегматично-байдужого стану в компанії. А деякі її прояви, такі як страх, злість та сором, можуть критично знижувати ефективність співробітників. Тому за проявами кризи потрібно завжди уважно стежити.
- Щоб змінити байдужий “самозаспокоєний” стан у компанії, криза повинна бути помітною, відчутною, а також стосуватися реальних проблем бізнесу. Вона повинна бути достатньо глобальною, щоб її не можна було виправити “дрібними” діями. Компанії потрібно змінюватися, а не приховувати свої проблеми.
- Потрібно бути надзвичайно проактивним при оцінці, яким чином люди реагуватимуть на зміни в компанії;
- Плани та дії повинні брати до уваги думки та відчуття всіх співробітників. Тільки працюючи з пристрасстю, наполегливістю та оптимізмом, можна досягнути бажаного відчуття крайньої необхідності;
- Якщо відчуття крайньої необхідності низьке – ні в якому разі не варто пасивно чекати на кризу, яка могла б вирішити ваші проблеми (вона може ніколи не початися);
- Якщо ви перебуваєте на занадто низькій посаді і при цьому бачите, яким чином криза відкриває нові можливості перед компанією, зверніться до людей на високих посадах для того, щоб вони втілили ваше бачення в дійсність [1].

Топ-менеджери в пошуках рятівного круга для компанії найперше намагаються скоротити витрати. І після того, як вже було скорочено витрати на оренду, продано частину непотрібного обладнання, скорочено

корпоративні витрати, управлінські витрати тощо, черга доходить до однієї з головних складових успіху підприємств – до персоналу.

Процес оптимізації чисельності та структури персоналу є досить важливим, особливо в умовах кризи. Тому наступна фаза в життєвому циклі компанії значною мірою залежить від її ейчерів та їхньої кваліфікації, компетенції й досвіду. Тут важливо не “загубити” дійсно стратегічно важливих та кваліфікованих працівників, потрібно визначити, хто тягне компанію до низу, а хто з усіх сил намагається витягнути її на поверхню.

Після детального аналізу та обговорення нарешті прийнято рішення про те, кому залишитися, а хто покине компанію. За рахунок скорочення витрат на заробітну плату працівників на деякий час вдається поліпшити фінансовий стан. Звісно, в такій ситуації очікується, що працівники будуть працювати всіма силами, щоб допомогти компанії й не втратити таке важливе за сучасних умов місце роботи.

Але не варто забувати про те, що для того, щоб отримати максимально високий результат від працівників, необхідно подбати про їхню мотивацію. Так, в умовах кризи про матеріальну мотивацію не може йти й мови, оскільки це знову ж таки лишній тягар у вигляді витрат. Тому за таких умов варто звернути увагу на нематеріальну мотивацію, яка потребує незначних грошових ресурсів [2, с.3].

Опираючись на досвід та поради сучасних компаній та консультантів з управління персоналом, можна сказати, що, в першу чергу, ейчерам компанії варто звернути увагу на *підвищення внутрішньої мотивації персоналу*, а саме визначити, чому працівник виконує свою роботу на найвищому рівні або працює “опустивши руки”, чому один вид діяльності приносить більше морального задоволення, ніж інший. Це питання прийнято вирішувати на “вході” в організацію, тобто на роботу приймаються тільки ті кадри, які мають цю мотивацію до праці: працювати саме в цій компанії і саме над поставленими цілями.

Проте варто звернути увагу на той факт, що внутрішня мотивація має здатність із часом зменшуватися і, зрештою, якщо не вживати відповідних заходів, може зійти нанівець. Для багатьох (принаймні для кваліфікованих фахівців) нова робота – це нові завдання, нові перешкоди, які хочеться подолати, це можливість чомусь навчитися.

Не тільки для молоді, але й для співробітника, наприклад, з десятирічним досвідом роботи в даній області будь-який новий працедавець цікавий, оскільки володіє унікальним набором завдань, які слід навчитися вирішувати. Коли співробітник тільки-но приступає до нової роботи, найчастіше внутрішня мотивація сильна і може бути основним чинником, що визначає його поведінку на робочому місці. Відповідно, основне завдання – не втратити цю вигідну позицію.

Тому в ситуації економічної кризи для кадрових управлінців підприємств рекомендується усунути чи пом'якшити вплив на роботу працівників чинників демотивації, а саме:

- дискомфортне місце існування в корпорації;

- недооцінка навичок співробітника, які він сам цінує;
- ігнорування ідей та ініціативи;
- відсутність відчуття причетності до компанії;
- відсутність відчуття результату, особистого й професійного росту;
- відсутність із боку керівництва визнання досягнень і результатів співробітника;
- відсутність змін у статусі співробітника.

Нижче зупинимося на характеристиці деяких чинників.

Під час наймання на роботу кандидат і компанія укладають угоду, в якій відповідний відрізок часу, енергія та інтелект обмінюються на певну матеріальну винагороду, потенційні можливості реалізувати свої особисті мотиви й деяку сферу існування. Часто з боку кандидата гроші в даній ситуації не є домінуючим чинником, але в ході інтерв'ю прийнято робити акцент саме на компенсаційний пакет. А ось реальне місце існування, в яке кандидатів належить увійти, обговорюється дуже мало, тому що кандидати бояться ставити питання, а менеджери з персоналу або зберігають якісь комерційні таємниці, або розписують працевлаштування тільки в рожевому кольорі. У результаті – у потенційного співробітника формуються завищені очікування, які розходяться з дійсним станом речей у компанії.

Незабаром після початку роботи співробітник виявляє, що навчання – формальне, перспектив для зростання – ніяких, колектив – це закриті групи співробітників, куди новачків не пускають. Результат – внутрішньої мотивації більше немає [4, с.45].

Досвідченим керівникам відомо, як небезпечно брати на роботу фахівця занадто кваліфікованого для пропонованої йому посади. Навіть якщо він раптом погодиться на цю роботу з якихось особистих причин (наприклад, з фінансових міркувань), після декількох місяців він починає нудьгувати й шукати застосування своїм нереалізованим талантам і навичкам. І поки він не знайде іншу, більш відповідну своєму профілю, роботу, доведеться терпіти його спроби критики менш кваліфікованого, ніж він, керівництва, упереджене ставлення до колег або відкрити непокору вказівкам та розпорядженням вищого керівництва.

Загальновідомим є той факт, що не існує ідеального збігу кандидата і вакансії: досвідчені рекрутери знають, що найчастіше найкращий кандидат дечого не вміє, але при цьому володіє якими-небудь не вказаними в описі вакансії навичками. Тому в організації завжди чому-небудь вчать тих, хто прийшов, причому ігноруючи їх навички, що не стали в нагоді. Необачне ігнорування таких навичок із часом може мати наслідком серйозну демотивацію.

Тому в низці завдань та ситуацій, з якими стикається організація, потрібно час від часу надавати можливість працівникам оновлювати та застосовувати свої неключові навички та знання. Цього можна досягти шляхом залучення працівників до невеликих, тимчасових проектів, які, можливо, і віднімуть трохи їхнього вільного часу (або будуть вирішуватися тільки в позаурочний час), проте дадуть змогу працівникам зрозуміти,

що керівництво цінує їхні багатогранні вміння та навички й не дозволить їм їх забути.

Приступаючи до нової роботи, співробітники зазвичай “фонтанують” новими ідеями – від вдосконалення методів праці до перестановки меблів в офісі. Найчастіше від цих ідей просто відмахуються частково від недовіри до новачків, частково від небажання розлучитися зі звичною робочою рутинною, навіть якщо вона неефективна.

Керівництву компанії варто прислухатися до ідей та пропозицій. Навіть якщо вони не настільки геніальні для втілення в запропонованому вигляді, з них часто можна почерпнути що-небудь корисне. При цьому завжди варто пояснювати, чому, на погляд керівництва, та або інша ідея не підходить для реалізації саме в компанії.

Демотиватор “відсутність відчуття причетності до компанії”, на наш погляд, найбільш актуальний для співробітників, що працюють поза штатом компанії або для допоміжного персоналу. У таких працівників нерідко складається враження, що для менеджерів компанії вони взагалі є людьми другого сорту, які працюють на компанію виключно через гроші.

Відчуття причетності до загальної справи й командний дух є дуже сильним стимулом. Співробітники, жертвуючи своїми особистими інтересами й часом, готові працювати на досягнення цілей компанії. Тому слід залучати таких співробітників до загальнокорпоративних заходів, регулярно інформувати їх про те, що відбувається в компанії. Слід пам'ятати: ця проблема може торкатися не тільки позаштатників, але й постійних працівників, а іноді й цілих підрозділів.

За ситуації, коли сама специфіка роботи не дає можливості розвиватися й досягати результатів, рутинна одноманітна діяльність через певний час нейтралізує внутрішню мотивацію більшості співробітників компанії, навіть тих, які не люблять різноманітності. Аналізуючи проведені з компанією роки, співробітник розуміє, що окрім справно виплачуваної зарплати, він не отримав нічого. Особливо тяжко переживають відсутність цікавої роботи творчі люди.

Демотивуючою виявляється також робота, структурована таким чином, що конкретний результат видно тільки після значного відрізка часу. Може пройти декілька років до того моменту, коли працівник побачить результати своєї діяльності. Не в кожного вистачить терпіння й наполегливості працювати так протягом тривалого часу.

Для співробітників “рутинної” сфери діяльності компанії слід створювати час від часу проекти – короткострокові завдання, часто в суміжних з їх спеціалізацією областях. Це урізноманітнить роботу й дасть змогу їм чому-небудь навчитися. Довгострокові ж проекти завжди слід розділяти на відчутні етапи, активно “озвучувати” проміжні результати, і, звичайно, заохочувати працівників. Остання теза настільки важлива, що її слід винести в окремий чинник демотивації.

Припустимо, що співробітникам вдається укласти дуже вигідний для компанії контракт, але цього ніхто не помічає, вважаючи, що все так



і повинно бути. Не важко здогадатися якою буде на це реакція працівника. Можливо, в компанії не прийнято помічати своїх досягнень або виділяти окремих співробітників із загальної маси. А можливо, керівництво сильно завищує критерії оцінки результатів роботи співробітників? Керівництву компанії варто завжди акцентувати увагу на “перемогах” своїх працівників. Слід заохочувати їх за це, можливо, не завжди фінансово, але завжди словесним схваленням і підтримкою.

Структурні обмеження є найбільш поширеною причиною уповільнення й зупинки кар’єрного зростання, тобто зміни статусу працівника в організації, що дає повноваження, владу, можливість вирішувати нові завдання і рости. Ситуація типова для великих компаній з ієрархічною структурою. Наприклад, коли на місце менеджера претендує до 15 торгових представників, у такій ситуації, як правило, навіть талановитий працівник може просидіти на своїй посаді не один рік. Багато компаній пропонують дуже гарний компенсаційний пакет і безліч інших можливостей за відсутності потенційного підвищення статусу й не можуть гарантувати високий рівень мотивації і лояльності працівників. У результаті працівники переходять в інші компанії на вищі позиції. Не останнім за значущістю демотиватором є суб’єктивізм керівництва під час ухвалення рішень про переміщення працівників.

Доцільно застосовувати різні прийоми зміни статусу без зміни посади, наприклад, запропонувати працівникові керівництво тимчасовим проектом [3, с.14–15].

Однією з головних причин зниження продуктивності праці персоналу є помилки ейчерів у процесі добору персоналу. Для більш ефективного кадрового відбору пропонується для компаній застосовувати методику *assessment-center* (асесмент-центр). Це метод оцінки персоналу, який заснований на спостереженні спеціально навчених оцінювачів (асесорів) за поведінкою оцінюваних працівників безпосередньо в робочих ситуаціях або під час виконання ними спеціальних завдань. Зміст завдань відображає основні аспекти і проблеми діяльності в рамках тієї чи іншої посади. Вони дозволяють оцінити співробітника або кандидата на вакантну посаду за такими параметрами: виконання посадових обов’язків; особливості поведінки; ефективність діяльності; рівень компетенції; рівень досягнення цілей; особові особливості [5, с.5].

Асесмент-центр включає низку процедур і розробляється з урахуванням вимог, що пред’являються до конкретних посад. Асесмент-центр припускає стандартизацію, тобто наявність певних нормативів проведення процедур і системи оцінок (критеріїв і шкал оцінки). Іноді, крім спеціальних завдань, асесмент-центр включає структуроване інтерв’ю або тестування. Приблизний перелік оцінних процедур:

- психологічне та професійне тестування (тести на IQ, пам’ять, увагу, нормативні тести-опитувальники, ситуаційно-поведінкові тести);
- індивідуальні та групові вправи;
- рольові ігри;
- інтерв’ю.

