

82
17-75

НАУКОВЕ ТОВАРИСТВО ім. ШЕВЧЕНКА
ІВАНО-ФРАНКІВСЬКИЙ ОСЕРЕДОК



ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НТШ

Число



1(5)-2009



**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(5)-2009

1(5)-2009

Ivano-Frankivsk
2009

Івано-Франківськ
2009



ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НТШ

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

Число

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., акад. 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.Орищин, 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., акад. 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 (Талька, 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.Льчик (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.Аксіментьєва (Львів), 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. О.О.Акульшин (Київ), д.т.н. В.М.Дорошенко (Київ), д.т.н. Ю.О.Зарубін (Київ), д.т.н. Р.М.Кондрат, д.т.н. Я.С.Козкулич, д.т.н. М.А.Мислюк, д.т.н. Б.І.Навроцький, д.т.н. В.М.Світлицький (Київ), д.т.н. Б.О.Чернов, д.т.н. Р.С.Яремійчук;

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.Калашін (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.Семенов, д.т.н. С.Ф.Теленик (Київ), д.т.н. В.М.Юр'єв

д.е.н. І.С.Вілашук, д.е.н. І.С.Благуш, 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.

ЗМІСТ

МАТЕМАТИКА ТА МЕХАНІКА

А.В. Загороднюк, М.В. Дубей
Лінеаризація мультиліпшицевих відображень на банахових просторах 9

Я.І. Савчук
Про множину значень величин дефектів для цілої кривої скінченного порядку .. 16

С.С. Гулька
Метод частинного усереднення в системах інтегро-диференціальних рівнянь з подвійними імпульсами 20

С.І. Гургула, Р.І. Собкович
Про стійкість у системах з імпульсами 24

Р.А. Заторський
Рекурсії та позиційні системи числення . 30

І.В. Никифорчин
Нечіткі переваги в задачах прийняття рішень в умовах невизначеності 34

Л.І. Криштопа
Ряди Фур'є в комп'ютерній графіці 37

І.В. Федак
Деякі нестандартні методи розв'язування рівнянь та доведення нерівностей 46

М.М. Осипчук
Про послідовний метод класифікації ... 53

В.М. Мойсишин, В.Д. Яцишин
Застосування методу просторових характеристик для вивчення напружено-деформованого стану прихопленої бурильної колони під дією вибухової хвилі 58

ПРИКАРПАТСЬКИЙ ВІСНИК НАУКОВОГО ТОВАРИСТВА ІМ. ШЕВЧЕНКА 1(5)·2009

Науковий журнал
Видається у чотирьох
серіях
**ЧИСЛО, СЛОВО,
ДУМКА, ПУЛЬС**
(по одному випуску
кожної серії щороку)

Заснований у 2008 році
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

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

Відповідальність за
достовірність наведених
у статтях даних несуть
автори публікацій

Передрук – тільки
з дозволу редакції

Друкується за ухвалою
Президії Івано-
Франківського осередку
Наукового товариства
ім. Шевченка

© Івано-Франківський
осередок НТШ, 2008

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

К.Г. Левчук, С.Г. Степаненко
Гравітація в механіці та гравітаційні яви-
ща в космонавтиці 75

С.О. Камаєва, М.Г. Федоришин
Реалізація методу скінченних елементів з
використанням альтернативних моделей 83

ФІЗИКА І ХІМІЯ ТВЕРДОГО ТІЛА

М.А. Рувінський
Модель квантової механіки з випадковим
числом квантів дії 91

Д.М. Фреїк, І.В. Горічок
Термодинаміка точкових дефектів та їх
вплив на фізико-хімічні властивості кри-
сталів кадмій телуриду (огляд) 104

П.І. Мельник, В.М. Крамар, І.В. Цідило
Роль поверхневих станів у процесах утво-
рення граничних шарів антифракційних
рідин 128

Р.Б. Атаманюк
Модернізація методів растрової елект-
ронної мікроскопії для електрофізичного
діагностування та шляхи зниження по-
гонних опорів, індуктивностей і ємностей
багаторівневої розводки субмікронних
структур великих інтегральних схем . 135

Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Ю.В. Кланічка
Розмірний ефект та механізми перене-
сення носіїв струму у тонких напівпро-
відникових плівках халькогенідів
свинцю (огляд) 155

НАФТОГАЗОВА СПРАВА

Р.С. Яремійчук
Інженерний внесок в технологію буріння
свердловин на Прикарпатті після 1939
року 177

Ю.Д. Качмар, В.В. Цьомко, І.Ф. Климович, Я.О. Заливаха
Аналіз застосування нової технології кислотного розриву пласта
теригенних колекторів 213

Б.С. Бойко, Р.Ф. Лагуш
Особливості статистичного підрахунку запасів і прогнозування
показників розробки нафтового родовища на пізній стадії 221

В.І. Грицишин
Фізико-петрографічні параметри колекторів нафтових і газових
родовищ карпатського нафтогазоносного регіону 232

Ю.Д. Качмар
Методика проектування гідропікострумної перфорації через
декілька колон 256

М.П. Возняк, Л.В. Возняк, Г.М. Кривенко
Дослідження ризиків небезпеки під час експлуатації магістральних
нафтопроводів 263

Д.Ф. Тимків, Р.Г. Онацко, О.Т. Михалевич
Основи розробки методів регулювання режиму роботи складних
газотранспортних систем 269

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Л.М. Заміховський, Л.М. Ходак
Застосування елементів дистанційного навчання при організації
навчального процесу у вищій школі 277

Ю.В. Безгачнюк
Моделі і методи статистичної обробки результатів дистанційного
діагностування рівня знань 286

Л.О. Сав'юк
Роль університетів у розвитку та трансформації регіональної освіти 295

С.В. Зікратий
Застосування сучасних інформаційних технологій у викладанні
дисциплін для студентів заочної форми навчання 302

ЕКОНОМІКА ТА ОРГАНІЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА

Я.С. Витвицький, О.М. Витвицька, Н.В. Балашова
Оцінка економічної інформації 307

Т.М. Орищин, О.М. Орищин
Методологічні підходи до реформи системи охорони здоров'я
в Україні 318

РЕЦЕНЗІЇ, ІНФОРМАЦІЯ

В.М. Мойсишин
Про працю Еммануїла Чекалюка "Гносеологічний потенціал
класичної механіки" 327

Р.С. Яремійчук
Коротенькі есеї про прикарпатських інженерів-буровиків другої
половини ХХ сторіччя 332

Відомості про авторів 359

Математика та механіка

УДК 517.98

ЛІНЕАРИЗАЦІЯ МУЛЬТИЛІПШИЦЕВИХ ВІДОБРАЖЕНЬ НА БАНАХОВИХ ПРОСТОРАХ

А. В. Загороднюк¹, М. В. Дубей²

¹Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка;
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;

Інститут прикладних проблем механіки і математики,
79060, Україна, м. Львів, вул. Наукова, 3б; e-mail: andriyzag@yahoo.com

²Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаніка;
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;
e-mail: mariadubey@gmail.com

Розглянено ліпшицеві та мультіліпшицеві відображення та здійснено процес лінеаризації мультіліпшицевих відображень.

Ключові слова: ліпшицеві відображення, мультіліпшицеві відображення, вільний банахів простір.

Дослідження ліпшицевих відображень є класичним розділом сучасної математики і проводилось багатьма авторами (див., наприклад, [4, 8]). Розробку теорії вільних банахових просторів розпочато у роботах Р. Аренса та Ж. Ілса [3] у 50-их роках ХХ століття та продовжено у працях таких вчених, як Д. Райков [2], Ж. Флуд [5], Ж. Годєфруа, Н. Калтон [6], В. Пестов [7], Н. Вівер [8].

Нехай X, Y – метричні простори. Відображення $f : X \rightarrow Y$ називається ліпшицевим на просторі X , якщо існує стала $c > 0$ така, що для довільних елементів $x_1, x_2 \in X$ справедлива нерівність

$$\rho(f(x_1), f(x_2)) \leq c\rho(x_1, x_2),$$

де $\rho(x_1, x_2)$ та $\rho(f(x_1), f(x_2))$ – відстань між елементами простору X та Y відповідно. Сталою Ліпшица називається найменша можлива стала c . Розглянемо метричний простір X з додатною функцією $\alpha(x)$, такою, що для довільних елементів $x_1, x_2 \in X$ виконується наступна нерівність

$$|\alpha(x_1) - \alpha(x_2)| \leq \rho(x_1, x_2) \leq \alpha(x_1) + \alpha(x_2).$$

Функція $\alpha(x)$ називається нормою метричного простору.

Відомо, що довільний метричний простір X є нормованим відносно норми $\alpha(x) = \rho(\theta, x)$, де θ – деяка фіксована точка простору X . Такий простір X називається *простором з відміченою точкою*. Позначимо $Lip_0(X, E)$ підмножину всіх ліпшицевих відображень $f(x)$ з нормованого метричного простору X з відміченою точкою θ з нормою $\alpha(x)$ у нормований лінійний простір E , таких, що

$$\|f(x)\| \leq L_f \alpha(x),$$

де L_f – ліпшицева стала. Ліпшицеве відображення на довільному просторі X з відміченою точкою належить класу $Lip_0(X, E)$ тоді і тільки тоді, коли $f(\theta) = 0$. Простір $Lip_0(X, E)$ є банаховим простором з нормою $\|f\| = L_f$ (див. [8]).

У [7] доведено, що для довільного метричного простору X з відміченою точкою існує єдиний, з точністю до ізоморфізму, банахів простір $B(X)$ такий, що метричний простір X ізометрично вкладається у банахів простір $B(X)$ і кожне відображення $f(x) \in Lip_0(X, E)$ може бути продовжене до лінійного оператора $\tilde{f}: B(X) \rightarrow E$, для довільного нормованого простору E , причому $\|\tilde{f}\| = L_f$. Таким чином, простір ліпшицевих функцій $Lip_0(X) = Lip_0(X, R)$ можна ототожнити з простором лінійних неперервних функціоналів на $B(X)$, тобто $(B(X))' = Lip_0(X)$. Простір $B(X)$ називається *вільним банаховим простором* над метричним простором X .

Для довільного елемента $x \in X$ позначимо \underline{x} – образ цього елемента при ізометричному вкладенні простору X у простір $B(X)$. У [7] показано, що елементи вигляду $\sum_{k=1}^n \lambda_k \underline{x}_k$ є щільними в $B(X)$.

Розглянемо відображення $g(x, y)$, визначене на декартовому добутку метричних просторів $X \times Y$ зі значеннями в нормованому просторі E .

Позначимо через $A_y(x)$ відображення з простору X в простір E таке, що для кожного фіксованого $y \in Y$ виконується рівність

$$A_y(x) = g(x, y).$$

Аналогічно можна означити відображення $A_x(y) = g(x, y)$, яке діє з простору Y в простір E при кожному фіксованому $x \in X$.