На основі використовуваних процедур проводиться аналіз результатів та складання підсумкового звіту за результатами оцінки, видача рекомендації.

**Висновки та перспективи подальших наукових розробок у даному напрямі.** Отже, застосування стандартних і нестандартних методів оцінки дає змогу виявити співробітників із лідерським потенціалом, проявитися людям, непомітним у повсякденній роботі, але які беруть керівництво у свої руки в специфічних ситуаціях. На підставі результатів асесмент-центру виявляються не тільки навички, що є у співробітника, але і його приховані можливості, які зможуть зробити його роботу ефективнішою й продуктивнішою в компанії. Результати асесмент-центру допомагають вирішити, в якій області надалі проводити навчання співробітників. Таким чином, під час визначення основних напрямків мотиваційної політики підприємств в умовах кризи ейчери та топ-менеджери повинні звернути увагу на нематеріальну мотивацію персоналу, а саме на підвищення внутрішньої мотивації до праці. З метою ефективною, планомірною та впорядкованою роботи з персоналом варто застосовувати методику *assessment-center* – метод оцінки персоналу, який базується на визначенні експертами (асесорами) міри відповідності працівника займаній посаді безпосередньо в робочих ситуаціях або під час виконання спільних проектів.

1. “A Sense of Urgency”, HBS Working Knowledge / пер. Ярослав Федорак; МСУа.
2. Верхоглазенко В. В. Система мотивації праці / В. В. Верхоглазенко // Консультант директора. – 2004. – № 2.
3. Андреева Т. В. Чому йдуть кращі : проблема демотивації персоналу / Т. В. Андреева // Управління компанією. – 2008. – № 11.
4. Мескон М. Х. Основы менеджмента / М. Х. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури ; пер. с англ. – М. : Дело, 1992. – 369 с.
5. Семикіна М. В. Індикатори економічної та соціальної ефективності мотивації праці / М. В. Семикіна // Актуальні проблеми економіки. – 2004. – № 10. – С. 181–190.

## ABOUT INTANGIBLE MOTIVATION OF WORKER'S OF THE COMPANIES IN CONDITIONS OF ECONOMIC CRISIS

**M.O. Danyliuk, O.R. Voloshyniyk**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019,  
economic department, tel. +380(3422) 4 23 08  
e-mail: [econpid@nung.edu.ua](mailto:econpid@nung.edu.ua)*

*The article is dedicated to the question of intangible motivation's efficiency in conditions of economic crisis. The steps for increasing of motivation's efficiency and using of labor potential are recommended. Basing upon the world experience's analysis, the main directions and the ways of intangible motivation are distinguished, its role is determined and the meaning for enterprises under conditions of limited money resources and reducing of expenses on staff motivation.*

**Key words:** *immaterial motivation, internal motivation, economic crisis, assessment-center.*

УДК 331.5(477)

## ВИКОРИСТАННЯ ПОКАЗНИКА ЧИСЕЛЬНОСТІ ОСІБ БЕЗ ВИЗНАЧЕНОГО МІСЦЯ ПРОЖИВАННЯ СЕРЕД ПРАЦЕЗДАТНОГО НАСЕЛЕННЯ КРАЇНИ ПІД ЧАС ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ РОБОЧОЇ СИЛИ

**І.В. Перезовова**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
кафедра обліку і аудиту,  
тел. +380 (3422) 4 01 37, e-mail: [Perevozova@ukr.net](mailto:Perevozova@ukr.net)*

*Проводиться огляд одного з проблемних питань при визначенні сутності, критеріїв та показників ефективності використання робочої сили на різних рівнях організації виробництва; окремих аспектів зайнятості, оптимізації професійно-кваліфікаційних параметрів робочої сили на ринку праці з урахуванням похибок на такий показник (окреме соціальне явище), як чисельність осіб без визначеного місця проживання серед працездатного населення країни.*

**Ключові слова:** *виробничий потенціал, праця, прописка, робоча сила, особи без визначеного місця проживання, процес.*

**Актуальність проблеми.** Середовище розробки та здійснення економічної стратегії в Україні на сучасному етапі характеризується структурно недосконалим виробничим потенціалом у випадку недостатності як державної, так і приватної економічної влади. Процес становлення ринку праці в Україні супроводжується посиленням його сегментації. За таких умов проведення ефективних економічних стратегії і тактики без докорінних змін як об'єктів, так і суб'єктів економічної влади є неможливим.

Серед низки пріоритетів економічної стратегії України окреме місце займає необхідність поглибленого дослідження ефективності використання робочої сили за окремими видами економічної діяльності. Даний напрям актуалізується у зв'язку зі структурною трансформацією і технічною модернізацією економіки країни, забезпеченням повної продуктивної зайнятості економічно активного населення гідною працею, вдосконаленням соціально-трудових відносин, скорочення безробіття, а також зняття соціальної напруженості в державі.

**Аналіз останніх наукових досліджень.** Теоретичним проблемам зайнятості та ефективності використання робочої сили як важливої складової ефективності економіки на різних етапах розвитку людського суспільства присвячено праці вітчизняних та зарубіжних учених: О. Амоші, О. Амосова, С. Бандури, Г. Беккера, О. Богуцького, П. Борщевського, Н. Гарсія, В. Гейця, В. Герасимчука, І. Гнибіденка,

О. Голодця, О. Грішнєвої, А. Гудскова, Б. Данилишина, В. Данюка, Л. Дейнеко, М. Долішнього, Ю. Іванова, Р. Івануха, Т. Заяць, Є. Качана, Дж. Р. Кемпбелла, Л. Керга, Д. Кларка, Р. Колосової, А. Колота, А. Коровкіна, І. Кравченко, Ю. Краснова, В. Кузнецова, Г. Купалової, В. Куценко, Е. Лібанової, К. Маркса, А. Маслоу, А. Маршалла, П. Мюллера, В. Новікова, О. Новікової, П. Ноймана, В. Онікієнка, В. Онищенко, І. Петрової, У. Петті, С. Пирожкова, Д. Рікардо, О. Рофе, В. Савенка, В. Стешенка, Г. Струмліна, Ф. Тейлора, Л. Туроу, А. Хомри, Л. Чернюк, М. Чумаченка, А. Чухна, Л. Шевченко, О. Шевчук, Р. Шторма, Т. Шульца, Л. Фільштейна, Г. Форда, Р. Яковлева та інших.

Відзначаючи основоположний внесок цих учених у вирішення теоретико-методологічних проблем зайнятості, слід зазначити, що численні питання методології і методики визначення ефективності використання робочої сили на мікро-, мезо- і макрорівнях досліджені недостатньо і не дістали належного висвітлення в науковій літературі.

**Мета роботи.** Дослідження проблемних питань під час визначення сутності, критеріїв та показників ефективності використання робочої сили на різних рівнях організації виробництва, окремих аспектів зайнятості, чіткого визначення та оптимізації професійно-кваліфікаційних параметрів робочої сили на ринку праці з урахуванням похибок на такий показник (окреме соціальне явище), як чисельність осіб без визначеного місця проживання серед працездатного населення країни.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Нагромадження структурних диспропорцій та загострення трансформаційної кризи на тлі низького рівня ефективності економічної стратегії держави вимагало й вимагає посилення уваги до цієї складової суспільних перетворень. Ігнорування окремих складових, які перешкоджають стабілізації ринкових процесів у країні, швидкому зниженню до мінімальних значень рівня інфляції, безробіття тощо призвело до надмірного акцентування уваги економічної політики на владних заходах із нехтуванням закономірностей дії самого механізму.

Складність дослідження окресленої проблеми зумовлюється тим, що вітчизняна наукова думка тільки нещодавно визнала в повному обсязі існування товарного характеру робочої сили, а закордонні дослідження присвячені в основному проблемам відтворення робочої сили в економічно розвинутих країнах і не враховують специфіки соціально-економічного розвитку України.

Існуючі механізми управління окремими галузями економіки та діючі інформаційні системи на підприємствах є недостатньо ефективними, оскільки не відповідають цілям інноваційного розвитку і прогресивним моделям стимулювання високопродуктивної праці. Актуальність вирішення, гострота і складність цих проблем зумовлюють необхідність обґрунтування нових методологічних і методичних підходів до вивчення ефективності використання робочої сили та вдосконалення механізму управління підвищенням ефективності праці в окремих галу-

зях економіки, які є окремими складними техніко-технологічними та організаційно-економічними комплексами.

Способи впливу держави на сферу підприємництва, інфраструктуру ринку, соціально-побутову сферу з метою ефективного використання робочої сили ставляться у відповідність до напрямків державної економічної політики країни і формують методи регулювання економічної активності населення в цілому. У соціально-економічній структурі працездатного населення відбулися зміни, що призвели до поділу населення країни на окремі чітко окреслені сегменти. Кожний сегмент як економічно активного, так і неактивного населення може бути охарактеризовано низкою таких ознак, що можуть бути використані як чинники їх градації:

- захищеність;
- гарантії зайнятості;
- економічна поведінка;
- конкурентоспроможність;
- соціальний статус;
- рівень доходів;
- стабільність одержання доходів.

Під впливом сукупності чинників впливу (структурні зміни в економіці, пріоритетність галузі, альтернативність форм власності, систем оподаткування, зміна життєвого рівня населення – чіткіше розширення тощо) посилилась чіткість обрисів конкретних сегментів ринку праці. І як наслідок – загострення проблеми безробіття, зубожіння певних соціальних верств, а також як окреме соціальне явище – особи без визначеного місця проживання (в тому числі й серед працездатного населення).

Слід зазначити, що в динаміці основних показників ринку праці України за 2001 – 2008 рр. не враховується похибка, яка виникла в ході процесу реформування системи прописки. Рішенням Конституційного Суду України від 14 листопада 2001 р. № 15-рп/2001р. (справа щодо прописки) визнано таким, що не відповідає Конституції України (є неконституційним) положення підпункту 1 пункту 4 Положення про паспортну службу органів внутрішніх справ, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 1994 р. № 700 щодо прописки (виписки), відповідно до якого паспортна служба органів внутрішніх справ використовувала як загальне правило дозвільний порядок вибору фізичною особою місця проживання.

Враховуючи зазначене вище Рішення, постановою Кабінету Міністрів України від 10.01.2002 № 13 внесено зміни до підпункту 1 пункту 4 Положення про паспортну службу органів внутрішніх справ, відповідно до яких паспортна служба організує в межах компетенції роботу, пов'язану з оформленням і видачею паспортних та інших документів, реєстрацією та обліком громадян за обраним ними місцем проживання, здійснює контроль за виконанням громадянами й посадовими особами правил паспортної системи. Але ж не всі громадяни країни використо-

вують надане їм конституційне право свободи пересування й вільного вибору місця проживання з дотриманням вимог реєстрації, що передбачає внесення до паспортного документа та адресно-довідкової картотеки, яку ведуть органи МВС, відомостей про місце проживання фізичної особи.

Слід зауважити, що можливість вільного вибору місця проживання без додаткових обмежень та реєстраційних вимог підвищить рівень економічної активності населення, надаючи гарантії соціальної захищеності, оскільки буде надано свободу особистості та створено відповідні умови для професійного та духовного розвитку.

У свою чергу, такі умови дозволять будувати адекватну та адаптовану до умов розпочатої реформи інституту прописки в країні систему пріоритетів економічної стратегії. При цьому буде створено можливість проводити дослідження ефективності використання робочої сили за окремими видами економічної діяльності з елімінацією вищезазначених похибок.

**Висновки та перспективи подальших наукових розробок у даному напрямі**

Реалізація економічної стратегії України в умовах переходу до інноваційної моделі соціально-економічного розвитку потребує методологічного обґрунтування щодо сутності, критеріїв та показників ефективності використання робочої сили на різних рівнях організації виробництва; окремих аспектів зайнятості, таких, як гідна праця, продуктивна праця, ефективна праця, рентабельна праця; чіткого визначення та оптимізації професійно-кваліфікаційних параметрів робочої сили на ринку праці з урахуванням похибок на такий показник (окреме соціальне явище), як чисельність осіб без визначеного місця проживання серед працездатного населення країни.

1. Гуць М. Оцінка стану ринку праці в умовах реформування економіки / М. Гуць // Україна : аспекти праці. – 2005. – № 2.
2. Економічний і соціальний розвиток України в ХХІ столітті : національна ідентичність та тенденції глобалізації : збірник тез доповідей з-ї міжнародної науково-практичної конференції молодих учених, (Тернопіль, 23–24 лютого 2006 р.).
3. Златопольський О. Ф. До проблеми відтворення робочої сили в Україні / О. Ф. Златопольський // Демографія, економіка праці та соціальна політика. Ч.1. – 1998. – Вип. 5. – С. 158–160.
4. Кейнс Дж. М. Общая теория занятости, процента и денег / Дж. М. Кейнс / пер. с англ. – М. : [б. и.], 1978.
5. Савушкин Н. Н. Модель интеграции разных уровней профессионального образования / Н. Н. Савушкин // Профессиональное образование. – 2004. – № 1. – С. 9.
6. Чернівецька Л. Ринок праці та заробітної плати / Л. Чернівецька // Економіка. Фінанси. Право. – 2001. – № 10.

## DETERMINATION OF EFFICIENCY OF THE USE OF LABOUR FORCE BY USING INDEX OF QUANTITY OF PERSONS WITHOUT CERTAIN RESIDENCE AMONG WORKABLE POPULATION OF COUNTRY

**I.V. Perevozova**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019,  
tel. +380 (3422) 4 01 37, e-mail: [Perevozova@ukr.net](mailto:Perevozova@ukr.net)*

*In the article is conducted the review of such problem questions as determination of essence, criteria and index of efficiency of the use of labour force at different levels production processes; separate aspects of employment, optimization of qualifying parameters of labour force at the market of labour taking into account errors on such index (separate social phenomenon), as a quantity of persons without a certain residence among the working population of country.*

*Key words: production potential, labour, registration, labour force, persons without the certain place of residence, process.*

## Рецензії, інформація

УДК 517.9

### ПРО ДОРОБОК МИКОЛИ КУРПЕЛЯ

**В.М. Мойсишин**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
тел. +380 (3422) 4 21 23, e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)*

*Подано біографічну довідку та короткий огляд наукових праць талановитого українського математика Миколи Курпеля (1935–1979). Проаналізовано доробок ученого, присвячений розробці двосторонніх наближених методів розв'язування операторних рівнянь та нерівностей.*

*Ключові слова: операторні рівняння, операторні нерівності, проєкційно-ітеративні методи, двосторонні методи Курпеля, похибки наближених розв'язків.*



*Курпель  
Микола Степанович  
(19.04.1935–6.12.1979)*

тематика АН УРСР.

В аспірантурі Миколі Курпелю пощастило з науковим керівником, яким став видатний український математик і механік Юрій Соколов. Принциповий, справедливий, вимогливий, він був взірцем для молодого

У 60–70-х роках минулого століття серед українських математиків – вихідців із Галичини – помітною, колоритною постаттю був Микола Курпель. Хоча біографія вченого не багата подіями, проте позначена напруженими пошуками й глибиною одержаних результатів поряд із невдачами і негараздами.

Народився Микола Степанович Курпель 19 квітня 1935 року в селі Хом'яків (тепер Березівка) на Прикарпатті. 1957 року з відзнакою закінчив Івано-Франківський педагогічний інститут. Після цього були три роки вчителювання в середній школі містечка Букачівці, аспірантура (1960–1963 рр.) та наукова робота у відділі диференціальних рівнянь Інституту ма-

хлопця. Ці риси характеру вчителя передалися учневі і, помножені на велику працездатність останнього, дали вагомий результат. 1963 року молодий науковець успішно захищає кандидатську дисертацію “Про деякі наближені методи розв'язування нелінійних операторних рівнянь” і залишається в інституті на посаді молодшого, а згодом (з 1965 р.) старшого наукового співробітника.

Талановитий учений пише статті, консультує молодих науковців, готує докторську дисертацію. Колеги відзначають його виняткову ерудованість і доброзичливість. Маючи феноменальну пам'ять, М. Курпель навіть у кафе за чаркою міг накидати співбесіднику план наукової роботи, вказати книгу, журнал, навіть сторінки, на яких можна знайти той чи інший приклад, те чи інше доведення теореми, застерегти про марність пошуків в якомусь із вибраних напрямків. Своїми порадами, оцінками, підтримкою він допоміг утвердитись у науковому світі цілій плеяді молодих математиків, серед яких Федір Мигович, Григорій Шпортюк, Костянтин Цідило, Валентина Гречко, Богдан Шувар, Віталій Охрончук, Тетяна Курченко, Іван Майборода, Михайло Копач, Роман Собкович, Петро Злепко...

Доробок Миколи Курпеля порівняно невеликий – 57 наукових праць, серед яких три монографії: “Проєкційно-ітеративні методи розв'язування операторних рівнянь” (1968), “Двосторонні методи розв'язування систем рівнянь” (1975, співавтор Т.С. Курченко), “Двосторонні операторні нерівності та їх застосування” (1980, співавтор Б.А. Шувар).

У першій зі своїх книг [1] автор досліджує загальні наближені методи розв'язування лінійних та нелінійних операторних рівнянь. Він будує загальну схему проєкційно-ітеративних методів для операторних рівнянь в узагальнених метричних і структурно-нормованих просторах, в яких ролі відстані і норми беруть елементи деяких напівупорядкованих просторів.

У першому розділі монографії він будує узагальнений ітеративний метод розв'язування операторних рівнянь, що містить, як частинні, метод Зейделя, основний та модифікований методи Ньютона-Канторовича, різноманітні ітеративні методи вищих порядків.

Дванадцять робіт М.С. Курпеля присвячено обґрунтуванню методу Ю.Д. Соколова [2] для випадку нелінійних операторних рівнянь. У них встановлено низку достатніх ознак збіжності методу та відповідних їм оцінок похибки, побудовано й досліджено алгоритми, які є узагальненням методу осереднення функціональних поправок Ю.Д. Соколова. Інтегрований виклад цієї частини свого доробку вчений також помістив у першому розділі згаданої книги.

Другий розділ монографії присвячено глибоким дослідженням проєкційно-ітеративних методів розв'язку операторних рівнянь у банахових просторах, а третій – їх застосуванням до систем алгебраїчних і трансцендентних рівнянь, а також до інтегральних, диференціальних рівнянь та їх систем.

Ця книга лягла в основу дисертації “Про деякі загальні наближені методи розв’язування лінійних і нелінійних операторних рівнянь та їх застосування”, поданої на здобуття наукового ступеня доктора фізико-математичних наук за спеціальністю диференціальні та інтегральні рівняння. Роботу було успішно захищено 1971 року, проте Вища атестаційна комісія СРСР не поспішала з присвоєнням здобувачеві чергового наукового ступеня. Що тут було причиною – протиріччя між академіками Миколою Боголюбовим та Андрієм Тихоновим, які відбивались на їх підопічних, підпис М. Курпеля під листом на захист правозахисника Леоніда Плюща чи цитовані ним патріотичні вірші українських поетів, які не сподобались співробітникам КДБ, – зараз сказати важко. Не викликає сумнівів лише наукова цінність результатів, яких би вистачило й на декілька докторських дисертацій.

Друзі порадили Миколі Степановичу забрати роботу з ВАКУ, щоб мати можливість після доопрацювання одержані результати подати до захисту ще раз. Порада виявилася невчасною, бо через кілька тижнів надійшов позитивний відгук на роботу нобелівського лауреата академіка Л.В. Канторовича, а у США переклали й видали монографію вченого. Це, напевно, посприяло б позитивному вирішенню питання.

Через чотири роки після захисту дисертації вийшла друга монографія вченого [3], написана у співавторстві з Тетяною Курченко. Тут розглядались ітеративні та проєкційно-ітеративні методи побудови двосторонніх наближень до розв’язків скінченних і нескінченних систем алгебраїчних та трансцендентних рівнянь, наводились ознаки збіжності та апіорні оцінки похибки наближених розв’язків.

У червні 1979 року Микола Курпель здає до друку свою останню (третю) книгу [4], написану у співавторстві з Б.А. Шуваром, що вийшла уже посмертно – 1980 року. У роботі розглядались двосторонні операторні нерівності в напівупорядкованих просторах і встановлювались за допомогою них нижні та верхні оцінки відповідних класів рівнянь; вивчались, здебільшого, нерівності та рівняння, в яких оператори не були монотонними, але мали так звану змішану монотонність, тобто подавались функціями двох змінних, які не спадають за однією зі змінних і не зростають за іншою.

У згаданій монографії подано результати застосування двосторонніх операторних нерівностей до розв’язків операторних рівнянь у напівупорядкованих загальних, структурно-нормованих і банахових просторах. Вивчались загальні процеси послідовних наближень та їх частинні випадки – звичайні ітеративні процеси, різноманітні узагальнення й модифікації методів типу С.О. Чаплигіна та М. Піконе, а також їх проєкційно-ітеративні аналоги.

Так, М.С. Курпелю вдалося запропонувати для деяких операторних рівнянь двосторонній метод (метод М.С. Курпеля), який на відміну від відомого методу С.О. Чаплигіна, не потребував для свого обґрунтування монотонності оператора  $F$  та знакосталості його другої похідної за змінною  $x$  у рівняннях вигляду

$$x = F(x)$$

і водночас зберігав швидкість збіжності, характерну для методу Чаплигіна.

Два останні розділи книги автори присвятили застосуванню результатів попередніх розділів до окремих класів операторних нерівностей. Досліджувались інтегральні, звичайні диференціальні, інтегродиференціальні нерівності, системи алгебраїчних і трансцендентних нерівностей, а також їх застосування для побудови й обґрунтування двосторонніх процесів послідовних наближень.



*Івано-франківські математики на могилі М.С. Курпеля  
(с. Березівка Тисменицького району Івано-Франківської області,  
22.05.2008 р.)*

До сказаного залишається додати, що, незважаючи на потужний розвиток сучасної обчислювальної техніки, який знімає багато питань щодо економності та зручності використовуваних методів оцінювання похибок наближень до шуканих розв’язків операторних рівнянь, науковий доробок Миколи Курпеля не втратив своєї актуальності й сьогодні. Ученого пам’ятають, а його праці вивчають нинішні математики. Свідченням цього є монографія Богдана Шувара, Михайла Копача, Сергія Ментинського та Анатолія Обшти “Двосторонні наближені методи” [5], видана Центром інформаційних технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника й присвячена світлій пам’яті Миколи Степановича. У п’ятому розділі цієї книги йдеться про двосторонні методи Курпеля, їх модифікації та аналоги, а в шостому – про квазікурпелєві двосторонні методи.

Автор висловлює вдячність кандидатам фіз.-мат. наук, доцентам Степану Гульці та Роману Заторському за обговорення та доповнення матеріалів статті.

1. Курпель Н. С. Проекционно-итеративные методы решения операторных уравнений / Н. С. Курпель. – К. : Наукова думка, 1968. – 243 с.
2. Соколов Ю. Д. Метод осреднения функциональных поправок / Ю. Д. Соколов. – К. : Наукова думка, 1967. – 336 с.
3. Курпель Н. С. Двусторонние методы решения систем уравнений / Н. С. Курпель, Т. С. Курченко. – К. : Наукова думка, 1975. – 184 с.
4. Курпель Н. С. Двусторонние операторные неравенства и их применения / Н. С. Курпель, Б. А. Шувар. – К. : Наукова думка, 1980. – 267 с.
5. Двусторонні наближені методи / Б. А. Шувар, М. І. Копач, С. М. Ментинський, А. Ф. Обшта. – Івано-Франківськ : ВДВ ЦІТ ПНУ імені Василя Стефаника, 2007. – 516 с.

#### ABOUT RESERVE OF NICK COURPEL'

**V.M. Moisyshyn**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019,  
tel. +380 (3422) 4 21 23, e-mail: [math@nung.edu.ua](mailto:math@nung.edu.ua)*

*Biographic reference and short review of scientific labours of the talented Ukrainian mathematician Nick Courpel' is given in the article (1935–1979). Reserve of scientist is analysed, that is devoted to development of bilateral close methods of untiing of operator equalizations and inequalities.*

**Key words:** *operator equalizations, operator inequalities, proectionsno-iterativni methods, bilateral methods Courpel', errors of close decisions.*

УДК 622.323

#### МОЇ КНИГИ

**Р.С. Яремійчук**

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу,  
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15,  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*Представлено авторську розповідь про роботу над монографіями, присвяченими нафтогазовій справі, підручниками, які ввібрали досвід світової нафтогазової науки, словниками, що утверджують українську технічну термінологію.*

**Ключові слова:** *монографія, підручник, словник, нафтогазова справа, технічна термінологія.*

Мій бібліографічний перелік містить 52 назви книг, шістнадцять із них вийшли до 1994 року російською мовою в типографіях Москви, Ленінграда, Києва, Львова. Після цього опубліковано 26 книг українською мовою та 10 російською. Тобто рівно половину книг написано рідною мовою. Сюди не ввійшли конспекти лекцій, методичні розробки, нема тут і книги “Друковане слово Прикарпаття”, хоча і передмова, і її укладання здійснені мною.