Відображення $g(x, y): X \times Y \rightarrow E$ називається *дволіпшицевим*, якщо $A_x(y)$ є ліпшицевим для кожного фіксованого $x \in X$ і $A_y(x)$ є ліпшицевим для кожного фіксованого $y \in Y$. Для даного дволіпшицевого відображення $g(x, y)$ позначимо $G: x \mapsto A_x$ – оператор, який кожному

елементу $x \in X$ ставить у відповідність ліпшицеве відображення A_x . В роботі [1] доведено наступну теорему.

Теорема 1. *Нехай X, Y – повні метричні простори з відміченими точками θ_1 і θ_2 відповідно і $g(x, y)$ – дволіпшицеве відображення таке, що $A_x(y) \in Lip_0(Y, E)$ для довільного $x \in X$, $A_y(x) \in Lip_0(X, E)$ для довільного $y \in Y$ і $G: x \mapsto A_x$ належить класу $Lip_0(X, Lip_0(Y, E))$. Тоді існує неперервне білінійне відображення $D: B(X) \times B(Y) \rightarrow E$ таке, що $D(\underline{x}, \underline{y}) = g(x, y)$ для всіх $x \in X$ та $y \in Y$ і $\|D\| = L_G$.*

Протилежне твердження також вірне. Якщо D є неперервним білінійним відображенням на $B(X) \times B(Y)$, тоді $g(x, y) = D(\underline{x}, \underline{y})$ є дволінійним відображенням, яке задовольняє умови теореми 1. Тоді існує неперервний лінійний оператор Φ_g на проективному тензорному добутку $B(X) \otimes_\pi B(Y)$ такий, що $\Phi_g = D(u, v)$, для довільних $u \in B(X)$, $v \in B(Y)$, тому дволіпшицеве відображення $g(x, y)$ задовольняє умови теореми 1 тоді і тільки тоді, коли $\Phi_g(\underline{x} \otimes \underline{y}) = g(x, y)$. Отже, множину всіх дволіпшицевих функцій, які задовольняють умовам теореми 1 можна ототожнити з простором всіх неперервних білінійних форм $\mathfrak{B}({}^2B(X) \times B(Y)) = (B(X) \times B(Y))'$. Позначимо цю множину $Lip_0^2(X \times Y)$.

Розглянемо тріліпшицеве відображення $g(x_1, x_2, x_3)$ визначене на декартовому добутку $X_1 \times X_2 \times X_3$ повних метричних просторів X_1, X_2, X_3 зі значеннями у нормованому просторі E і позначимо через $A_{x_1}(x_2, x_3)$ відображення з $X_1 \times X_2 \times X_3$ в E таке, що для кожного фіксованого $x_1 \in X_1$ виконується рівність $A_{x_1}(x_2, x_3) = g(x_1, x_2, x_3)$, крім того $A_{x_1}(x_2, x_3) \in Lip_0^2(X_2 \times X_3)$. Для даної тріліпшицевої функції $g(x_1, x_2, x_3)$ також існує неперервне трілінійне відображення $D: B(X_1) \times B(X_2) \times B(X_3) \rightarrow E$ таке, що $D(\underline{x}_1, \underline{x}_2, \underline{x}_3) = g(x_1, x_2, x_3)$ і $\|D\| = L_G$, де L_G – ліпшицева константа відображення $G: x_1 \mapsto A_{x_1}(x_2, x_3)$. Таким чином, множину всіх таких тріліпшицевих функцій $Lip_0^3(X_1 \times X_2 \times X_3)$ можна ототожнити з простором всіх неперервних трілінійних форм $\mathfrak{B}({}^3B(X_1) \times B(X_2) \times B(X_3)) = (B(X_1) \times B(X_2) \times B(X_3))'$. Аналогічно можна побудувати простори $Lip_0^4(X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_4)$, $Lip_0^5(X_1 \times X_2 \times X_3 \times X_5)$, ..., $Lip_0^{n-1}(X_1 \times X_2 \times \dots \times X_{n-1})$.

Наступним кроком буде доведення теореми для n -ліпшицевого відображення та побудова простору $Lip_0^n(X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n)$.

Розглянемо відображення $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ визначене на декартовому добутку метричних просторів $X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n$ зі значеннями у нормованому просторі E . Позначимо $A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$ відображення з $X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n$ в E таке, що для кожного фіксованого $x_1 \in X_1$ виконується рівність $A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$, крім того $A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n) \in Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n)$, де $Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_{n-1})$ – простір функцій, які задовольняють умову теореми 1 для $(n-1)$ -ліпшицевої функції.

Аналогічно можна означити функції

$$A_{x_2}(x_1, x_3, x_4, \dots, x_n);$$

$$A_{x_3}(x_1, x_2, x_4, \dots, x_n);$$

$$\dots$$

$$A_{x_n}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}).$$

Відображення $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ називається n -ліпшицевим, якщо

$A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_2 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 3, 4, \dots, n$.

$A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_3 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 2, 4, \dots, n$.

$A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_n за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 2, \dots, n-1$.

$A_{x_2}(x_1, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_1 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 2, 3, \dots, n$.

$A_{x_2}(x_1, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_3 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 2, 4, 5, \dots, n$.

$A_{x_2}(x_1, x_3, \dots, x_n)$ є ліпшицевим по x_n за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 2, \dots, n-1$.

$A_{x_n}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ є ліпшицевим по x_1 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 2, 3, \dots, n$.

$A_{x_n}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ є ліпшицевим по x_2 за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 3, 4, \dots, n$.

$A_{x_n}(x_1, x_2, \dots, x_{n-1})$ є ліпшицевим по x_{n-1} за фіксованих $x_i \in X_i$, де $i = 1, 2, \dots, n-2, n$, тобто, відображення $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n): X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n \rightarrow E$ називається n -ліпшицевим, якщо воно є ліпшицевим по одній зі змінних, коли решту $(n-1)$ -змінна будуть фіксованими. Для даного n -ліпшицевого відображення визначимо оператор $G: x_1 \mapsto A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$, який кожному елементу x_1 ставить у відповідність відображення $A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n) \in Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n)$, у такий самий спосіб можна означити оператори

$$G_2: x_2 \mapsto A_{x_2}(x_1, x_3, x_4, \dots, x_n) \in Lip_0^{n-1}(X_1 \times X_3 \times X_4 \times \dots \times X_n);$$

$$G_3: x_3 \mapsto A_{x_3}(x_1, x_2, x_4, \dots, x_n) \in Lip_0^{n-1}(X_1 \times X_2 \times X_4 \times \dots \times X_n);$$

$$\dots$$

$$G_n: x_n \mapsto A_{x_n}(x_1, x_2, x_3, \dots, x_{n-1}) \in Lip_0^{n-1}(X_1 \times X_2 \times X_3 \times \dots \times X_{n-1}).$$

Теорема 2. Нехай X_1, X_2, \dots, X_n – повні метричні простори з відміченими точками $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ відповідно, $g(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$ – n -ліпшицеве відображення, $G: x_1 \mapsto A_{x_1}(x_2, x_3, \dots, x_n)$ – оператор і $G \in Lip_0(X, Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n))$, тоді існує неперервне n -лінійне відображення $D: B(X_1) \times B(X_2) \times \dots \times B(X_n) \rightarrow E$ таке, що

$$D(\underline{x}_1, \underline{x}_2, \dots, \underline{x}_n) = g(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

для довільних $x_i \in X_i$, $i = 1, 2, \dots, n$ і

$$\|D\| = L_G.$$

Доведення

Нехай \tilde{G} – продовження оператора G до лінійного оператора з $B(X_1)$ у $Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n)$ і $\|\tilde{G}\| = L_G$.

Якщо $z = \sum_{k=1}^n \lambda_k x_{1k} \in B(X_1)$ то $\tilde{G}(z) = \sum_{k=1}^n \lambda_k A_{x_{1k}}$, де $A_{x_{1k}} \in Lip_0^{n-1}(X_2 \times X_3 \times \dots \times X_n)$. Кожне відображення $A_{x_{1k}}$ допускає продовження $\tilde{A}_{x_{1k}}$ до лінійного неперервного оператора з $B(X_2) \times B(X_3) \times \dots \times B(X_n)$ в E і

$$\|\tilde{A}_{x_{1k}}\| = L_{A_{x_{1k}}}.$$

Розглянемо відображення $\tilde{\tilde{G}}(z): z \mapsto \tilde{\tilde{A}}_z$, де $\tilde{\tilde{A}}_z = \sum_{k=1}^n \lambda_k \tilde{A}_{x_{1k}}$. Це відображення визначене на просторі скінченних лінійних комбінацій $\sum_{k=1}^n \lambda_k x_{1k}$, який є щільним у $B(X)$ і діє у простір лінійних неперервних

операторів $\mathfrak{Z}(^{n-1}B(X_2) \times B(X_3) \times \dots \times B(X_n))$. Відображення $\tilde{G}(z)$ є композицією лінійного неперервного оператора $\tilde{G}(z): z \mapsto \sum_{k=1}^n \lambda_k A_{x_k}$ та лінійного ізометричного оператора $\nu: A_{x_k} \mapsto \tilde{A}_{x_k}$ і $\|\tilde{G}\| = \|G\|$. Таким чином, \tilde{G} є лінійним неперервним оператором з $B(X_1)$ в простір лінійних неперервних операторів $\mathfrak{Z}(^{n-1}B(X_2) \times B(X_3) \times \dots \times B(X_n))$. З теорії n -лінійних відображень добре відомо, що $D(z, v_2, v_3, \dots, v_n) = \tilde{A}_z(v_2, v_3, \dots, v_n)$ є неперервним n -лінійним відображенням і

$$\|D\| = \sup_{\substack{\|z\| \leq 1 \\ \|v_2\| \leq 1 \\ \dots \\ \|v_n\| \leq 1}} (D(z, v_2, v_3, \dots, v_n)) = \sup_{\substack{\|z\| \leq 1 \\ \|v_2\| \leq 1 \\ \dots \\ \|v_n\| \leq 1}} (A_z(v_2, v_3, \dots, v_n)) = \sup_{\|z\| \leq 1} (\tilde{G}(z)) = \|\tilde{G}\| = L_G.$$

Таким чином, множину всіх n -ліпшицевих функцій, які задовольняють умовам теореми 2 можна ототожнити з простором всіх неперервних n -лінійних форм

$$\mathfrak{Z}(^n B(X_1) \times B(X_2) \times B(X_3) \times \dots \times B(X_n)) = (B(X_1) \otimes B(X_2) \otimes B(X_3) \otimes \dots \otimes B(X_n))'$$

Отже, побудовано простір $Lip_0^n(X_1 \times X_2 \times \dots \times X_n)$.

Література

1. Дубей М.В. Принцип рівномірної обмеженості для ліпшицевих відображень / М.В. Дубей, А.В. Загороднюк // Прикладні проблеми механіки і математики. – 2009.
2. Райков Д.А. Свободные локально выпуклые подпространства равномерных пространств / Д.А. Райков // Мат. сб. – 1964. – 63, № 4. – С. 582-590.
3. Arens R. On embedding uniform and topological spaces / R. Arens, J. Eells // Pacif. J. Math. – 1959. – №6. – P. 397-403.
4. Benyamini Y. Geometric nonlinear functional analysis / Y. Benyamini, J. Lindenstrauss. – Providence, American Mathematical Society. – 2000. – 488 p.
5. Flood J. Free topological vector spaces / J. Flood. – Canberra, Australian National university, Ph. D. thesis, 1975. – 109 p.
6. Godefroy G. Lipschitz-free Banach spaces / G. Godefroy, N. Kalton // Studia Math. – 2003. – 159, №1. – P. 121-141.
7. Pestov V. Free Banach spaces and representations of topological groups / V. Pestov // Functional analysis. – 1986. – 20. – P. 70-72.
8. Weaver N. Lipschitz algebras / N. Weaver. – Singapore, New Jersey, London, New York, World Scientific, 1999. – 223 p.

Стаття поступила в редакційну колегію 17.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Лопушанським О.В.

LINEARIZATION OF MULTI-LIPSCHITZ MAPS ON BANACH SPACES

A. V. Zagorodnyuk¹, M. V. Dubei²

¹V. Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk;
76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenka street, 57;

Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics of NASU
79060, Lviv, Naukova street, 3b; e-mail: andriyzag@yahoo.com

²V. Stefanyk Precarpathian National University, Ivano-Frankivsk;
76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenka street, 57;
e-mail: mariadubey@gmail.com

We consider Lipschitz and multi-Lipschitz maps and we carry out the process of linearization of multi-Lipschitz maps.

Key words: Lipschitz maps, Multi-Lipschitz maps, Free Banach space.

ПРО МНОЖИНУ ЗНАЧЕНЬ ВЕЛИЧИН ДЕФЕКТІВ ДЛЯ ЦІЛОЇ КРИВОЇ СКІНЧЕНОГО ПОРЯДКУ

Я. І. Савчук

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

Показано, що множина значень величин дефектів для довільної цілої кривої скінченного порядку не більше ніж зліченна, хоча множина не колінарних між собою дефектних векторів для такої кривої може мати потужність континуум.

Ключові слова: ціла крива, характеристика росту, функція наближення, неванліннівський дефектний вектор, величина дефекту.

В даній роботі використовуються основні результати теорії цілих кривих, а також позначення, використані в [1].

Водночас, зупинимось на деяких основних поняттях.

Цілою кривою називається голоморфне відображення $\bar{G}: C \rightarrow C^p$, де p – натуральне число, більше за одиницю. Отже, p -вимірною цілою кривою має вигляд $\bar{G}(z) = (g_1(z), g_2(z), \dots, g_p(z))$, де компоненти $g_1(z), g_2(z), \dots, g_p(z)$ – цілі (тобто аналітичні в усій комплексній площині) функції. Вважатимемо їх лінійно незалежними і без спільних нулів.

Для p -вимірної цілої кривої \bar{G} характеристика росту $T(r, \bar{G})$ та функція наближення $m(r, \bar{a}, \bar{G})$ при $\bar{a} \neq \bar{0}$ визначаються рівностями

$$T(r, \bar{G}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \|\bar{G}(re^{i\varphi})\| d\varphi,$$

$$m(r, \bar{a}, \bar{G}) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \frac{\|\bar{G}(re^{i\varphi})\| \cdot \|\bar{a}\|}{|\bar{G}(re^{i\varphi}) \cdot \bar{a}|} d\varphi.$$

Розглянемо
$$\delta(\bar{a}, \bar{G}) = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{m(r, \bar{a}, \bar{G})}{T(r, \bar{G})}. \quad (1)$$

Якщо $\delta(\bar{a}, \bar{G}) > 0$, то \bar{a} називається неванліннівським дефектним вектором. При цьому $\delta(\bar{a}, \bar{G})$ називається величиною дефекта.

Позначимо через $D(\bar{G}) = \{\bar{a} \in C^p \setminus \{\bar{0}\} : \delta(\bar{a}, \bar{G}) > 0\}$ множину неванліннівських дефектних векторів цілої кривої \bar{G} .

Порядком цілої кривої \bar{G} називається величина $\rho = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{\ln T(r, \bar{G})}{\ln r}$.

Система векторів із C^p називається допустимою, якщо довільні p векторів із цієї системи лінійно незалежні.

Легко бачити, що $m(r, \lambda \bar{a}, \bar{G}) = m(r, \bar{a}, \bar{G})$ при всіх $\lambda \neq 0$, тобто величини дефектів для двох довільних колінарних векторів рівні.

Для цілих кривих мають місце перша і друга основні теореми (див. [2]). З другої основної теореми випливає, що допустима система неванліннівських дефектних векторів не більше ніж зліченна.

Відносно множини $D(\bar{G})$ для цілих кривих скінченного порядку отримано такий результат (див. [3], [4]).

Теорема А. Для того, щоб множина $A \subset C^p$ збігалася з множиною $D(\bar{G}) \cup \{\bar{0}\}$ для деякої p -вимірної цілої кривої \bar{G} скінченного додатного порядку, необхідно і достатньо, щоб A була не більше ніж зліченим об'єднанням підпросторів $A_j \subset C^p$ розмірності $\leq p-1$.

З цієї теореми випливає, що при $p \geq 3$ існує ціла крива скінченного порядку, для якої множина неколінарних між собою неванліннівських дефектних векторів має потужність континуум. Тому постає природне запитання, чи матиме таку ж потужність множина величин дефектів.

Результатом даної статті є наступна теорема.

Теорема. Для довільної кривої \bar{G} скінченного порядку множина $\delta(C^p \setminus \{\bar{0}\}, \bar{G})$ значень величин дефектів не більше ніж зліченна.

Доведення. Якщо ціла крива \bar{G} не трансцендентна, тобто така, що $T(r, \bar{G}) = O(\ln r)$, $r \rightarrow \infty$, то усі компоненти цілої кривої можна вважати поліномами, і, як не важко бачити, для довільного $\bar{a} \in C^p \setminus \{\bar{0}\}$ виконується

$\delta(\bar{a}, \bar{G}) = \frac{m}{n}$, де m – довільне ціле число між 0 і n , а $n = \lim_{r \rightarrow \infty} \frac{T(r, \bar{G})}{\ln r}$, тобто множина $\delta(C^p \setminus \{\bar{0}\}, \bar{G})$ в цьому випадку скінченна.

Отже, доводимо нашу теорему для випадку трансцендентної цілої кривої \bar{G} , тобто такої, що $T(r, \bar{G}) = o(\ln r)$, $r \rightarrow \infty$.

Припустимо, що існує ціла крива \bar{G} скінченного порядку, в якій множина $\delta(C^p \setminus \{\bar{0}\}, \bar{G})$ незліченна. Для кожного $\alpha \in \delta(C^p \setminus \{\bar{0}\}, \bar{G})$ виберемо рівно по одному вектору $\bar{a} = \bar{a}(\alpha) \in C^p \setminus \{\bar{0}\}$, такому що $\delta(\bar{a}) = \alpha$. Позначимо цю множину через Γ . Вона незліченна, але будь-яка допустима в C^p система векторів, яка належить Γ , не більше ніж зліченна. Будь-які два вектори із Γ лінійно незалежні, оскільки при $\bar{a}' = \lambda \bar{a}''$ маємо $\delta(\bar{a}') = \delta(\bar{a}'')$. Оскільки довільна допустима в C^p система векторів із Γ не більше ніж зліченна, то (див. [4]) існує така не більше ніж зліченна множина підпросторів $B_j \subset L = C^p$, $\dim B_j \leq p-1$, що $\Gamma \in \cup B_j$, а при $\text{card } B_j \geq 2$ множина $\Gamma \cap B_j$ містить незліченну допустиму в B_j систему векторів. Оскільки Γ незліченна, то існує два вектори із Γ

лінійно незалежні, то серед вказаних підпросторів B_j обов'язково знайдеться такий $B = B_n$, що $\dim B = q \geq 2$. Відповідну незліченну підмножину із $\Gamma \cap B$, яка допустима в B , позначимо через M . Виберемо лінійно незалежні вектори $\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_q$ із B та розглянемо для довільного вектора $\bar{b} = \lambda_1 \bar{b}_1 + \dots + \lambda_q \bar{b}_q \in B$ вектор $\bar{\lambda} = (\lambda_1, \dots, \lambda_q)$.

Зауважимо, що множина $K_M = \{\delta(\bar{b}) : \bar{b} \in M\}$ незліченна, оскільки $M \subset \Gamma$, і тому $\delta(\bar{b}') \neq \delta(\bar{b}'')$ при $\bar{b}' \in M$, $\bar{b}'' \in M$, $\bar{b}' \neq \bar{b}''$. Очевидно, існує таке $\delta_0 \in K_M$ і таке $\varepsilon > 0$, що множина $K_0 = K_M \cap [\alpha_0 + \varepsilon, +\infty)$ є незліченною.

Розглянемо в C^q вектор-функцію $\bar{G}_1(z) = (\bar{G}(z)\bar{b}_1, \dots, \bar{G}(z)\bar{b}_q) \cdot \Phi(z)$, де $\Phi(z)$ – деяка мероморфна в C функція (див. [5]) без нулів, полюсами якої є спільні нулі функцій $\bar{G}(z)\bar{b}_1, \dots, \bar{G}(z)\bar{b}_q$. Оскільки вектори $\bar{b}_1, \dots, \bar{b}_q$ лінійно незалежні, то й компоненти $\bar{G}_1(z)$ лінійно незалежні, отже, $\bar{G}_1(z)$ є q -вимірною цілою кривою.