У радянські часи видати будь-яку професійну книгу українською мовою для нафтовиків-газовиків було майже неможливо, тому мої монографії були викладені російською. Написані вони у співавторстві з моїми учнями (Л.А. Райхертом, Г.Г. Семаком або односторонцями Ю.Д. Качмаром). Ці книги не втратили своєї актуальності і нині. Наприклад, у французькому виданні “Механіка гірських порід” (Париж, 1991 р.) перекладено один розділ монографії “Усталостная прочность стенок скважин” (Москва, 1972); фотографії стінок свердловин з книги “Обеспечение надежности и качество стволов глубоких скважин” (у співавторстві з Г.Г. Семаком) (Москва, 1982) передруковувалися у США та Росії, а механізм утворення уступів у стінках свердловин повністю підтвердився, і ці дані лягли в основу створення ексцентричних центраторів-калібраторів стовбура свердловини (С.Я. Саврей). Узагальнення техніки і технології буріння стовбурів свердловин великого діаметра (Москва, 1876; співавтор Л.А. Райхерт) багато років використовувалися як інженерами-практиками, так і студентами під час виконання дипломних проектів із буріння свердловин.

Коли рукопис книги (у співавторстві з Г.Г. Семаком) потрапив на рецензування до М.І. Ворожбитова, мого одногрупника зі Львова, то після ознайомлення з ним Марат зателефонував мені й сказав, що Семак є видатним дослідником.

Щоправда, видати книги у радянські часи було значно легше. Треба було лише підготувати рукопис, надіслати його до видавництва (як правило “Недра” у Москві), і після отримання двох чи трьох рецензій книга надходила до друку, а автор зобов’язувався лише допомогти з реалізаці-

сю через мережу магазинів “Технічна книга” або через виробничі організації.

Цікавий казус трапився із книгою “Усталостная прочность стенок скважин”. Магазины замовили лише 800, а видавництво випустило 1,5 тисячі примірників. Тож я написав листа своєму товаришеві Б.О. Нікітину, що працював керівником бурового тресту на Сахаліні, з проханням допомогти реалізувати ці книги. Борис Нікітін замовив аж 600 примірників, а коли виявилось, що книга швидко розійшлася і її уже неможливо було придбати в магазинах, я знову написав листа Нікітину із проханням вернути видавництву якусь частину цих книг, на що Борис, сміючись, сказав, що цього він зробити не зможе, бо розпорядився видати ці книги бурильникам, помічникам бурильників, дизелістам, а вони викинули, не читаючи, ці книги в Охотське море.

Часу для написання книг завжди бракувало. Так, було видано книгу “Бурение сверхглубокой скважины № 1 Шевченко”. Авторів цієї книги було чимало, а написали її ми із В.Ф. Жданковим. Нещодавно я взяв до рук цю книгу (що була надрукована в Києві видавництвом “Техніка” 1975 року) і прийшов до висновку, що в ній зафіксовано великий досвід буріння першої в СРСР надглибокої свердловини, яку було пробурено до 7522 метрів.

Час робить своє: без цієї книги тепер годі собі уявити, які перешкоди довелося долати буровій бригаді Ореста Жарского, який з німецькою точністю або як сучасний супервайзер дотримувався проектних рішень, нормативів, правил, і це дозволило йому без аварії, без виходу з ладу бурового обладнання спорудити цю свердловину.

Щодо книги, написаної разом із Семаком, то запам’ятався такий епізод. У липні я отримав у Москві після редагування рукопис із багатьма правками редакторки Людмили Маклакової. Щоб не зірвати графік видання книги, редакція попросила переглянути рукопис і повернути до Москви через десять днів. Уранці наступного дня я вилітав літаком із Москви до Івано-Франківська, проте з якихось причин рейс не відправляли, переносючи виліт кожних дві години. Я сидів в аеропорту Внуково та вчитував, сторінку за сторінкою, вносячи ті чи інші виправлення або погоджуючись із редактором. Час минав швидко, вже і день скінчився, настав вечір. До одинадцятої ночі я рукопис вчитав. Хоча вже оголосили посадку на літак, але я цим рейсом не повернувся додому – я здав авіаквиток, пересидів до ранку в аеропорту, і, на превелике здивування редакторки, вранці віддав їй вчитаний рукопис.

Я і до сьогодні вважаю, що це одна з найважливіших книг, до написання й видання якої я був причетний.

1982 року вийшла наша з Ю. Качмаром монографія “Вскрытие продуктивных горизонтов и освоение скважин” (Львів). Ця книга також є для мене дуже дорогою, бо в ній – велика частина моєї докторської дисертації. Вона також швидко розійшлася через книжкові магазини. У середині 90-х років минулого століття я був на прийомі в Генерального директора “Росбургазу” Вехірева, брата Рема Вехірева, тодішнього керівника “Газпрому”. Це була моя перша зустріч із цим відомим у Росії буровиком. На моє здивування, він сказав, що знає про мене і навіть ко-

ристується моїми книгами. Він підійшов до книжкової полиці й показав мені ксероксну копію нашої з Юрком Качмаром книги, бо дістати оригінал книги він з якихось причин не зміг.

Усі книги старіють, проте книги, про які я тут пишу, практично не втратили своєї актуальності й сьогодні.

Цікавою була підготовка рукопису книги “Бурение скважин большого диаметра”.

Після захисту Л. Райхером дисертації я одного разу запропонував Людвігу сісти за рукопис книги. Я жив у Франківську, а він – у Долині, то зібратись із ним до купи й працювати по декілька годин над рукописом нам не виходило. Моя пропозиція звелась до того, що нам слід узяти двотижневу відпустку, поїхати до Яремча, і там, без перешкод, працювати над книгою. На дворі – сніжна, досить сувора зима. Ми вставали о шостій ранку, а вже о пів на восьму сиділи за столом, працюючи над нашими чернетками з ножицями та клеєм (метод “рекле” – “режем – клеєм”). Ми обговорювали текст кожного книжного параграфу, потім монтували текст. І ця робота продовжувалась до 14<sup>00</sup> години, без їжі і, здається, навіть без чаю.

Після другої години пополудні ми йшли обідати, випивали деколи пиво, а інколи – чарку-дві горілки, бродили стежками до вечора, плануючи роботу на наступний день, потім йшли танцювати з дівчатами з туристичних груп. Але о 23-й ми вже спали. За 12 днів рукопис був готовий. Ми повернулись додому, дали машиністам друкувати рукопис і, здається, через місяць відвезли його до Москви.

Я завжди, у будь-якій роботі, дотримувався принципу: взявся за роботу – не відкладай її на завтра, бо якщо відкладеш до “грецьких календ”, то її ніколи не завершиш.

Це лише деякі примітки про працю над книгами. Та була й основна робота, що вимагала часу, відволікала від творчої. Якби тоді ж я не привчив себе працювати на межі своїх можливостей, то, напевно, цих книг ніколи й не написав би.

У 80-ті роки були видатні чотири книги-брошури, де описувались нові технології освоєння свердловин із використанням струминних апаратів. Ніщо з цих книг не застаріло. І, публікуючи вже після 2000 року нові книги – довідники чи підручники – я передрукував ці матеріали. Вони є немов інструкціями до використання цих технологій, що і до нині з успіхом застосовуються на практиці в Україні, Росії і в інших країнах світу. До того, я вважаю, що найближчими роками застосування цих технологій буде ще ширшим. 2007 року Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАНУ включив мене за ці роботи до авторського колективу на здобуття Державної премії в галузі науки і техніки. І ми цю премію здобули.

А рік перед тим Російська академія природничих наук нагородила мене срібною медаллю ім. В. Вернадського за ці ж роботи з такою мотивацією: “За выдающиеся научные достижения и большой вклад в развитие России”.

Я намагаюся перечислити книги, що вийшли у світ після 1992 року, і часто збиваюся з ліку. Щорічно випускалося більше двох повно-



масштабних книг. Як це вдалося зробити – я сьогодні не збагну. Усе ж таки, мабуть тому, що мені вдавалося залучати до роботи різних авторів із Франківська, Києва, Москви, Краснодару і навіть із США. Крім того, я одночасно започаткував декілька книжкових проєктів, і в мене на столі часом лежали фрагменти декількох книг. Я безперервно шукав спонсорів, які б оплатили їх видання. Бог мені дарував і помічників, які набирали комп'ютерний текст моїх книг, повіривши в те, що мені вдасться оплатити їхню працю.

Про написання та видання кожної книги зокрема можна написати ессе. Ця робота закарбувалася в пам'яті.

Практично перший український підручник (чи навчальний посібник) з грифом Міністерства освіти і науки України “Освоєння та дослідження свердловин” вийшов друком до літа 1994 року. Ідея його написання належала моєму колишньому аспірантові – доценту В.Р. Возному. Це збіглося, можливо, із найтяжчим та найскладнішим періодом моєї роботи в Інституті нафти і газу – факультет підвищення кваліфікації змінив за наказом ректора Б.Г. Тарасова свою назву, а через зміни мені вже місця декана не знайшлося. Деканом призначили доцента В.П. Василечка. Кафедра при цьому ж факультеті була розформована. На випускних кафедрах “буріння свердловин” та “розробка нафтових та газових родовищ” місця мені теж не знайшлося.

Тож вихід було знайдено – мені дають на рік творчу відпустку для написання рукопису цього підручника. Помічників у мене не залишилося. Грошей на видання книги також не було, як не було й робочого приміщення. Навіть мою велику технічну нафтогазову бібліотеку, яку я збирав упродовж тридцяти років, під надуманим приводом розлитої ртуті в корпусі по вулиці Лепкого спочатку закрили, забивши двері мого кабінету великими цвяхами, а пізніше хтось із моїх “друзів” розпорядився здати всі книги (а їх було більше 800) на макулатуру. За цими книгами я шкодую й донині, бо їх збирав ще зі студентських часів, до того ж там був двотомник монографії М.С. Тимофєєва “Нефть и море” з подарунковим надписом та побажаннями, щоб я долучився до освоєння нафтогазових ресурсів морів та океанів. М.С. Тимофєєв мов би наперед визначив мою долю, яка привела мене до створення кафедри, а пізніше – факультету морських нафтогазових технологій.

Ми з Василем Возним працювали над рукописом майже рік і завершили його під Новий 1994-й. 31 грудня ми покинули свій інститут о 23-й годині ночі, щоб 1 січня 1994 року відвезти рукопис до Львова. Гроші на видання цієї книги дав Борис Богуславський, з яким випадково звела мене доля теж 1993 року. Ця книга вже навесні 1994 року розійшлася вмиль. Ми розсилали своїм коштом окремі примірники в Росію (Москву, Нижньовартовськ, Сургут) та по Україні, роздавали викладачам та студентам нашого інституту.

Я не зупинятимусь на всіх написаних та виданих книгах, але про деякі все ж варто згадати. Так, “Довідник з нафтогазової справи” під загальною редакцією В.С. Бойка, Р.М. Кондрата і моєю писався тридцятьма сімома спеціалістами. Гроші на його видання ми випрошували в Комітеті з нафтової та газової промисловості, в “Укрнафті” – до на-

стання гіперінфляції наприкінці 1995 року. Ця потужна книга, якою й досі користуються студенти, викладачі та інженери, була теж видана в нечувано короткі терміни. І – головне – видана якісно, доброю українською мовою.

Потім “пішов” “Англо-український нафтогазовий словник”, який і до нині, на мій погляд, є інтегральним у широкому нафтогазовому полі. Ця робота виконувалася мною і Л.М. Середницьким (Київ). Робота мала “човниковий характер”: я надсилав йому свої напрацювання, а він доповнював своїми. І так, крок за кроком, буква за буквою, з'явився цей рукопис. Оплатити його видавництво обіцяв “Укргазпром”, проте отримати від них кошти виявилось дуже важко. Якось на конференції Української нафтогазової академії в Полтаві я познайомився із президентом ВР Ekplagation Джимом Брауном, який і перерахував видавництву в Києві частину необхідних коштів.

Цей словник (1998 р.), “Довідник з нафтогазової справи” (1996 р.), три підручники з морських нафтогазових споруд, підручник “Освоєння та дослідження свердловин”, а також навчальний посібник 1996 року “Освоєння свердловин” (Р.С. Яремійчук, Ю.Д. Качмар) “зламали кригу” – українська технічна нафтогазова термінологія утвердилася. У нашому університеті почали видавати одну за одною книги-підручники, навчальні посібники, монографії. Я гадаю, що це той випадок, коли в написанні та видавництві книги почав діяти чинник змагання та престижу, хоча грошей на цій справі заробити неможливо.

В одній із приватних розмов із професором М.А. Мислюком я запропонував взятися за роботу над довідником “Буріння свердловин”. Спочатку він відмовився, переконаючи, що за це не платять, але десь через півроку він повернувся до нашої розмови й запропонував долучити до числа авторів його колишнього аспіранта І.Й. Рибчича. Останній і профінансував роботу над “Довідником”. З 2002 до 2006 року вийшли друком чотири томи “Довідника”. Залишилося видати п'ятий, проте через деякі наші розбіжності з професором М.А. Мислюком він і досі не вийшов. За участь у роботі над чотирма томами “Довідника” я отримав 3920 доларів.

У другій половині 90-х років мені вдалося підготувати у співавторстві рукопис “Англо-русской/русско-английской энциклопедии нефтегазовых технологий” та видати його в США (Даллас). Посередник заплатив за цю роботу 1200 доларів США, з яких 800 я віддав Роману Філюсу – геологу зі Львова, який чи не найбільше долучився до перекладацької роботи над цією книгою.

Восьмого березня ми через інтернет відіслали рукопис у Даллас, а в травні ця книга вийшла з друку. На мою адресу видавництво “Альбін Будс” надіслало до Франківська три книги, за які митниця виставила рахунок чи не у триста доларів США. Спочатку я обурився й відмовився їх брати, навіть написав заяву, щоб книги повернули видавництву. Але через день я почав шукати виходу: зателефонував до Головного управління митниці в Києві, просив митників змилюститися. Від мене прямо вимагали хабара. Коли справа дійшла до керівника Івано-Франківської митниці, то він, глянувши на мої титули, здивовано спи-

тав: “Як це у Вас немає грошей?”. Я здвигнув плечима та сказав, що вчені звання та багатство – різні речі.

Одну книгу я віддав у нашу інститутську бібліотеку, другу – вислав у Краснодар А.І. Булатову, а третю залишив собі. Потім “пішли” інші книги під моєю редакцією за сприяння Булатова. У видавництві “Недра” (Москва) вийшов довідник “Освоение скважин”, потім, за сприяння С.І. Іванова, – двотомник “Заканчивание скважин”. У Краснодарі в авторській співдружності з Булатовим за моєї участі вийшло друком сім книг: чотири – з гідророзриву пластів, дві – з хімічного впливу на привибійну зону пласта, одна – про фізичний вплив на цю зону.

Із розривом в один місяць (грудень 2005 – січень 2006) у Львові вийшов із друку двотомник “Інтенсифікація припливу вуглеводнів до свердловини” (Д. Качмар, В. Світлицький, Б. Синюк і я).

Уже в грудні 2007 року опубліковано довідник “Освоєння свердловин” у співавторстві з Я.С. Яремійчуком. Справді, я вже й не можу збагнути, як це все виходило в мене в часі.

Десь 1999 року я прийшов на прийом до проректора з наукової роботи В.І. Векерика (я дарував йому всі свої книги, тож він знав, скільки їх я написав) і попросив, щоб мені зменшили річне навчальне навантаження хоч би на 300 годин (з 1000 до 700). Він довго мовчав, а тоді сказав: “А хто Вас примушує працювати над книгами?”. А й справді, мене ніхто ніколи до цього не примушував. Відтак Векерик додав: “Ви любите писати книги, то й пишете їх”.

Тоді це зранило мене до глибини душі, бо книги навіть дуже потрібні і студентам, і викладачам, і дипломованим спеціалістам. Я ж вважав, що це мій обов’язок – передати свої знання молодому поколінню, а отримані відповіді свідчили, що керівництву університету байдуже і до моєї праці, і до потреб спеціалістів. Бюрократ робить лише те, що йому вкаже “Начальник”. А мені на мою працю ніхто не вказував.

Я просив зробити презентацію моїх книг хоча б в університеті. І цього домогтися не зміг.

Наші спеціальності наприкінці 90-х років звели до групи “Гірництво”, а нашій кафедрі включили в навчальне навантаження дисципліну “Основи гірничого виробництва”. Так довелося взятись за роботу над підручником із такою ж назвою. Ми з Василем Возним написали цей рукопис, а через видавництво “Українська книга” (Київ) вдалося його видати із грифом Міністерства освіти та науки. Уже не пам’ятаю, хто ж оплатив це видання. Воно вийшло накладом усього 400 книг і швидко розійшлося по бібліотеках, серед викладачів та студентів. Через чотири роки ми перевидали цей підручник через інше видавництво і теж безкоштовно передали майже весь тираж бібліотеці нашого університету. Тепер у Сімферополі я тримаю 60 примірників цих підручників та роздаю їх на початку семестру студентам денної та заочної форм навчання, так, як це робить бібліотека.

З ініціативи Сергія Смоленського ми передали перекладений рукопис цих підручників видавництву в Ростові (Росія), і ця книга мала вийти з друку десь у середині 2008 року.

На черзі видання двох великих словників – англо-українського/українсько-англійського та французько-українського / українсько-французького нафтогазових словників. Один повинен вийти у Львові (видавництво “Центр Європи”), а інший – у Києві (видавництво “Інтерпрес Лтд.”). Базою цих обох словників є виданий “Українською Книгою” 1998 року “Англо-український нафтогазовий словник”. Щоправда, авторський колектив розширено, бо одному виконати цю роботу було б неможливо.

Як це не видається дивним, але кошти для видання першого із цих словників надійшли з Росії. Проте це довга й повчальна історія, яку колись розкажу або опишу більш детально. У будь-якому випадку англо-українські та французько-українські професійні словники є і будуть нашим внеском в українську культуру.

Сьогодні вже ніхто не зможе сказати, що Україна не має своєї фахової технічної термінології в нафтогазовій справі. Ймовірно, я сам писати книг більше не буду. Бо як писав мені із Сан-Франциско професор В.П. Черняк: “Романе! Всіх книг не напишеш”, і не треба цього робити. Підрастає нове покоління українців, для яких було б дивним не мати своєї технічної термінології. 2000 року з моєї ініціативи Івано-Франківське відділення Наукового Товариства ім. Шевченка видало каталог книг під назвою “Друковане слово Прикарпаття” за період 1990 – 2000 рр. У цьому каталозі майже півтори тисячі назв книг, написаних авторами, що постійно проживають на Івано-Франківщині. Це вразило і всіх нас, бо уявити собі щось подібне в радянські часи було б неможливо.

У передмові до цієї книги я написав таке:

Перше десятиліття нашої держави відзначається своїми здобутками та втратами, проте кожен прожитий нами рік указує на те, що існування власної держави уможливило зробити те, чого годі було сподіватись у минулі бездержавні часи.

З ініціативи Івано-Франківського осередку Наукового товариства ім. Шевченка та за участі Івано-Франківської обласної наукової бібліотеки імені І.Франка підготовлено покажчик книг, написаних авторами, що постійно проживають і працюють на Прикарпатті. Приступаючи до цієї роботи, важко було б уявити собі, що тут за останні 10 років видано українською мовою 1300 книг. Це в десятки разів перевищує аналогічну кількість видань за попередні десятиліття. Йдеться про книги філософського, історичного, політологічного, економічного, релігієзнавчого змісту, книги з фундаментальних, природничих та прикладних наук: фізики, математики, хімії, медицини, педагогіки, різних галузей народного господарства. Вчені, педагоги плідно працюють над створенням нових підручників, довідників, багатомовних словників, що є надзвичайно важливим, адже нові підручники нарешті друкуються українською мовою, несуть читачеві найновішу інформацію. Сьогодні оновлення знань відбувається так стрімко, що, наприклад, у США з університетських бібліотек безжально вилучають навчальну літературу дворічної давності. Перехід на модульну систему освіти, скорочення аудиторного навантаження на викладача та студента просто неможливі без постійного оновлення навчальної літератури.

Представники українського духовенства різних конфесій, які опікуються багатьма віруючими в нашій області, теж видали значну кількість книг, що знаходили свого вдячного читача.

Спостерігається великий творчий злет письменників, поетів обласної організації Національної спілки письменників України.

За браком місця в каталозі наводяться лише назви книг, без анотацій.

Залежно від можливостей авторів та видавців книги видаються великими або малими тиражами в друкарнях Івано-Франківська, Києва, Львова, Коломиї, Снятина, Надвірної, Болехова тощо на бюджетні, спонсорські кошти та власні кошти авторів.

Особливої подяки заслуговує допомога спонсорів – важливих учасників цього видавничого процесу. Їхні імена теж увійдуть до української історії, бо без їхньої допомоги більшість книг нинішнього десятиліття просто не була б опублікована. Сьогодні видати українську книгу дуже складно. Наша рідна держава ніяк не спроможеться прийняти закони, які б робили українську книгу конкурентоспроможною (хоча б порівняно з російською), а податкова політика України сьогодні руйнує українське книговидавництво.

Ліна Костенко у своїй відомій лекції для студентів Києво-Могилянської академії справедливо сказала, що про націю і народ у світі судять з їхнього внеску у світову науку і культуру.

Книги, які ми презентуємо в бібліографічному покажчику, відображають працю сучасної української інтелігенції, спрямовану на подолання давньої та нової русифікації України. Ці книги є нашим внеском у духовну скарбницю держави.

Ми припускаємо, що не всі книги прикарпатських авторів увійшли до цього покажчика. Це сталося насамперед через те, що не всі видавництва і друкарні різних форм власності виконують Постанову Кабінету Міністрів України від 06.07.1992 р. за № 376 “Про впорядкування розсилки контрольних примірників творів друку” та розпорядження Івано-Франківської обласної державної адміністрації від 23.02.1996 р. за № 139 “Про забезпечення обласної універсальної наукової бібліотеки ім. І.Франка обов’язковим контрольним примірником творів друку”.

Минуться сьогоднішні негаразди, виросте нове, вільне від колоніального минулого, покоління громадян України, яке з вдячністю та подивом буде згадувати творчу працю нинішньої української інтелігенції.

Ще однією книгою, виданою в Польщі та Києві я пишаюсь. Це “Історія видобування нафти і газу на Прикарпатті” (2002). Український розділ про буріння свердловин я писав особисто, хоча там указано ще декілька прізвищ інженерів, що подавали мені окремі фрагменти до цього розділу книги. Для мене важливим є те, що ми згадали інженерів, які працювали в Бориславі, Долині, Надвірній, працювали по всьому Прикарпатті, вишукуючи поклади нафти і газу, втрачаючи здоров’я, іноді життя, працюючи чесно, відважно, не гнучи шию перед тогочасними вельможами. Ось коротка оповідь про написані мною після 1991 року книги. Їх назбиралося аж тридцять п’ять. Я знаю, що ні один професор в Україні не долучився до написання та видавництва такої кількості книг.

Чому це мені вдалося? Можливо, одним із дуже дієвих стимулів була моя приватна розмова з моїм товаришем по “Львівській політехніці”

Ігорем Еліяшевським у далеких 1985 чи 1986 роках. Зустрілися з ним влітку в Криму, в Євпаторії. Я з дружиною відпочивав у пансіонаті “Алмазний”, а він лікувався після важкої автомобільної аварії в Саках. Саме тоді він показав мені свій підручник про буріння свердловин, виданий угорською мовою. Готувався, здається, переклад цієї книги й на китайську мову.