Оскільки для довільного вектора $\bar{\lambda} \in C^q$ і відповідного йому вектора $\bar{b} = \lambda_1 \bar{b}_1 + \dots + \lambda_q \bar{b}_q$ виконується рівність $\bar{G}(z)\bar{b} = \bar{G}_1(z)\bar{\lambda} / \Phi(z)$, то $N(r, \bar{b}, \bar{G}) = N(r, \bar{\lambda}, \bar{G}_1) + N(r, \Phi)$, тоді, згідно з першою основною теоремою для цілих кривих, маємо

$$T(r, \bar{G}) - m(r, \bar{b}, \bar{G}) = T(r, \bar{G}_1) - m(r, \bar{\lambda}, \bar{G}_1) + N(r, \Phi) + O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (2)$$

Відзначимо також, що

$$T(r, \bar{G}_1) + N(r, \Phi) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \left\{ \left| \sum_{k=1}^q \bar{G}(re^{i\varphi}) \cdot \bar{b}_k \right|^2 \right\}^{1/2} d\varphi + O(1) \leq \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \ln \left\{ \left| \sum_{k=1}^q \|\bar{G}(re^{i\varphi})\|^2 \cdot \|\bar{b}_k\|^2 \right\}^{1/2} d\varphi + O(1) = T(r, \bar{G}) + O(1), \quad r \rightarrow \infty. \quad (3)$$

Оскільки для вектора $\bar{b} = \bar{b}(\alpha_0) \in M$ виконується $\delta(\bar{b}) = \alpha_0$, то, згідно (1), знайдеться послідовність додатних чисел $\{r_n\}_{n=1}^{\infty}$, $r_n \rightarrow \infty$, така що

$$m(r_n, \bar{b}, \bar{G}) = \{\alpha_0 + o(1)\} T(r_n, \bar{G}), \quad n \rightarrow \infty.$$

Тоді з (2) ми отримуємо таку нерівність

$$T(r_n, \bar{G}_1) + N(r_n, \Phi) \geq \{1 - \alpha_0 + o(1)\} T(r_n, \bar{G}), \quad n \rightarrow \infty. \quad (4)$$

Для довільного вектора $\bar{b} \in K = \{\bar{b} : \bar{b} \in M, \delta(\bar{b}) \in K_0\}$ і відповідно йому вектора $\bar{\lambda} \in \Lambda = \{\bar{\lambda} = (\bar{\lambda}_1, \dots, \bar{\lambda}_q) : \lambda_1 \bar{b}_1 + \dots + \lambda_q \bar{b}_q \in K\}$ отримаємо, згідно означення K_0 , враховуючи (3) та (4), таку нерівність:

$$\begin{aligned} m(r_n, \bar{\lambda}, \bar{G}_1) &\geq m(r_n, \bar{b}, \bar{G}) + \{1 - \alpha_0 + o(1)\} T(r_n, \bar{G}) - \\ &- T(r_n, \bar{G}) + O(1) \geq \{\delta(\bar{b}) + o(1)\} T(r_n, \bar{G}) - \{\alpha_0 + o(1)\} T(r_n, \bar{G}) \geq \\ &\geq \{\varepsilon + o(1)\} T(r_n, \bar{G}) \geq \{\varepsilon + o(1)\} T(r_n, \bar{G}_1), \quad n \rightarrow \infty. \end{aligned} \quad (5)$$

Оскільки $K \subset M$ і M – допустима в B система векторів, то, очевидно, Λ – допустима система векторів в C^q . Тоді, якщо через Q позначити довільну скінченну підмножину із Λ , то для цілої кривої \bar{G}_1 , згідно з другою основною теоремою, повинна виконуватись нерівність

$$\sum_{\bar{\lambda} \in Q} m(r_n, \bar{\lambda}, \bar{G}_1) \leq \{q + o(1)\} T(r_n, \bar{G}), \quad n \rightarrow \infty. \quad (6)$$

Але для довільного вектора $\bar{\lambda} \in Q \subset \Lambda$ виконується нерівність (5).

Тому, взявши $\text{card } Q = \left[\frac{q}{\varepsilon} \right] + 2$, легко бачимо, що (5) не виконується. Отримане протиріччя доводить нашу теорему.

Література

1. Петренко В.П. Целые кривые / В.П. Петренко. – Ч.: Вища школа, 1984. – 136 с.
2. Гольдберг А.А. Некоторые вопросы теории распределения значений / А.А. Гольдберг // В кн.: Г. Виттих. Новейшие исследования по однозначным аналитическим функциям. – М.: Физматгиз, 1960. – С. 263-300.
3. Савчук Я.И. О множестве дефектных векторов целых кривых / Я.И. Савчук // Укр. мат. журн. – 1983. – Т. 35, № 3. – С. 385-389.
4. Савчук Я.И. Структура множества дефектных векторов целых и аналитических кривых конечного порядка / Я.И. Савчук // Укр. мат. журн. – 1985. – Т. 37, № 5. – С. 609-615.

Стаття постуила в редакційну колегію 23.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Загороднюком А.В.

ABOUT GREAT NUMBER OF VALUES OF SIZES OF DEFECTS FOR WHOLE ONE CURVE OF SCINCENNOGO ORDER

Y. I. Savchuk

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas,
76019, Ivano-Frankivsk, Carpat'ska street, 15;
tel. +380 (3422) 4-21-23; e-mail: math@nung.edu.ua

It is shown, that great number of values of sizes of defects for the arbitrary whole curve of finished order no more than calculated although the great number not of collinear between itself imperfect vectors for such crooked can have power continuum.

Key words: whole curve, description of growth, function of approaching, nevanlinna imperfect vector, size of defect.

МЕТОД ЧАСТИННОГО УСЕРЕДНЕННЯ В СИСТЕМАХ ІНТЕГРО-ДИФЕРЕНЦІАЛЬНИХ РІВНЯНЬ З ПОДВІЙНИМИ ІМПУЛЬСАМИ

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*

До систем інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією застосовується один з варіантів методу усереднювання Крилова-Боголюбова-Митропольського – метод замороження.

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

Системи інтегро-диференціальних рівнянь з подвійною імпульсною дією описують численні процеси фізичних, технічних, біологічних явищ, які піддаються і піддавались у процесі своєї еволюції короткочасним збуренням. Важливою властивістю математичної моделі, записаної за допомогою інтегро-диференціальної системи з подвійною імпульсною дією є те, що вона дозволяє враховувати не тільки процес в даний момент часу, але його передісторію і ті збурення, які відбувались в цій передісторії.

Розробка нових методів усереднення опирається на класично розроблену теорію систем диференціальних рівнянь з імпульсною дією, запропоновану А. М. Самойленком і М. О. Перестюком [1-4].

В даному дослідженні до систем інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією застосовується метод замороження, як один з варіантів методу усереднювання Крилова-Боголюбова-Митропольського [5, 6]. Суть цього методу полягає в тому, що системі інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією ставиться у відповідність інша заморожена система диференціальних рівнянь з подвійною імпульсною дією, яка в подальшому усереднюється. Наводяться умови, за яких різниця між розв'язками точної, замороженої і усередненої систем за достатньо малого параметра ε стає як завгодно малою на як завгодно великому, проте скінченному, інтервалі часу.

Розглянемо систему інтегро-диференціальних рівнянь із подвійною імпульсною дією

$$x'(t) = \varepsilon F \left(t, x(t), \int_0^t K(t, s, x(s)) ds + \sum_{0 < s_j < t} J_j(x(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i, \quad (1)$$

$$\Delta x|_{t=t_i} = \varepsilon G_i(x), \quad i, j = 0, 1, \dots,$$

де $\varepsilon > 0$ – малий параметр; функції $F(t, x, y)$, $K(t, s, x)$, $J_j(x)$, $G_i(x)$ визначені і неперервні в області

$R = \{t, s \in [0, T], x = (x_1, \dots, x_n) \in D, y = (y_1, \dots, y_m) \in D_1\}$ (D, D_1 – обмежені області евклідових просторів E_n і E_m відповідно; $T = \varepsilon^{-1}L$, де L – довільна стала). Розв'язок системи (1) задовольняє початковій умові

$$x(0) = x_0. \quad (2)$$

Системі (1) ставимо у відповідність заморожену систему

$$y'(t) = \varepsilon F \left(t, y(t), \int_0^t K(t, s, y(s)) ds + \sum_{0 < s_j < t} J_j(y(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i, \quad (3)$$

$$\Delta y|_{t=t_i} = \varepsilon G_i(y), \quad i, j = 0, 1, \dots$$

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 $0 < t < T$.

Теорема 1. Нехай функції $F(t, x, z)$, $K(t, s, x)$, $J_j(x)$, $G_i(x)$ задовольняють умовам: для деяких областей D, D_1 можна вказати такі додатні константи 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 виконані нерівності

$$|F(t, x, z)| \leq M_1, \quad |K(t, s, x)| \leq M_2, \quad |J_j(x)| \leq M_3, \quad |G_i(x)| \leq M_4,$$

$$|F(t, x, z) - F(t, x', z')| \leq \lambda_1 |x - x'| + \lambda_2 |z - z'|,$$

$$|K(t, s, x) - K(t, s, x')| \leq \lambda_3 |x - x'|,$$

$$|J_j(x) - J_j(x')| \leq \lambda_4 |x - x'|, \quad |G_i(x) - G_i(x')| \leq \lambda_5 |x - x'|.$$

Тоді будь-якому як завгодно малому η та як завгодно великому L можна поставити у відповідність таке додатне ε_0 , що для розв'язків $x(t), y(t)$ систем (1) і (3) відповідно в інтервалі $0 < t < \frac{L}{\varepsilon}$ справедлива нерівність

$$|x(t) - y(t)| < \eta. \quad (4)$$

Побудуємо для системи (2) відповідну усереднену систему

$$z'(t) = \varepsilon F_0 \left(z(t), \int_0^t K_0(s, z(t)) ds + J_j^0(z(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i, \quad (5)$$

$$\Delta z|_{t=t_i} = \varepsilon G_j^0(z), \quad i, j = 0, 1, \dots,$$

$$F_0 \left(z(t), \int_0^t K_0(s, z(t)) ds + J_j^0(z(s_j - 0)) \right) =$$

$$= \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t F \left(t, z(t), \int_0^t K(t, s, z(s)) ds + \sum_{0 < s_j < t} J_j(x(s_j - 0)) \right);$$

$$K_0(s, z(t)) = \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \int_0^t K(t, s, z(s)) ds;$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{0 < s_j < t} J_j(z(s_j - 0))}{t} = J_j^0(z(s_j - 0));$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{\sum_{0 < t_i < t} G_i(z(t_i - 0))}{t} = G_i^0(z(t_i - 0)).$$

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

Теорема 2. Нехай функції $F(t, x, u)$, $K(t, s, x)$, $J_j(x)$, $G_i(x)$ задовольняють умовам:

а) для деяких областей D, D_1 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, u, x', u' із цих областей виконані нерівності

$$|F(t, x, u)| \leq M_1, \quad |K(t, s, x)| \leq M_2, \quad |J_j(x)| \leq M_3, \quad |G_i(x)| \leq M_4,$$

$$|F(t, x, u) - F(t, x', u')| \leq \lambda_1 |x - x'| + \lambda_2 |u - u'|,$$

$$|K(t, s, x) - K(t, s, x')| \leq \lambda_3 |x - x'|,$$

$$|J_j(x) - J_j(x')| \leq \lambda_4 |x - x'|, \quad |G_i(x) - G_i(x')| \leq \lambda_5 |x - x'|;$$

б) в областях D, D_1 існують рівномірні щодо x, u границі

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

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{0 < s_j < t} J_j(x(s_j - 0)) = J_j^0(x(s_j - 0)), \quad \lim_{t \rightarrow \infty} \frac{1}{t} \sum_{0 < t_i < t} G_i(x(t_i - 0)) = G_i^0(x(t_i - 0)).$$

Тоді будь-яким як завгодно малим ρ, η та як завгодно великому L можна поставити у відповідність таке додатне ε_0 , що розв'язок $z(t)$ системи

$$z'(t) = \varepsilon F_0 \left(z(t), \int_0^t K_0(s, z(t)) ds + J_j^0(z(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i,$$

$$\Delta z|_{t=t_i} = \varepsilon G_i^0(z), \quad i, j = 0, 1, \dots,$$

визначений на інтервалі $0 < t < \infty$ і лежить в області D разом зі своїм ρ -околом, а для $0 < \varepsilon < \varepsilon_0$ в інтервалі $0 < t < \frac{L}{\varepsilon}$ справедлива нерівність

$$|x(t) - z(t)| < \eta,$$

в якій $x(t)$ – розв'язок системи

$$x'(t) = \varepsilon F \left(t, x(t), \int_0^t K(t, s, x(s)) ds + \sum_{0 < s_j < t} J_j(x(s_j - 0)) \right), \quad t \neq t_i,$$

$\Delta x|_{t=t_i} = \varepsilon G_i(x)$, $i, j = 0, 1, \dots$,
що дорівнює $z(0)$ при $t = 0$.

Література

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. Методы нелинейной механики / Ю.О. Митропольский. – К.: Наукова думка, 2002.

Стаття поступила в редакційну колегію 09.07.2009 р.
Рекомендовано до друку академіком НАН України,
професором Перестюком М.О.

THE METHOD OF PART MIDDLING IN THE INTEGRAL-DIFFERENTIAL SYSTEMS WITH DOUBLE IMPULSIVE ACTION

S. S. Gulka

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpathka street, 15;
ph. +380 (3422) 42123; e-mail: math@nung.edu.ua

The method of middling by Crilov-Bogolubov-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.

ПРО СТІЙКІСТЬ У СИСТЕМАХ З ІМПУЛЬСАМИ

С. І. Гургула¹, Р. І. Собкович²¹Івано-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.ua²Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
Україна, 76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;тел. +380 (342) 59-60-16; e-mail: algeo@pu.if.ua

За допомогою другого методу Ляпунова одержано достатні умови стійкості, асимптотичної стійкості і нестійкості тривіального розв'язку системи звичайних диференціальних рівнянь з імпульсною дією у фіксовані моменти часу.

Ключові слова: імпульсна дія, стійкість, функція Ляпунова.

Досліджуватимемо питання стійкості тривіального розв'язку системи звичайних диференціальних рівнянь з імпульсною дією у фіксовані моменти часу

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(t, x), \quad t \neq t_i, \\ \Delta x|_{t=t_i} &\equiv x(t_i+0) - x(t_i) = I_i(x), \end{aligned} \quad (1)$$

де $t \geq t_0$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$, $f = (f_1, f_2, \dots, f_n) \in R^n$, $I_i \in R^n$, $i = 1, 2, \dots$.

Функція $f(t, x)$ вважається заданою в області

$$Z = \{t \geq t_0, x \in \bar{J}_h\}, \quad (2)$$

де $\bar{J}_h = \{x \in R^n, \|x\| \leq h, h > 0\}$ і $f(t, 0) = 0$, $t \geq t_0$, функції $I_i(x)$ визначені і неперервні в кулі \bar{J}_h , $I_i(0) = 0$, $i = 1, 2, \dots$. Відносно послідовності моментів часу $\{t_i\}$ припускаємо, що $t_i > t_{i-1}$, $i = 1, 2, \dots$, і $t_i \rightarrow \infty$ при $i \rightarrow \infty$.

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

Тоді функція $\frac{i(t)}{t-t_0}$ означатиме відносну частоту імпульсних збурень; припустимо, що існує скінченна границя

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \frac{i(t)}{t-t_0} = p > 0. \quad (3)$$

Функція Ляпунова, про яку йтиметься далі, вважається скалярною і неперервно диференційовною по всіх своїх аргументах; функції $\varphi(s)$ і $\psi(s)$ вважаються неперервними, причому $\varphi(0) = \psi(0) = 0$,

$\varphi(s) > 0$, $\psi(s) > 0$ при $s > 0$, функція $\rho(t)$ – заданою і неперервною при $t \geq t_0$.

Справедливі такі твердження.

Теорема 1. Нехай для системи (1) існує додатно визначена функція Ляпунова $V(t, x)$, функції $\varphi(s)$, $\psi(s)$ і $\rho(t) \leq 0$ такі, що повсюдно в області (2) виконані нерівності

$$\frac{\partial V}{\partial t} + \langle \text{grad } V, f \rangle \leq \rho(t)\varphi(V), \quad (4)$$

$$V(t_i, x + I_i(x)) \leq \psi(V(t_i, x)), \quad i = 1, 2, \dots, \quad (5)$$

а також можна вказати константу ρ_0 таку, що при $t > t_0$

$$\frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \rho(\tau) d\tau \leq -\rho_0. \quad (6)$$

Тоді, якщо за деякого $a_0 > 0$ для всіх $a \in (0, a_0]$ виконана нерівність

$$\int_a^{\psi(a)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \frac{\rho_0}{p} - \gamma, \quad \gamma > 0, \quad (7)$$

то тривіальний розв'язок системи (1) асимптотично стійкий за Ляпуновим.

Доведення. Нехай $0 < \varepsilon < h$ і $l = \inf_{t \geq t_0, \|x\| \geq \varepsilon} V(t, x) \leq a_0$. Виберемо $\delta > 0$

так, щоб виконувалась нерівність $m = \sup_{\|x\| < \delta} V(t_0, x) < l$, і нехай

$x(t)$, $x(t_0) = x_0 \in J_\delta$ – довільний розв'язок системи (1). Зауважимо, оскільки (3) існує таке $T_0 > t_0$, що для всіх $t > T_0$ виконується нерівність

$$\left| \frac{i(t)}{t-t_0} - p \right| < \frac{\gamma_1 p^2}{\rho_0 + \gamma p}, \quad \text{де } 0 < \gamma_1 < \gamma. \quad \text{Для таких } t \text{ маємо}$$

$$\left| \frac{i(t)}{(t-t_0)p} - 1 \right| < \frac{\gamma_1 p}{\rho_0 + \gamma p}, \quad (8)$$

а також

$$p \left(1 - \frac{\gamma_1 p}{\rho_0 + \gamma p} \right) < \frac{i(t)}{t-t_0} < p \left(1 + \frac{\gamma_1 p}{\rho_0 + \gamma p} \right). \quad (9)$$

Враховуючи неперервну залежність розв'язків системи (1) від початкових даних, можна вважати, що x_0 вибрано таким, що $x(t) \in J_\varepsilon$ для $t \in [t_0, T_0]$. Покажемо, що $x(t) \in J_\varepsilon$ і при $t > T_0$. Припустимо протилежне: $x(t)$ з часом покине кулю J_ε . Розглянемо функцію $v(t) = V(t, x(t))$. Оскільки в нерівності (4) $v'(t)$ недодатна на проміжках $(t_{i-1}, t_i]$, отже $v(t)$ – незростаюча на цих проміжках, а тому вийти за межі кулі J_ε (для цього повинна здійснитись нерівність $v(t) \geq l$) розв'язок може тільки за

рахунок імпульсу, тобто в один з моментів часу t_i . Нехай t_k – перший момент часу, коли $x(t)$ покине кулю J_ε , тобто $v(t) < l$, $t \in [t_0, t_k]$ і $v(t_k + 0) \geq l$ ($t_k > T_0$). Із нерівності (4) випливає, що $v'(t) \leq \rho(t)\varphi(v(t))$, $t \neq t_i$, звідки одержуємо

$$\int_{t_{i-1}}^{t_i} \frac{v'(\tau) d\tau}{\varphi(v(\tau))} \leq \int_{t_{i-1}}^{t_i} \rho(\tau) d\tau$$

або після заміни $v(\tau) = s$ для $i = 1, 2, \dots, k$ будемо мати:

$$\int_{v(t_{i-1}+0)}^{v(t_i)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \int_{t_{i-1}}^{t_i} \rho(\tau) d\tau. \quad (10)$$

Враховуючи, що оскільки (5) $v(t_i + 0) \leq \psi(v(t_i))$, із нерівності (7) для $i = 1, 2, \dots, k$ отримуємо

$$\int_{v(t_i)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \frac{\rho_0}{p} - \gamma. \quad (11)$$

Шляхом почленного додавання нерівностей (10) і (11) одержуємо

$$\int_{v(t_0)}^{v(t_k+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq k \left(\frac{\rho_0}{p} - \gamma \right) + \int_{t_0}^{t_k} \rho(\tau) d\tau$$

або

$$\frac{1}{t_k - t_0} \int_{v(t_0)}^{v(t_k+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \frac{i(t_k + 0)}{t_k - t_0} \left(\frac{\rho_0}{p} - \gamma \right) + \frac{1}{t_k - t_0} \int_{t_0}^{t_k} \rho(\tau) d\tau, \quad (12)$$

що з урахуванням (6), (8) і (9) дає підстави записати

$$\begin{aligned} \frac{1}{t_k - t_0} \int_{v(t_0)}^{v(t_k+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} &\leq \frac{i(t_k + 0)}{t_k - t_0} \left(\frac{\rho_0}{p} - \gamma \right) - \rho_0 = \rho_0 \left(\frac{i(t_k + 0)}{(t_k - t_0)p} - 1 \right) - \gamma \frac{i(t_k + 0)}{t_k - t_0} < \\ &< \rho_0 \frac{\gamma_1 p}{\rho_0 + \gamma p} - \gamma p \left(1 - \frac{\gamma_1 p}{\rho_0 + \gamma p} \right) = p(\gamma_1 - \gamma) \end{aligned}$$

або

$$\frac{1}{t_k - t_0} \int_{v(t_0)}^{v(t_k+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} < -p(\gamma - \gamma_1) < 0. \quad (13)$$

Звідси $v(t_k + 0) < v(t_0) \leq m < l$, що суперечить зробленому припущенню. Залишилось довести, що $\lim_{t \rightarrow \infty} v(t) = 0$. Але, оскільки $v(t)$ спадає на кожному з проміжків $(t_{i-1}, t_i]$, досить показати, що $v(t_i + 0) \rightarrow 0$ при $i \rightarrow \infty$. Для цього нерівність (13) запишемо у виді $\int_{v(t_0)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} > p(\gamma - \gamma_1)(t_i - t_0)$. Тоді $\lim_{i \rightarrow \infty} \int_{v(t_0)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} = \infty$, що можливо тільки за умови, що $v(t_i + 0) \rightarrow 0$ при $i \rightarrow \infty$. Теорему доведено.

Зауважимо, що якщо замість умови (3) вимагати виконання нерівності $\frac{i(t)}{t - t_0} \leq p$ при $t > t_0$, а в нерівності (7) покласти $\gamma = 0$, то легко довести, що розв'язок $x \equiv 0$ системи (1) буде стійким за Ляпуновим. Аналогічно доводиться теорема 2.