Первісна книга була видана в Москві російською мовою. Так ось тоді Ігор мені сказав, що якби йому дозволили, то він би видав цю книгу українською мовою за свій кошт. Якби дозволили. Але хто міг тоді навіть мріяти про видання професійних книг не на “общепонятном”. І коли така можливість з’явилась, я взявся за рукописи книг. А ще було усвідомлення того, що в наш час відбувається швидко оновлення техніки і технології. То ж технічні книги, особливо підручники, мають швидко оновлюватись. Адже не дарма з бібліотек американських університетів безжалісно викидають підручники чи навчальні посібники, видані більше двох років тому. Студент мусить отримувати сучасні знання, а в нас на багатьох кафедрах заняття проводять за підручниками тридцятирічної давності, виданими в Москві і вже давно застарілими. Професор мусить працювати над рукописами нових підручників, мусить стежити за новими технологіями, мусить навчати цьому і своїх студентів. Я спостерігаю за видавничою роботою своїх колег по професії з кафедри “буріння нафтових і газових свердловин”. За 17 років ця кафедра спромоглася видати аж три підручники. Лише професор М.А. Мислюк за моєї участі підготував чотири томи довідника “Буріння свердловин” (2002 – 2006 роки), а на цій кафедрі працює 32 викладачі! Тож можливості кафедри великі, а книжкової продукції зовсім мало. Хоча викладачі кафедри отримали за цей час чимало почесних звань і нагород, проте вважають, що написання книг є другорядним – таким собі “hobby” дивакуватих професорів.

Наш заробіток за роботу над книгами є непередбачуваним і залежить від спонсора та видавництва. Іноді ця робота приносить якийсь прибуток, а деколи має чисто такий собі донкіхотський зміст.

У 2002 або 2003 роках мене відряджали до Бразилії. Узав із собою декілька виданих перед тим своїх книг. В Університеті штату Ріо-де-Жанейро ці книги переходили з рук у руки тамтешніх професорів, а ті від здивування видавали звуки захоплення. Видання хоча б однієї подібної книги приносило професорові в Бразилії трирічну його платню. А це і так велика сума грошей. Майже так само оплачують авторів роботу над його книгами і в США, і в Аргентині, і в інших країнах світу. А у нас вони не оцінюються ніяк – ні університетом, ні державою, ні громадськістю. Як казав мені мій проректор, “ніхто Вас не примушує працювати над книгами”. Так... не примушує! Але й не заохочує...

У мене на кафедрі на столі лежать всі 52 книги з моїм авторством / співавторством, видані з далекого 1972 року. Висота цього стосу книг сягає 1,3 метра. Напевно, з виходом останніх словників ця висота перевищить півтора метри. Разом у цих книгах понад п’ятнадцять тисяч сторінок тексту. Усі вони мною вичитані по 4 – 6 разів. Оце і є моя професорська праця над книгами.

Напевно, кожну книгу можна піддати критиці. Однак привселюдно жодного разу її не чув, хоча позаочі мені передавали, що якісь мої “приятелі” відгукуються про ці книги скептично. Критики мені і раніше, і тепер бракує. Але щось ніхто не написав критичних приміток, не висловив своїх зауважень усно. Не прийнято це у нас. Ось так, “исподтишка” вкусити можна, а сказати відверто – ні.

Ще однією роботою над книгами інших авторів є моє рецензування. Десь ці книги зберігаються у мене на полицях в Івано-Франківську та Сімферополі. Їх уже назбиралось близько двадцяти. Це книги професорів В.С. Бойка, В.С. Білецького, В.С. Войтенка, В.М. Світлицького, І.В. Діяка, І.М. Шевченка, В.Ф. Горського та інших.

Я підрахував, що наша університетська бібліотека отримала від мене мої книги на суму понад 100 тисяч гривень. Я їх передавав безкоштовно, хоча про це нікому досі ще не казав.

Написані та видані книги вже стали історією. Сім років тому, у грудні 2001 року в газеті “Студент Прикарпаття” було опубліковано мою статтю про те, як пишуться та видаються технічні книги українською мовою. Подаю її нижче в такому вигляді, якою вона була тоді видрукована із заголовком “Час іде – проблема залишається”.

#### Час іде – проблема залишається

В умовах незалежної України перед викладачами університету постало завдання написання та видання підручників українською мовою. А це величезна відповідальність не лише перед сьогодишнім поколінням студентів, а й відповідальність за нашу культуру в найближчому майбутньому. Бо культура народу базується не лише на художній літературі (прозі чи поезії), філософських та публіцистичних творах, а й рівнозначно на володінні та застосуванні в щоденному вжитку різноманітної технічної лексики. Адже не часто ми чуємо виступи наших вчених – математиків, фізиків, спеціалістів різних фахів – українською мовою, а багато з них говорять про відсутність у ній усталених термінів.

Можна шукати різних причин цьому – те, що більшість докторів та кандидатів наук писали і захищали свої дисертації виключно російською мовою; що написані ними книги та наукові статті (монографії, підручники, посібники, довідники тощо) теж виходили в світ російською. Врешті-решт, російська мова стала для багатьох вчених мовою спілкування між колегами колишнього СРСР. Або те, що знання європейських мов було для нас чимось екзотичним, бо спілкування із вченими будь-якою європейською мовою було проблематичним. Лише виключні обставини дозволяли таке спілкування. І сьогодні багатьох наших докторів наук, професорів старшого покоління серйозно не сприймають в західному світі, бо, окрім російської, більшість із нас не володіє іншими мовами. Звідси і проблеми участі в міжнародних конференціях, симпозіумах, бо не будеш за кожним вченим закріплювати ще й перекладача. При цьому, це є найбільш характерним для українських вчених. Бо вчені із Болгарії, Угорщини, В'єтнаму, Польщі чи Китаю вільно послуговуються, наприклад, англійською мовою.

Повертаючись до підготовки нових підручників українською мовою, треба взяти до уваги і таке. Нові підручники повинні нести і нові знання для студентів. Вони повинні, як у США, безперервно оновлюва-

тися. Та про це нам доводиться поки що лише мріяти. Чому так? Цьому є кілька причин. Вища школа успадкувала від радянських часів і методику викладання, і навчальне навантаження на одного викладача (лекційні, практичні та лабораторні заняття), які, наприклад, в Івано-Франківському державному (тепер національному. – ред.) технічному університеті нафти і газу сягають від 1000 до 1200 годин на рік. До речі, в університетах західних країн річне навантаження професора становить 96 годин, що більше, ніж в десять разів є меншим від нашого. До цього долучилося і те, що на видання підручників, навчальних посібників чи монографій грошей в університеті немає, тож написання підручників професорами ВНЗ ніяк не стимулюється. Хоча за останні роки видано понад двадцять підручників та навчальних посібників, але із 40 докторів наук, професорів авторами їх є лише 10 – М.І. Куровець, Н.Н. Гунька, Є.І. Крижанівський, В.І. Векерик, В.М. Глоба, О.М. Адаменко, Г.І. Рудько, В.С. Бойко, Р.М. Кондрат, Р.С. Яремійчук. Із 40 кафедр лише 10 випустили нову навчальну літературу. Одних відлякує важкий шлях написання та видання літератури; інших – труднощі із пошуком спонсорів, які б могли видати літературу; третіх – необхідність, крім підготовки рукопису, взяти на себе обов'язки технічного редактора та коректора. А тут ще додаються проблеми термінології, лексики, різночитання текстів тощо.

Я маю певний досвід у цій роботі. До 1991 року написав та видав 13 монографій у Москві, одну в Києві і одну у Львові. Це була наукова література, написана виключно російською мовою. Із 1994 року до сьогодні мною особисто та в співавторстві написано і видано українською мовою 9 книг (два підручники, два довідники, два навчальні посібники, одна монографія, два конспекти лекцій). У 1993 році розпочалася робота (разом із доцентом В.Р. Возним) над рукописом навчального посібника “Освоєння та дослідження свердловин”.

У 1994 році ця робота обсягом 450 стор. побачила світ. При її написанні нам довелося взяти на себе пошуки всього – паперу, можливостей комп'ютерного набору, підготовки графіки, редагування та коректури. Кошти на видання були буквально випрошені у виробничих організаціях. Це була перша велика навчальна література в нафтогазовій промисловості, що вийшла українською мовою.

Паралельно під редакцію д. т. н. професорів В.С. Бойка, Р.М. Кондрата та Р.С. Яремійчука почалася робота над створенням “Довідника з нафтогазової справи”. У роботі над ним взяли участь 37 спеціалістів із Івано-Франківська, Львова та Києва. Вийшла в світ практично енциклопедія нафтової справи. Лише безкорисливий ентузіазм людей, допомога нафтовиків та газовиків сприяли завершенню цієї роботи в гранично короткі терміни.

Майже одночасно в 1995 – 1996 рр. з'явилися підручники та навчальні посібники М.І. Куровця, Н.Н. Гуньки, Є.І. Крижанівського, Р.С. Яремійчука, В.С. Бойка, пізніше – В.М. Глоби, О.М. Адаменка та Г.І. Рудька.

Поряд із виданням підручників в університеті виходять мої 10 конспектів лекцій із різних фахових курсів. Окремі з них можуть стати прообразом підручників чи навчальних посібників.

Безперечно, видання в університеті 20 книг навчальної літератури з необхідних 220 ще не робить погоди. Але однозначно можна стверджувати, що термінологічні означення, попри деяку їх відмінність, вже ввійшли в науково-технічну літературу в нафтовій і газовій промисловості України.

У 1998 році завершилася робота над англо-українським нафтогазовим словником (автори – Р.С. Яремійчук, Л.М. Середницький та З.П. Осінчук), який містить 45 тисяч слів та термінів англійською мовою і близько 100 тисяч українських слів – синонімів.

Попри необхідність такого словника для практичного користування ним інженерами, студентами, аспірантами, викладачами та перекладачами, він несе в собі і велику українську термінологічну функцію. Хоча, на наш погляд, ряд термінів ще не є до кінця виваженими. Адже в російську нафтогазову літературу ввійшло багато американських сленгів, а пізніше цими сленгами почали користуватися і українські спеціалісти без належного обґрунтування.

То що ж робити викладачам та вченим – чекати на те, що з'явиться стандарт на всі означення? Якщо так, то не скоро вийдуть підручники для вищої школи українською мовою. Якщо ж не чекати, то треба готувати та видавати навчальну літературу, беручи на себе всю відповідальність (і наступну критику) за допущені мовні помилки.

Думаю, що наступить час, коли і філологи зможуть підключитися до роботи над українською технічною літературою. Але це ще попереду. Легше зробити термінологічний аналіз текстів виданих книг, а на його основі узаконити правильну термінологію, ніж спочатку її запропонувати, а потім вживати.

Як перекласти українською мовою словосполучення “холостий хід” або означення “башмак обсадної колони чи насосно-компресорних труб”, “шарошкове долото”? Вживати термін “гірло свердловин” чи “уста свердловин”? Таких прикладів багато. Ми ввели поняття “марнохід” замість “холостий хід”, вживаємо термін “гірло свердловини”, а замість “шарошкове долото” – “кулястикове долото” та ін. Наша мова настільки багата, що можна спокійно уникнути вживання запозичених через російську мову американських сленгів.

Як усе ж таки зробити, щоб професор чи доцент був зацікавлений і мав змогу працювати над підручниками та навчальними посібниками? На мою думку, тут своє слово повинен сказати ректорат. По-перше, в кожному університеті треба мати програму підготовки та видання навчальної літератури. Для тих, хто працює над створенням підручників, слід відчутно зменшити навчальне навантаження (30 – 50 відсотків на час роботи над підручником). Але не за рахунок перерозподілу навантаження на конкретній кафедрі, а за рахунок створення запасу в цілому по університету. І, безперечно, ректорат повинен винаходити кошти на видання навчальної літератури.

Сьогодні можна видавати підручники невеликим тиражем на різорафах, уникаючи великих витрат. Але при цьому хтось повинен професійно редагувати посібники. Тому при університетах, які беруться за видання фахової літератури, мають бути професійні технічні редактори.

Кілька слів про підготовку та видання довідників із певних галузей промисловості. Більшість спеціалістів вихована на знаннях, отриманих за часів Радянського Союзу. Тому і керівники промисловості, і рядові інженерно-технічні працівники послуговуються методиками розрахунку, стандартами (ГОСТами), знають обладнання та інструменти, які випускалися в колишньому Радянському Союзі. Не секрет, що розвиток промисловості, попри спільні загальні тенденції в світі, йшов паралельними шляхами. Тому існують відмінності між конструкціями різних типів обладнань, в технологіях, нормативах, методах розрахунків, стандартах. Ці відмінності сьогодні перешкоджають нашим спеціалістам знаходити порозуміння із спеціалістами західних країн, де стандартизація та уніфікація обладнання досягала найвищого рівня. Тому нові довідники обов'язково повинні містити інформативний матеріал двох типів – свій, український, та західний.

А це вимагає від створювачів такого довідника великої праці. Та й хто оплатить цю працю, коли відомо, що ні в минулому, ні тим більше сьогодні ще жоден наш вчений не заробив собі на прожиття працю над книгами. Проте відомо, що підготовка та видання підручників у США забезпечує вченому оплату трьох наступних років його життя. Чи ми цього дочекаємося?