Теорема 2. Нехай для системи (1) існує додатно визначена функція Ляпунова $V(t, x)$, функції $\varphi(s)$, $\psi(s)$ і $\rho(t) \geq 0$ такі, що повсюдно в області (2) виконані нерівності (4) і (5), а також можна вказати константу ρ_0 таку, що при $t > t_0$

$$\frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t \rho(\tau) d\tau \leq \rho_0. \quad (14)$$

Тоді, якщо за деякого $a_0 > 0$ для всіх $a \in (0, a_0]$ виконана нерівність

$$\int_{\psi(a)}^a \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \frac{\rho_0}{p} + \gamma, \quad \gamma > 0, \quad (15)$$

то тривіальний розв'язок системи (1) асимптотично стійкий.

Знову ж таки, якщо замість умови (3) вимагати виконання нерівності $\frac{i(t)}{t - t_0} \geq p > 0$ за всіх досить великих t , а в нерівності (15) покласти $\gamma = 0$, то можна гарантувати стійкість тривіального розв'язку системи (1).

Переходимо до теорем про нестійкість. Функція Ляпунова $V(t, x)$, яка фігурує в цих теоремах, володіє такими властивостями:

а) область додатності $V(t, x)$ $D = \{(t, x) \in Z, V(t, x) > 0\}$ при всякому $t \geq t_0$ має непорожній відкритий переріз гіперплощиною $t = const$, 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), функції $\varphi(s)$, $\psi(s)$ і $\rho(t) \leq 0$ такі, що в області D виконані нерівності

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

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

а також можна вказати константу ρ_0 таку, що при $t > t_0$

$$\frac{1}{t - t_0} \int_{t_0}^t \rho(\tau) d\tau \geq -\rho_0. \quad (18)$$

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

$$\int_a^{\psi(a)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \frac{\rho_0}{p} + \gamma, \quad (19)$$

то тривіальний розв'язок системи (1) нестійкий.

Доведення. Нехай $\delta > 0$ як завгодно мале. За умовою знайдеться $x_0 \in J_\delta$ таке, що $V(t_0, x_0) > 0$. Покажемо, що розв'язок $x(t)$, $x(t_0) = x_0$, з часом вийде за межі кулі J_h . Припустимо протилежне: $x(t) \in J_h$, $t \geq t_0$. Тоді $(t, x(t)) \in D$. Справді, нехай $v(t) = V(t, x(t))$ і $t^* \in (t_i, t_{i+1}]$ – момент часу, коли вперше виконається рівність $v(t) = 0$. Оскільки (16) $v'(t) \geq \rho(t)\varphi(v(t))$, $t \neq t_i$, тоді

$$\int_{t_i}^{t^*} \frac{v'(\tau) d\tau}{\varphi(v(\tau))} \geq \int_{t_i}^{t^*} \rho(\tau) d\tau.$$

Звідси після заміни $s = v(\tau)$ і з урахуванням (18) випливає

$$\int_{v(t^*)}^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \rho_0(t^* - t_i),$$

що неможливо, бо $v(t^*) = 0$, а оскільки (19) невластний інтеграл $\int_0^{v(t_i+0)} \frac{ds}{\varphi(s)}$ розбіжний. Отже $(t, x(t)) \in D$, що означає що $v(t)$ – обмежена функція. Діючи таким же чином як і при доведенні теореми 1, легко отримати нерівність (для всякого $t > t_0$)

$$\frac{1}{t-t_0} \int_{v(t_0)}^{v(t)} \frac{ds}{\varphi(s)} \geq \frac{i(t)}{t-t_0} \left(\frac{\rho_0}{p} + \gamma \right) + \frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \rho(\tau) d\tau.$$

Оскільки ми можемо вважати, що для всіх досить великих t виконані нерівності (7) і (8), то з останньої нерівності одержуємо

$$\int_{v(t_0)}^{v(t)} \frac{ds}{\varphi(s)} > p(\gamma - \gamma_1)(t - t_0), \quad 0 < \gamma_1 < \gamma,$$

що суперечить обмеженості функції $v(t)$ при $t \rightarrow \infty$. Теорему доведено.

Аналогічно може бути доведена така теорема.

Теорема 4. Нехай для системи (1) існує функція Ляпунова $V(t, x)$, наділена властивостями а) і б), функції $\varphi(s)$, $\psi(s)$ і $\rho(t) \geq 0$ такі, що в області D виконані нерівності (16) і (17), а також можна вказати константу ρ_0 таку, що при $t > t_0$

$$\frac{1}{t-t_0} \int_{t_0}^t \rho(\tau) d\tau \geq \rho_0. \quad (20)$$

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

$$\int_{\psi(a)}^a \frac{ds}{\varphi(s)} \leq \frac{\rho_0}{p} - \gamma, \quad (21)$$

то розв'язок $x \equiv 0$ системи (1) нестійкий.

Зауважимо, що твердження теорем про нестійкість залишаться в силі, якщо під p розуміти константу, таку що для всіх досить великих t виконана нерівність $\frac{i(t)}{t-t_0} \geq p$ (в теоремі 3), або нерівність $\frac{i(t)}{t-t_0} \leq p$ (в теоремі 4).

Література

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, М.О. 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.
5. Гургула С.І. Про другий метод Ляпунова в системах з імпульсною дією / С.І. Гургула, І.Й. Перкатюк // Прикарпатський вісник НТШ. Число. – 2008. – №1(1). – С. 9-15.

Стаття постуила в редакційну колегію 09.07.2009 р.
Рекомендовано до друку академіком НАН України,
професором Перестюком М.О.

ABOUT STABILITY IN THE SYSTEMS WITH IMPULSES

S. I. Gurgula¹, R. I. Sobkovych²

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka street, 15;

ph. +380 (3422) 4-21-23; e-mail: math@nung.edu.ua

²PreCarpathian National University by Vasil Stefanic;

76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenko street, 57;

ph. (3422) 59-60-16; e-mail: algeo@pu.if.ua

With the help of Liapunov's secondary method were issued criteries of stability, asymptotic stability and non-stability of simple solution of the elementary system of differential equations with impulsive action in the fixed moments of time.

Key words: impulsive action, stability, function of Liapunov.

РЕКУРСІЇ ТА ПОЗИЦІЙНІ СИСТЕМИ ЧИСЛЕННЯ

Р. А. Заторський

Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника;
76018, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка 57;
e-mail: romazz@rambler.ru

Узагальнюються класичні позиційні системи числення.

Ключові слова: системи числення, трикутна матриця, перманент.

1. Вступ. Важко переоцінити роль позиційних систем числення у розвитку математики та обчислювальної техніки. Сьогодні відомі найрізноманітніші системи числення: позиційні, непозиційні, змішані, фібоначчіві, біноміальні, факторіальні тощо. Нова епоха у розвитку систем числення розпочалася із виникненням ЕОМ. При цьому бінарні системи числення та системи числення, основою яких є степені двійки, виявилися найзручнішими формами представлення чисел у різних обчислювальних системах.

Метою статті є дослідження зв'язків позиційних систем числення із нормальними числовими послідовностями, що генеруються деяким класом лінійних рекурентних рівнянь із сталими коефіцієнтами. Такий підхід дозволяє уніфікувати дослідження позиційних та змішаних систем числення і запровадити ряд нових змішаних систем.

2. Позиційні системи числення k -го порядку

Кожну позиційну систему числення пов'яжемо із деяким вектором (a_1, a_2, \dots, a_k) ,

цілі компоненти якого задовольняють нерівності $2 \leq a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_k \geq 0$.

Вектор (1) називатимемо основою системи числення k -го порядку.

Розглянемо лінійне рекурентне рівняння

$$u_n = a_1 u_{n-1} + a_2 u_{n-2} + \dots + a_k u_{n-k}, \quad u_{<0} = 0,$$

що задається вектором (1). Це рівняння, внаслідок того, що виконуються нерівності (2), генерує зростаючу нормальну числову послідовність (див. [1], стор 124)

$$u_0 = 1, u_1 = [a_1], u_2 = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \ a_1 \end{bmatrix}, \dots, u_{k-1} = \begin{bmatrix} a_1 \\ \frac{a_2}{a_1} \ a_1 \\ \dots \\ \frac{a_{k-1}}{a_{k-2}} \ \frac{a_{k-2}}{a_{k-3}} \ \dots \ a_1 \end{bmatrix}_{k-1}.$$

Кожне ціле невід'ємне число n , за допомогою жадного алгоритму, можна однозначно подати у вигляді лінійної комбінації

$$n = \sum_{i=0}^r n_i u_i = \overline{n_r n_{r-1} \dots n_1 n_0}_{(a_1, a_2, \dots, a_k)}.$$

Числа $n_i, i = 0, 1, \dots, r$ назвемо цифрами i -го розряду числа

$$\overline{n_r n_{r-1} \dots n_1 n_0}_{(a_1, a_2, \dots, a_k)},$$

що є зображенням числа n у позиційній системі числення з основою (a_1, a_2, \dots, a_k) . Причому, згідно з жадним алгоритмом, його цифри задовольняють нерівності:

$$0 \leq n_i \leq \left\lfloor \frac{u_{i+1} - 1}{u_i} \right\rfloor, \quad i = 0, 1, \dots, r, \quad (3)$$

де символом $\lfloor \cdot \rfloor$ позначено цілу частину числа. Нерівності (3) можна спростити:

$$\begin{aligned} 0 \leq n_0 \leq \frac{u_1 - 1}{u_0} = a_1 - 1, \quad 0 \leq n_i \leq \left\lfloor \frac{u_{i+1} - 1}{u_i} \right\rfloor = \\ = \left\lfloor \frac{a_1 u_i + a_2 u_{i-1} + \dots + a_k u_{i-k+1} - 1}{u_i} \right\rfloor = \\ = a_1 + \left\lfloor \frac{a_2 u_{i-1} + \dots + a_k u_{i-k+1} - 1}{a_1 u_{i-1} + a_2 u_{i-2} + \dots + a_k u_{i-k}} \right\rfloor = a_1. \end{aligned}$$

Таким чином, цифри позиційної системи числення з основою (a_1, a_2, \dots, a_k) задовольняють нерівності

$$0 \leq n_0 \leq a_1 - 1, \quad 0 \leq n_i \leq a_1, \quad i = 1, 2, \dots \quad (4)$$

Отже, перехід від нульового до першого розряду відбувається тоді, коли цифра $a_1 - 1$ нульового розряду збільшується на одиницю, тобто коли у натуральному ряді чисел зустрічається перший член нормальної числової послідовності $u_1 = a_1 u_0$. Перехід від першого до другого розряду відбувається, коли число

$$a_1^2 + a_2 - 1 = \overline{a_2 a_1 - 1}_{(a_1, a_2, \dots, a_k)}$$

зростає на одиницю, тобто коли у натуральному ряді чисел зустрічається другий член послідовності $u_2 = a_1 u_1 + a_2 u_0$ і т.д. Отже, зображення натурального числа за допомогою позиційної системи числення з основою (a_1, a_2, \dots, a_k) не може мати вигляд $\dots a_1$, чи вигляд $\dots a_2 a_1$ і т.д. чи, зрештою, вигляд $\dots a_k \dots a_2 a_1$. Крім цього, очевидно, що такі зображення не можуть набувати також вигляду $\dots a_k \dots a_2 a_1 \dots$.

Зауваження 1. Позиційні системи числення k -го порядку з основою (a_1, a_2, \dots, a_k) є змішаними позиційними системами, причому позиційні системи числення першого порядку з основою (q) співпадають із класичними системами числення з основою q .

Приклад 1. Розглянемо позиційну систему числення третього порядку з основою $(2,2,1)$. Рекурентне рівняння

$$u_n = 2u_{n-1} + 2u_{n-2} + u_{n-3}$$

генерує нормальну числову послідовність

$$u_0 = 1, u_1 = 2, u_2 = 6, u_3 = 17, u_4 = 48, u_5 = 136, \dots$$

Згідно з (4) цифра нульового розряду може набувати лише значення 0 і 1, а всі інші цифри значення із множини $\{0,1,2\}$, причому жодне число у цій системі числення не може мати закінчення $\dots 2$, $\dots 22$, $\dots 221$ чи $\dots 221\dots$.

Зобразимо кілька перших натуральних чисел у вигляді чисел з основою $(2,2,1)$:

$$1 = \overline{1}_{(2,2,1)}, 2 = \overline{10}_{(2,2,1)}, 3 = \overline{11}_{(2,2,1)}, 4 = \overline{20}_{(2,2,1)}, 5 = \overline{21}_{(2,2,1)}, 6 = \overline{100}_{(2,2,1)},$$

$$7 = \overline{101}_{(2,2,1)}, 8 = \overline{110}_{(2,2,1)}, 9 = \overline{111}_{(2,2,1)}, 10 = \overline{120}_{(2,2,1)}, 11 = \overline{121}_{(2,2,1)},$$

$$12 = \overline{200}_{(2,2,1)}, 13 = \overline{201}_{(2,2,1)}, 14 = \overline{210}_{(2,2,1)}, 15 = \overline{211}_{(2,2,1)}, 16 = \overline{220}_{(2,2,1)},$$

$$17 = \overline{1000}_{(2,2,1)}, 18 = \overline{1001}_{(2,2,1)}, 19 = \overline{1010}_{(2,2,1)}, 20 = \overline{1011}_{(2,2,1)}$$

3. Бінарні системи числення

Розглянемо важливий випадок, коли основа позиційної системи числення задається вектором $(1, a_2, a_3, \dots, a_k)$. Позаяк випадок, коли

$$a_2 = a_3 = \dots = a_k = 0$$

тривіальний, бо може трактуватися як зображення натуральних чисел зарубками на паличці, то ми його опускаємо і розглядаємо лише ті випадки, коли виконуються нерівності

$$1 = a_1 \geq a_2 \geq \dots \geq a_k \geq 0, a_2 + \dots + a_k \geq 1.$$

У цьому випадку рекурентне рівняння

$$u_n = a_1 u_{n-1} + a_2 u_{n-2} + \dots + a_k u_{n-k}, u_{-1} = 1, u_{<-1} = 0$$

генерує числову послідовність

$$u_0 = 1, u_1 = a_1 + a_2 = 2, \dots$$

Цифрами цієї системи числення є лише нулі та одиниці, причому представлення чисел у цій системі числення не може містити послідовно стільки одиниць, скільки їх є у основі системи. Зауважимо також, що зображення числа у системі числення, основою якої є вектор, всі m компонент якого дорівнюють одиниці, не може закінчуватися двома, трьома і т.д. m одиницями. Такі системи числення хоч і є бінарними, але не є економними, бо через відповідні заборони для зображення числа потребують дещо більше бітів ніж звичайна двійкова система числення. Пригадаємо, що позиційну систему числення з основою $(1,1)$ називають фібоначчівською системою числення.

Приклад 2. Порівняємо економність зображення кількох перших натуральних чисел відповідно у системах (2) , $(1,1)$, $(1,1,1)$:

$$1 = 1_{(2)} = 1_{(1,1)} = 1_{(1,1,1)}$$

$$2 = 10_{(2)} = 10_{(1,1)} = 10_{(1,1,1)}$$

$$3 = 11_{(2)} = 100_{(1,1)} = 100_{(1,1,1)}$$

$$4 = 100_{(2)} = 101_{(1,1)} = 101_{(1,1,1)}$$

$$5 = 101_{(2)} = 1000_{(1,1)} = 110_{(1,1,1)}$$

$$6 = 110_{(2)} = 1001_{(1,1)} = 1000_{(1,1,1)}$$

$$7 = 111_{(2)} = 1010_{(1,1)} = 1001_{(1,1,1)}$$

$$8 = 1000_{(2)} = 10000_{(1,1)} = 1010_{(1,1,1)}$$

$$9 = 1001_{(2)} = 10001_{(1,1)} = 1100_{(1,1,1)}$$

$$10 = 1010_{(2)} = 10010_{(1,1)} = 1101_{(1,1,1)}$$

$$11 = 1011_{(2)} = 10100_{(1,1)} = 10000_{(1,1,1)}$$

Зауваження 2. Позиційні системи числення k -го порядку з основою (a_1, a_2, \dots, a_k) узагальнюють теорему Цеккендорфа [2].

Зауважимо також, що позиційну бінарну систему числення можна побудувати також за допомогою послідовності простих чисел, якщо до неї долучити одиницю:

$$1, 2, 3, 5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, \dots$$

Цей факт впливає з того, що першими двома числами такої послідовності є одиниця і двійка та постулату Бертрана, який стверджує, що для довільного натурального числа $n \geq 2$ існує просте число p^* , таке, що виконуються нерівності $n < p^* < 2n$. Справді, нехай n – деяке натуральне число і p – найбільше просте число, що його не перевищує. Тоді, внаслідок постулату Бертрана нерівність $p < 2p \leq n$ неможлива.

Література

1. Заторський Р.А. Застосування параперманентів до лінійних рекурентних рівнянь / Р.А. Заторський, І.М. Литвиненко // Наукові вісті НТУУ "КПІ". – 2008. – №5. – С. 122-128.
2. Zeckendorf E. Representation des nombres naturels par une somme de nombres de Fibonacci ou de nombres de Lucas / E. Zeckendorf // Bulletin de la Societe Royale des Sciences de Liege. – 1972. – №41. – P. 179-182.

Стаття поступила в редакційну колегію 24.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Дроздом Ю.В.

RECURSIONS AND POSITIONAL NOTATIONS

R. A. Zatorsky

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

Classic positional notations are summarized.

Key words: positional notations, parapermanents, triangular matrix.

НЕЧІТКІ ПЕРЕВАГИ В ЗАДАЧАХ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

І. В. Никифорчин

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76018, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;
тел. +380 (342) 59-60-16; e-mail: ira.nyk@gmail.com

Запропоновано математичний формалізм використання нечітких переваг для підтримки прийняття рішень в умовах невизначеності. Виявлено зв'язки з ідемпотентними узагальненнями опуклості.

Ключові слова: прийняття рішень, нечітке відношення, ідемпотентна опуклість, ґратка.

Прийняття рішень в умовах невизначеності, особливо за наявності кількох критеріїв (MCDA – multicriteria decision making [1]) спирається на порівняння альтернатив з допомогою тотального чи часткового порядку. Відповідний порядок формується точними чи наближеними методами на основі обраної метри і експериментальних та (чи) експертних даних. Часто оцінюючим функціоналом є нечіткий інтеграл, наприклад, інтеграл Шоке чи, рідше, інтеграл Сугено [1,3]. Водночас і вихідні дані, і результат порівняння відображаються у формі однозначно визначеного (не нечіткого) відношення, що не дозволяє охопити некатегоричні експертні судження (“дуже вірогідно...” або “навіть чи можливо, щоб...”).

Автором запропоновано модель підтримки прийняття рішень, у якій вживається шкала відношень, параметризована скінченною лінійно впорядкованою множиною K . Зручно вважати K скінченною підмножиною одиничного відрізка $I = [0;1]$, що складається з різних ступенів вірогідності, серед яких є 0 – “неможливо” та 1 – “гарантовано”. Маємо також проміжні рівні, що відповідають вірогідності “майже неможливо”, “досить ймовірно”, “напевно” і т.п. Сукупність можливих альтернатив X вважаємо ґраткою, у якій супремум та інфімум елементів x та y позначаються відповідно $x \vee y$ та $x \wedge y$. Якщо елемент x передре елементові y (альтернатива x є менш бажаною), то пишемо $x \prec y$ чи $y \succ x$. Найменший і найбільший елементи ґратки X теж позначаємо 0 і 1 (це не спричинить плутанини). Для практично важливих застосувань ґратка X , зазвичай, є скінченною. Вважаємо, що частковий порядок “ \prec ” на K є фіксованим (категоричне порівняння альтернатив є загально визнаним), але особа, що приймає рішення (DM – decision maker), може також надавати x перевагу над y з деяким рівнем непевності

$\alpha \in K$, що записуємо $x \succ_{\alpha} y$ чи $y \prec_{\alpha} x$. При цьому вважаємо виконаними такі вимоги:

- 1) $x \succ_0 y \Leftrightarrow x \succ y$ (нульова непевність – це категоричне судження);
- 2) $x \succ_1 y$ для всіх $x, y \in X$ (з одиничною непевністю можна стверджувати будь-що);
- 3) якщо $\alpha, \beta \in K$, $\alpha < \beta$, то з $x \succ_{\alpha} y$ випливає $x \succ_{\beta} y$;
- 4) відношення “ \succ_{α} ” (і відповідно “ \prec_{α} ”) є передпорядком, тобто рефлексивним і транзитивним (що природно для порівняння);
- 5) якщо $x, x' \prec_{\alpha} y$ (чи $x, x' \succ_{\alpha} y$), то $x \vee x' \prec_{\alpha} y$ (відповідно $x \wedge x' \succ_{\alpha} y$).

З останнього випливає, що для кожних $x \in X$ та $\alpha \in K$ серед усіх $y \in X$, таких, що $y \prec_{\alpha} x$, існує найбільший, який позначаємо $\alpha \vee x$.

Як наслідок, $0 \vee x = x$, $1 \vee x = 1$, $\alpha \vee (x \wedge y) = (\alpha \vee x) \wedge (\alpha \vee y)$ для всіх $x, y \in X$, $\alpha \in K$. З алгебраїчного погляду ці умови означають, що X є ідемпотентним K -напівмодулем [2]. Зауважимо, що $y \prec_{\alpha} x$ якщо і тільки якщо $\alpha \vee y \prec \alpha \vee x$.