Ще одне інтерв'ю, опубліковане газетою “Галичина”, подаю нижче.

**Роман Яремійчук: “Українська енциклопедія нафтогазової справи буде!”**

У видавництві Львівського університету ім. Івана Франка вперше в Україні і в цілому світі видано українською мовою підручник нафтогазового профілю під назвою “Освоєння та дослідження свердловин”. Автори – професор Івано-Франківського технічного університету нафти і газу Роман ЯРЕМІЙЧУК та Василь ВОЗНИЙ.

**Наш кореспондент зустрівся з професором Р.**

**Яремійчуком і взяв у нього інтерв'ю.**

– **Пане Яремійчук, на підручнику є посвята: “Світлій пам'яті видатних вчених Емануїла Богдановича Чекалюка та Миколи Степановича Тимофєєва”. Чому саме їм присвячено цей перший український підручник?**

– Емануїл Чекалюк – це людина космічного розуму, одна із видатних постатей української науки і, якби його біографія була більш сприятливою, то, мабуть, він був би лауреатом Нобелівської премії, бо його праці – це згусток надзвичайно великої науки. І коли до нас приїздять відомі американські фахівці, то вони більше знають про Чекалюка, ніж наші українські інженери. Мені хотілося б, щоб студенти, які будуть вивчати нафтогазову справу, якомога більше знали про і цю людину. А в цілому, це була проста, доступна і привітна людина. Його девізом було: “Хлопці, працюйте, бо деградуєте”.

Що ж до Миколи Тимофєєва, то це видатний російський вчений. Він був керівником моєї кандидатської роботи. Тимофєєв багато зробив для нафтогазової науки, і його праці теж високо цінуються у всьому світі. Він з особливою теплотою і любов'ю ставився до України і українців. В аспірантурі більшість його аспіратів були українцями, в тому числі і я. І

мені хотілося, щоб його тепле, добре ставлення до українців залишилося в пам'яті прийдешніх поколінь. Тому така посвята.

– **Яке значення підручника для підготовки вітчизняних фахівців?**

– По-перше, підручник написано українською мовою. І коли я його писав, то не знав, що таке простуда, грип, кашель; ніяка хвороба чи втома мене не брала – так мені хотілося, щоб Україна швидше отримала свій перший нафтогазовий підручник.

Освоєння та дослідження свердловин – це одна з найважливіших гілок нафтогазової науки. Тому що буровики бурять свердловини, експлуатаційники розробляють родовища, а процес переходу від буріння до розробки – це освоєння свердловини. І якщо ми при цьому отримуємо максимум віддачі нафтового пласта, то тим самим робимо велику справу.

В цьому підручнику вдалося зібрати весь досвід світової практики – і Європи, і Америки. Тобто подаємо згусток знань, які, віриться, будуть надбанням не лише студентів, а й інженерів.

З іншого боку, він важливий ще й тим, що ми вперше ввели українську нафтогазову термінологію. Шляхом використання три-чотиримірного словникового тлумачення (україно-російсько-англійсько-німецького перекладів) ми ввели багато нових слів. Можливо, нас критикуватимуть за ці неологізми, але ми знаємо, що в цій книзі вперше повноцінно і повнокровно вжито українську мову в нафтогазовій термінології.

Разом із паном Возним, моїм колишнім аспірантом, ми повністю взяли на себе тягар відповідальності за мову.

– **А над чим зараз працюєте?**

– За останніх два роки спільно з професорами нашого університету В.С. Бойком і Р.М. Кондратом ми зібрали колектив авторів (близько 40 чоловік) і завершили роботу над довідником з нафтогазової справи. Обсяг цього довідника – 1200 сторінок, він уже пройшов редакторську правку, і нам залишається знайти спонсорів, які посприяли б його публікації. По суті – це українська енциклопедія з нафтогазової справи. Там є відомості про геологію взагалі і про геологію України, геофізику і її методи, буріння свердловин, розробку нафтових і газових родовищ, техніку видобутку, транспорт, екологію і т. ін. Ця книга буде потрібна кожному інженерові. Такого видання не було і в колишньому Радянському Союзі.

По-друге, поряд з підручником з освоєння я взявся за створення практикуму, задачника. Сформульовано понад 300 задач, і я хочу весь технологічний курс перевести на мову алгоритму, на мову формул з тим, щоб і студент, і інженер будь-який процес, що виникає в ході освоєння свердловин, міг точно розраховувати і уникати можливих помилок, які можуть призвести до аварії чи втрати продуктивності.

І ще одне. Вже декілька років я працюю над книгою, яка не має прямого відношення до техніки. Йдеться про розмірковування інженера. Тобто роблю спробу на власному досвіді простежити шлях отримання об'ємних, я сказав би, космічних знань, де і роль поведінки й особистості інженера є важливими факторами передачі набутих знань новим поколінням.

Мрію також написати декілька підручників з питань буріння в умовах моря. Це нова галузь для України, де ми ще не маємо своїх фахівців і їх готуватиме наш університет. І кожну книгу я хочу присвятити тим фахівцям, які вагомо прислужились українській науці і були яскравими постатями. Приміром, Петро Шинкарик, Анатолій Мельничук, Борислав Криха та багато інших. Тільки на відстані часу приходимо до розуміння, що ці люди володіли надзвичайним розумом і впливом.

*Розмову вів Микола Симчич*

І ще одне інтерв'ю з приводу роботи над технічними книгами.

**Роман Яремійчук: “Після нас не скоро хтось візьметься за таку справу”**

Інформаційним приводом до підготовки цієї публікації послужив той факт, що впродовж останніх років побачила світ у різних видавництвах ціла низка словників, довідників, підручників та іншої спеціалізованої літератури з нафтогазової справи. Авторами цих книг є відомі вітчизняні вчені. На чільному місці серед них – завідувач кафедри морських нафтогазових споруд Івано-Франківського державного технічного університету нафти і газу, віце-президент Української нафтогазової академії, доктор технічних наук, професор Роман Яремійчук. Отже, до нього ми й звернулися з проханням розповісти докладніше про ці унікальні наукові праці.

– Скажімо, таке фундаментальне видання, як “Англо-український нафтогазовий словник”, – підкреслив Роман Семенович, – це найбільший словник з вітчизняних спеціалізованих видань. Він містить 45 тисяч англійських слів та термінів і понад сто тисяч українських відповідників. Навіть у Росії такої ж за обсягом роботи немає. Словник охоплює всі сфери нафтогазової індустрії: геологію, буріння свердловин, розробку родовищ, транспорт, добування сировини і її зберігання, в тому числі й підземне, морський нафтогазовидобуток, а також певну частину нафтохімічної термінології. В Україні це перший словник такого масштабу, і я думаю, що після нас не скоро хтось візьметься за таку справу.

Ще однією фундаментальною працею є “Довідник з нафтогазової справи” під редакцією професорів нашого університету Василя Бойка, Романа Кондрата і моєю. Цьому виданню немає аналогів не тільки в Україні чи Росії, але й у США. Такого типу довідник майже незамінний для інженера, що працює в нафтогазовій індустрії, оскільки в ньому подається повна інформація про техніку і технології, які використовуються під час добування нафти і газу.

Щоб його створити, ми залучили до роботи чимало провідних фахівців. Книгу було видруковано швидкими темпами у Львівському видавництві “Місіонер”. Так само швидко довідник розійшовся по Україні, і тепер ніхто з вітчизняних спеціалістів не може сказати, що в нас немає україномовного довідника нафтогазової термінології і цим виправдовувати своє необгрунтоване вживання російської мови як у звичайному спілкуванні, так і в наукових працях.

– Схоже, росіяни, попри все їхнє вельми ревниве ставлення до питань першості, в чомусь погоджуються з тим, що таки відстають від Вас і Ваших колег у підготовці й виданні спеціальної лі-

тератури. Свідченням того – російські переклади ваших праць.

– Ще коли в 1994 році ми з доцентом нашого університету Василем Возним видали перший підручник українською мовою для студентів під назвою “Освоєння та дослідження свердловин”, який розійшовся також в Аргентині та Росії, хтось із моїх московських колег якось зауважив, мовляв, даремно ми видали таку роботу українською мовою, адже через це в неї буде мало читачів. Я ж відповів, що коли книга вартісна, її передрукують будь-якою іншою мовою. Так і сталося. Ще перед виходом у світ цього видання в Росії розійшовся також “Практикум з освоєння свердловин”, написаний мною разом із науковим співробітником Центральної науково-дослідної лабораторії АТ “Укрнафта” кандидатом технічних наук Юрієм Качмарем. А торік до нас надійшла пропозиція з Росії про переклад цих двох книжечок.

– Знаємо, що найновішою і особисто Вашою в цій царині є “Ілюстрована англо-російська і російсько-англійська енциклопедія морських технологій у нафтогазовій промисловості”, що вийшла друком з Вашою передмовою у Далласі (США). Яка історія цього видання?

– За ініціативою тодішнього посла України в США Юрія Щербака американське видавництво “Альбїон-Вудс” запропонувало спершу видати під спільним фінансуванням п’ять англо-українських нафтогазових енциклопедій. Та в нашій країні не знайшлося коштів для цього. Тоді вони запропонували таку співпрацю росіянам, і ті погодились. Чому ж я виявився автором цього видання? Бо перед тим у зв’язку з розгортанням кафедри морських нафтогазових споруд, що є порівняно новим структурним підрозділом ІФДТУНГУ, ми видали під грифом Міністерства України чотири підручники з морської нафтогазової справи. Вони й послужили базою для створення енциклопедії.

Великий за обсягом матеріал надали мені також заокеанські колеги, і моє завдання полягало в опрацюванні й упорядкуванні цього всього, перекладу на російську та англійську мови, полягало й у тому, аби звести до мінімуму численні несумісності між українською та американською термінологіями.

– Бачимо, що кожна з книг, про які ведемо мову, має свою присвяту.

– Так, прагнемо не тільки видати ту чи іншу працю, але й закарбувати на її сторінках пам’ять про видатних спеціалістів галузі. В основному, це вітчизняні вчені та інженери.

– А скільки Ви вже видали книг? Над чим працюєте нині? І коли знаходите час для цього?

– Всього написав 27 книг, з них вісім вийшло українською мовою в 90-ті роки. Пишу переважно у вихідні, під час відпустки, в перервах між лекціями. Спеціального часу на це ніхто мені не виділяє. Нині разом з професором Михайлом Мислюком та генеральним директором дочірньої компанії “Укргазвидобування” Іллею Рибчичем працюємо над чотиритомним “Довідником з буріння свердловин”. Вже готові до друку третій і четвертий томи. Довідник обіцяє стати ще однією фундаментальною працею. В ньому подається інформація буквально про все: обладнання, матеріали, інструменти, методи розрахунків, технології, нормативи і стандарти тощо. Тобто все те, що ми знаємо як зі своєї практи-

ки, так із практики західних країн. До речі, третій том присвячуємо Борисові Чайковському, котрий, як, може, дехто з читачів “Галичини” пам’ятає, колись керував трестом “Прикарпатбурнафта”, а потім очолював об’єднання “Укрнафта”, і колишньому керівникові Бориславського управління бурових робіт Євгенові Іваницькому. А другий – колишньому доценту нашого університету Григорію Семаку, чиему перу належить величезний науковий доробок і чий технічні винаходи є й сьогодні актуально-цікавими.

– Нам не вдалося навести тут назви всіх книг, які побачили світ останніми роками і над якими Ви працювали як автор чи редактор. Скажіть, чи знаходить цей труд належне визнання і в нас, а не лише за кордоном?

– Видання таких книг дається дорогою ціною. Доводиться просити кошти на це, іноді й принижуватись. На сьогодні, наприклад, ще не оплачено половини тиражу згадуваного вище “Англо-українського нафтогазового словника”, хоча гроші ще обіцяють. Та крім нестачі коштів трапляються й інші курйози, що перешкоджають нормально працювати. Свого часу в університеті викрали було кілька комп’ютерів, а серед них і той, де набирался цей словник. Довелося починати цю роботу по-новому.

Книги, звісно, не приносять жодного прибутку. А клопоту з їх виданням більше, ніж самої творчої роботи. Скажімо, надіслали мені з Далласа чотири примірники названої ілюстрованої енциклопедії. В Україні ж чомусь ту бандероль переслали на митницю. А там мені сказали, що лише за її митний огляд маю заплатити суму – третину моєї професорської платні. Довелося звертатися безпосередньо до керівництва Державної митної служби. Дві доби згаяв, поки переконав митників, що в бандеролі не якийсь комерційний товар, а, як і було написано в квитанції, підручники для студентів. Така ж історія мала місце і з рукописом “Освоєння скаважин”, який треба було надіслати до Москви. В експрес-пошті заявили, що не можуть прийняти таку бандероль без візи митників. А ті твердили, що не мають права перевіряти її вміст. Три доби витратив, поки подолав цю бюрократичну перепону. Чесно кажучи, іноді стає соромно за те, що живу в країні, де чиновники напридумували стільки бар’єрів для міжнародного спілкування. Ніхто не думає, що така практика ображає мене як людину, що за великим рахунком це порушення прав особи. Словом, не про визнання доводиться говорити. Я проводжу таку інтенсивну роботу тільки тому, що це робиться на чимало років уперед, що багатьом людям ці книги стануть у великій пригоді. Бо знаю, що не тільки публіцистика, поезія чи філософські твори формують обличчя нації: її суспільний поступ залежить і від вкладу в технічний прогрес. Без такої роботи, без видання українських підручників, спеціалізованої літератури діяльність держави буде неповноцінною.

*Взяли інтерв’ю Тетяна Данилюк і Василь Мороз  
(газета “Галичина”, 1999 р.)*

Практично кожна книга, що вийшла з друку після 1994 року, має свою присвяту видатним чи визначним вченим та інженерам, що працювали для нафтової справи. Серед цих прізвищ більшість – українські,

але є серед них і російські, й азербайджанські прізвища. Я можу перелічити лише деякі з них: М.С. Тимофеев, І.Г. Узумов, Т.Ю. Єременко, Б.І. Чайковський, Є.А. Іваницький, Є.Е. Струс, В.М. Дітчук, Й.С. Андрійчук, Ю.Г. Гаген, Е.Б. Чекалюк, М.М. Іванюта, М.С. Касіян, В.Ф. Жданков, Р.Ю. Садівський, С.М. Горев і багато інших. Це наш обов'язок – зберегти для прийдешніх поколінь імена тих людей, що працювали, згорали на дуже важкій і фізично, і морально роботі.

### MY BOOKS

**R.S. Yaremijchuk**

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas,  
15, Karpats'ka street, Ivano-Frankivs'k, Ukraine, 76019,  
e-mail: [public@nung.edu.ua](mailto:public@nung.edu.ua)*

*In the article an author tells about the prosecution of the monographs devoted different by the branches of Oil and Gas business, by textbooks which absorbed experience of world Oil and Gas science, by dictionaries, which assert Ukrainian technical terminology.*

**Key words:** *monograph, textbook, dictionary, Oil and Gas business, technical terminology.*

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

**Бережанський В. М.** – асистент кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Бойко Василь Степанович** – доктор технічних наук, професор кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Бойко Ростислав Васильович** – кандидат технічних наук, начальник технічного відділу ГПУ “Львівгазвидобування” ДК “Укргазвидобування”.

**Варцаб'юк Андрій Романович** – аспірант кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Волошинюк Оксана Романівна** – магістр з економіки підприємства Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Галушак Мар'ян Олексійович** – доктор фізико-математичних наук, професор, проректор з науково-педагогічної роботи та завідувач кафедри фізики новітніх технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Герєга Ігор Іванович** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Івано-Франківського сектора Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстигача НАН України.

**Голота Віктор Іванович** – науковий співробітник кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Грудз Володимир Ярославович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Гулька Степан Степанович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Гургула Степан Іванович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Данилюк Микола Олексійович** – доктор економічних наук, професор, завідувач кафедри економіки підприємства Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Заміховський Леонід Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних технологій у системах управління та автоматизації Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Заторський Роман Андрійович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри алгебри і геометрії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.



**Камасва Світлана Олегівна** – асистент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Когут Ігор Тимофійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Кондрат Олександр Романович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Кондрат Роман Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Коцкулич Ярослав Степанович** – доктор технічних наук, професор, декан газонафтопромислового факультету та завідувач кафедри буріння нафтових і газових свердловин Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Матвієнко Роман Михайлович** – асистент кафедри комп'ютерних технологій у системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Матієшин Дмитро Дмитрович** – старший викладач кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Мойсишин Василь Михайлович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Новосядлий Степан Петрович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Онацко Роман Георгійович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформатики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Оришин Олексій Миколайович** – асистент кафедри фінансів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Оришин Тетяна Михайлівна** – кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри фінансів Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Осипчук Михайло Михайлович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри статистики і вищої математики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Остафійчук Богдан Костянтинович** – доктор фізико-математичних наук, професор, член-кореспондент НАН України, ректор Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника, завідувач кафедри матеріалознавства та новітніх технологій.

**Перезовова Ірина Володимирівна** – кандидат економічних наук, доцент кафедри обліку і аудиту Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Перкатиюк Ігор Йосипович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри статистики і вищої математики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Рувінський Борис Маркович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри фізики новітніх технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Рувінський Марк Аунович** – доктор фізико-математичних наук, професор кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Савчук Ярослав Іванович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Семотюк Лілія Романівна** – магістр з економіки підприємства Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Тимків Дмитро Федорович** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Федорів Василь Дмитрович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства та новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Фреїк Дмитро Михайлович** – доктор хімічних наук, професор, директор Фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Фрик Ольга Богданівна** – інженер кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Шопа Василь Михайлович** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач Івано-Франківського сектора Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстигача НАН України.

**Штаєр Лідія Омелянівна** – асистент кафедри комп'ютерних технологій у системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Якубовський Володимир Петрович** – асистент кафедри комп'ютерних технологій у системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

**Яремій Іван Петрович** – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри матеріалознавства та новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Яремій С. І.** – аспірант кафедри матеріалознавства та новітніх технологій Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

**Яремійчук Роман Семенович** – доктор технічних наук, професор, декан спільного факультету нафтогазових технологій Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу та Національної академії природоохоронного і курортного будівництва (м. Сімферополь).

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

При підготовці рукописів статей, які подаються в редакцію “Прикарпатського вісника НТШ”, слід дотримуватись таких правил:

1. Стаття повинна містити короткий вступ, формулювання задачі (проблеми) та виклад отриманих автором (співавторами) нових результатів. Не допускається переказ відомих фактів, наведення посилань на неопубліковані роботи.

2. У редакцію подаються:

- два примірники рукопису статті (включаючи ілюстрації і таблиці), надруковані на білому папері формату А4;
- рецензію на статтю;
- електронний варіант статті, підготовлений на комп’ютері, у вигляді не архівованого або архівованого (ZIP, RAR) файла – CDR/RW.

3. Мова статті повинна бути українською або англійською. Обсяг не повинен перевищувати 20 сторінок.

4. Статтю слід оформити так: УДК, назва праці; прізвище та ініціали автора (співавторів), місце роботи (назва організації, повна поштова адреса, контактний телефон, електронна пошта), текст анотації, ключові слова, текст статті, список літератури.

Якщо мова статті українська (англійська), то після статті всі перераховані елементи – від назви роботи до ключових слів включно – подаються англійською (українською) мовою.

5. Формули, які нумеруються, обов’язково слід подавати окремим рядком. Нумерувати тільки ті формули, на які є посилання.

6. Використана література подається загальним списком (за алфавітом або в порядку посилань на джерела в тексті статті) та оформляється згідно з вимогами ВАК України (бюлетень №3, 2008 р.). Іноземна література пишеться мовою оригіналу. Посилання на відповідні джерела подаються в тексті у квадратних дужках, наприклад [4]. Зразки бібліографічного опису книги, статті, тез доповідей конференцій:

1. Боголюбов Н. Н. Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний / Н. Н. Боголюбов, Ю. А. Митропольский. – М. : Наука, 1974. – 504 с.
2. Кондрат Р. М. Підвищення газонафтоконденсатів родовищ / Р. М. Кондрат // Нафтова і газова промисловість. – 1992. – № 2. – С. 35–38.
3. Бойко В. С. Проводка горизонтальних і похилих свердловин як метод ефективного освоєння і розробки покладу / В. С. Бойко, Р. В. Бойко // Стан, проблеми і перспективи розвитку нафтогазового комплексу Західного регіону України : тези доповідей і повідомлень наук.-практ. конф. (Львів, 28–30 березня 1995 р.). – Львів, 1995. – С. 150.
7. Рукопис підписується автором (співавторами).

8. На окремому аркуші слід указати прізвище, ім’я та по батькові автора (співавторів), науковий ступінь, вчене звання, займану посаду (для формування відомостей про авторів у кінці кожного випуску журналу).

## Електронний варіант статті повинен задовольняти такі вимоги:

1. Стаття набирається в редакторі Microsoft WORD 95/7.0-97 на аркуші формату B5 182x257 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 10, внутрішнє – 30, зовнішнє – 20.
2. **Основний текст** набирається таким чином:
  - 2.1. Стиль “обычный”, гарнітура Times New Roman (Cyr), кегль 12, абзацний відступ – 0,75 мм, міжстроковий інтервал – “одинарний”.
  - 2.2. Порядок набору:
    - УДК (Times New Roman (Cyr), кегль 12, без абзацного відступу, вирівнювання – зліва).
    - Назва статті** (Times New Roman (Cyr), кегль 12, bold, прописом, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивки зверху і знизу – 9 пт).
    - Ініціали, прізвище автора (співавторів)** (Arial (Cyr), кегль 12, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру).
    - Назва організації, її повна поштова адреса, адреса електронної пошти** (Times New Roman (Cyr), кегль 12, italic, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка знизу – 9 пт).
    - 2.3. Відбивки по тексту не використовуються за виключенням підрозділів статті (підрозділи, підпункти і т. п. відділяються відбивками “перед” – 9, “після” – 6).
3. Для набирання **формул** використовується вбудований у Microsoft Office редактор формул Equation v. 3.0. **Стилі:** Text – Times New Roman (Cyr), **Function** – Times New Roman (Cyr), italic, **Variable** – Times New Roman (Cyr), italic, **L.C.Greek** – Symbol, italic, **Symbol** – Symbol, italic, **Matrix/Vector** – Times New Roman (Cyr), **Number** – Times New Roman (Cyr). **Розміри:** Full – 12, **Subscript/Superscript** – 9, **Sub-Subscript/Superscript** – 5, **Symbol** – 14, **Sub-Symbol** – 9. Для наочності рекомендується формули відділяти відбивками зверху і знизу – 6 пт.
4. **Таблиці** повинні бути складені лаконічно, зрозуміло й містити мінімальні відомості, необхідні для ілюстрування тексту статті. **Назва таблиці:** Times New Roman (Cyr), кегль 12, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру, відбивка зверху – 6 пт.
5. **Ілюстрації** до статей (схеми, графіки, діаграми) повинні бути виконані в растровому (векторному) форматах (BMP, TIF, PCX, JPG, GIF; CDR) і додаватися окремим файлом. Забороняється використовувати **графічний редактор MS WORD!!!** Ілюстрації типу фотографій повинні бути відскановані з роздільною здатністю не менше 400 dpi і/або додаватися в оригіналі. **Ілюстрації, перескановані з періодики, не приймаються!** **Підписи до ілюстрацій:** Times New Roman (Cyr), кегль 11–12, bold, без абзацного відступу, вирівнювання – по центру. **Написи на ілюстраціях** виконуються гарнітурою Arial.

**Прикарпатський вісник Наукового товариства  
ім. Шевченка**

**Число  
2008. – № 1(1)  
338 с.**

Відповідальний за випуск *Василь МОЙСИШИН*  
Літературна редакція *Оксана РОСПОПА, Руслана БОДНАР*  
Набір та макетування *Богдан ДЕМКІВ, Любомира ДЯКІВ*  
Комп'ютерна правка *Лідія КУРІВЧАК*  
Коректура *Віта ТИМКІВ, Олександра ЛЕНІВ*

НБ ПНУС



743426

Підп. до друку 17.03.2009 р.  
Формат 60x84/8. Папір офсет. Гарнітура "Times New Roman".  
Друк на різнографі. Ум. друк. арк. 42.2.  
Наклад 300 пр. Зам. 34.

Видавець і виготовлювач  
Видавництво "Плай" ЦІТ  
Прикарпатського національного університету  
імені Василя Стефаника  
76025, м. Івано-Франківськ,  
вул. С.Бандери, 1, тел.: 71-56-22  
E-mail: [vdvcit@pu.if.ua](mailto:vdvcit@pu.if.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2718 від 12.12.2006