Одночасно означимо операцію $\alpha \wedge x$ для $\alpha \in K$, $x \in X$ так:

$$\alpha \wedge x = \inf\{z \in X \mid z \vee y \succ x \text{ для кожного } y \in X, y \succ_{\alpha} x\}.$$

Відповідно отримуємо відношення “ \prec_{α} ” на X : $y \prec_{\alpha} x \Leftrightarrow \alpha \wedge y \prec \alpha \wedge x$. Це відношення теж є передпорядком, причому $\alpha \vee x = \sup\{z \in X \mid z \wedge y \prec x \text{ для кожного } y \in X, y \prec_{\alpha} x\}$.

Загалом X з операціями $\vee, \wedge : X \times X \rightarrow X$, $\vee, \wedge : K \times X \rightarrow X$ є ідемпотентно біопуклою множиною [2]. Сукупність $(\prec_{\alpha})_{\alpha \in K}$ відношень переваги називаємо K -нечітким порівнянням. Позначимо $Com_K(X)$ множину всіх K -нечітких порівнянь на фіксованій ґратці X .

Опишемо практичний зміст і методи використання поданої вище математичної моделі. Вважаємо, що y передре x з рівнем непевності α , якщо x бажаніший, ніж y , в усіх випадках, крім мало ймовірних (з рівнем вірогідності $< \alpha$). Практично для кожного рівня вірогідності α (крім 0 і 1) експерт доповнює відношення “ \prec ” додатковими парами $(x, y) \in X \times X$ до ширшого бінарного відношення R_{α} , тоді “ \prec_{α} ” отримується як перетин всіх відношень, що містять $\bigcup_{\beta \geq \alpha} R_{\beta}$ і задовольняють умови (1)-(5). Це дає змогу порівнювати альтернативи, нехтуючи мало ймовірними подіями.

Найпростішим прикладом гратки з K -нечітким порівнянням є $K^n = \{(\gamma_1, \dots, \gamma_n) \mid \gamma_i \in K\}$. Вважаємо $(\gamma_1, \dots, \gamma_n) \prec^\beta (\gamma'_1, \dots, \gamma'_n)$, якщо $\gamma_i \leq \max\{\gamma'_i, \beta\}$, $i = 1, \dots, n$. Кожний n -вимірний K -значний вектор трактуємо як набір вірогідностей успіху для скінченної кількості n гіпотез при певному виборі стратегії. Якщо $(\gamma_1, \dots, \gamma_n) \prec^\beta (\gamma'_1, \dots, \gamma'_n)$, то перша стратегія поступається другій, крім, можливо, випадків з малою вірогідністю успіху ($< \beta$), тому ними можна нехтувати. Отже, для особи, яка приймає рішення, природно надавати перевагу другій стратегії.

Обчислювальні алгоритми, що реалізують запропонований метод, і приклади їх застосування будуть викладені у наступній публікації.

Література

1. Dubois D., Prade H., Sabbadin R. Qualitative decision theory with Sugeno integrals, in: Grabisch M., Murofushi T., Sugeno M. (eds), Fuzzy measures and integral – theory and applications. Physika Verlag, Heidelberg, pp. 314-332.
2. Nykyforchyn O.R., Repovš D., Idempotent convexity and algebras for the capacity monad and its submonads, subm. to Applied Categorical Structures, 2009, 16 pp.
3. Schmeidler D., Integral representation without additivity, Proc. Amer. Math. Soc., 97:2, pp. 255-261.

Стаття поступила в редакційну колегію 12.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Артемовичем О.Д.

UNCLEAR ADVANTAGES IN THE TASKS OF ACCEPTANCE OF DECISIONS IN THE CONDITIONS OF VAGUENESS

I. V. Nykyforchyn

*Precarpathian National University named by Vasil Stefanic,
76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57;
tel. +380 (342) 59-60-16; e-mail: ira.nyk@gmail.com*

A formal model of decision making support under uncertainty based on fuzzy preferences is presented. Relations with idempotent generalizations of convexity are established.

Key words: *decision making, fuzzy relation, idempotent convexity, lattice.*

УДК 517.518.45

РЯДИ ФУР'Є В КОМП'ЮТЕРНІЙ ГРАФІЦІ

Л. І. Криштопа

*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*

Статтю присвячено застосуванню рядів Фур'є в комп'ютерній графіці, оскільки двовимірні зображення можна представляти як двовимірний сигнал, незважаючи на те, що в аналоговій формі цей сигнал нескінченний, у дискретній він позначений тільки в точках растрового зображення. Запропоновано і розроблено алгоритм ущільнення, що використовується у форматі збереження зображення JPEG, побудований на основі дискретного косинус перетворення з метою уникнення явища Гіббса. Обґрунтовано актуальність досліджень періодичних функцій, розкладених на спектр, що є фізичним аналогом математичних викладів.

Ключові слова: *ряд Фур'є, періодичні функції, явище Гіббса, дискретне перетворення, косинус перетворення, синус перетворення, графічне зображення.*

На сьогоднішній день ряди Фур'є є часто вживаними, як у науці, так і у техніці та побуті. У повсякденному житті ми дуже часто слухаємо музику, дивимося телевізор, але не усвідомлюємо, що насправді виконуємо перетворення Фур'є. Переглядаючи телевізійні передачі, наше око сприймає інформацію, і наш орган зору будує перетворення, представляючи картинку, що є коливальним рухом частинок пружного середовища, що розповсюджується у вигляді хвиль, як спектр кольорів різної яскравості, інтенсивності тощо. Мозок перетворює цю інформацію на сприймане зображення.

Одним із прикладів є сонячний промінь, розкладений на спектр, який є фізичним аналогом математичних перетворень. Інтенсивність сонячного променя, що входить в призму, постійно міняється в часі. Світло, що виходить з призми, роздільне в просторі на окремі «чисті» кольори або частоти. У цьому спектрі є середня амплітуда на кожній частоті. Таким чином, функція інтенсивності від часу трансформувалася у функцію амплітуди залежно від частоти. Перетворення Фур'є може представити сигнал, що змінюється в часі, у вигляді залежності частоти і амплітуди, але воно дає також інформацію про фазу. На рис. 1 зображено графік у поперечному перерізі, і він нам нагадує складну хвилю, яка складається із великої кількості простих гармонік з різними частотами, сума яких є періодичною функцією.

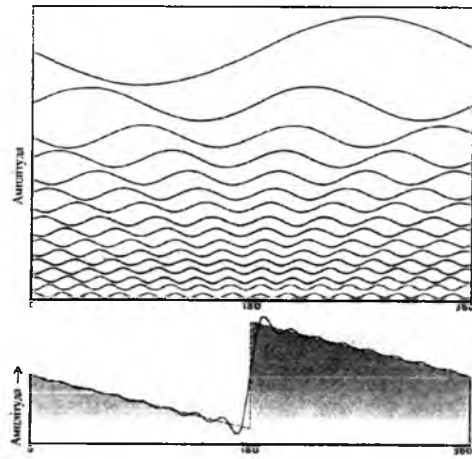


Рис. 1. Розклад на прості гармоніки графіка функції в ряд Фур'є та апроксимуюча крива

Графік суми гармонік різко відрізняється від графіків функцій, що додаються. Описана сума є рядом Фур'є:

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left(a_n \cos \frac{n\pi x}{l} + b_n \sin \frac{n\pi x}{l} \right), \quad (1)$$

$$\text{де } a_0 = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) dx; \quad a_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \cos \frac{n\pi x}{l} dx; \quad b_n = \frac{1}{l} \int_{-l}^l f(x) \sin \frac{n\pi x}{l} dx.$$

Дана функція $f(x)$ з періодом $T = 2\pi$ на проміжку від $(-\pi; \pi)$ повинна задовольняти умовам Діріхле, а саме:

1. Якщо вона на цьому інтервалі має скінченну кількість точок розриву першого роду;
2. Якщо вона на цьому інтервалі має скінченну кількість точок екстремуму;
3. Якщо існує правостороння границя лівого кінця функції та лівостороння границя правого кінця.

Також слід звернути увагу на явище Гіббса: зі збільшенням числа членів у сумі апроксимуюча крива наближається до графіка вихідної функції у всіх точках, крім точок розриву. У цих точках з'являються маленькі виступи. Зі збільшенням числа доданків ці виступи зміщуються до точки розриву. Коли число доданків у частинній сумі збільшується, площа виступу на кривій зменшується, причому виступи не зменшуються по висоті, а лише стають вужчими.

Таким чином, нескінченний ряд в границі наближається за видом до потрібної функції, за виключенням виступів, які з'являються, як вказано, біля точок розриву. Така поведінка частинних сум називається явищем Гіббса, причому з ним ми повсякчас зустрічаємося, коли маємо справу з апроксимацією розривних функцій у їхніх точках розриву. Доведено, що величина виступу залежить від величини стрибка функції у точці розриву. Якщо цей стрибок дорівнює h , то величина виступу для функції періоду 2π дорівнює $0,0895h$.

З явищем Гіббса можна боротися у випадку парних функцій, які за періодичного поширення не мають розривів; а також функцій, заданих на половинному періоді, які поширюють у сусідній інтервал (для запобігання цьому явищу) за допомогою розкладу в ряд Фур'є за косинусами, якому притаманні кращі властивості збіжності. Проте, якщо функція $f(x)$, задана на інтервалі $(0; \pi)$, у точках $x=0$ та $x=\pi$ дорівнює нулю, то слід віддати перевагу розкладанню її в ряд синусів, який у цьому випадку дає кращу збіжність, ніж ряд косинусів. Це пояснюється тим, що, здійснивши непарне продовження функції $f(x)$ з інтервалу $(0; \pi)$ в інтервал $(-\pi; 0)$, ми забезпечимо неперервність не лише самої функції у цих точках, але й її першої похідної.



(0,0)	(1,0)	(2,0)	(3,0)	(4,0)
(0,1)	(1,1)	(2,1)	(3,1)	(4,1)
(0,2)	(1,2)	(2,2)	(3,2)	(4,2)

Рис. 2. Моделі представлення просторового зображення

Подамо зображення як функцію двох змінних, визначену в точках кінцевого растрового зображення. Нехай $I(x, y)$ – значення атрибута пікселя (наприклад, номер палітри, інтенсивності) залежно від колірної моделі представлення зображення (рис.2). Безліч таких функцій на точках фіксованого кінцевого растрового зображення утворюють скінченно-номірний простір $R^{X,Y}$ розмірності $m \times n$ ($|X|=m, |Y|=n$) із скалярним утворенням

$$(I_1, I_2) = \sum_{i,j=0}^{m,n} I_1(i, j) I_2(i, j). \quad (2)$$

Будемо отожднювати із простором $I_2(X \times Y)$. У такому просторі існує базис, тобто така система елементів $\{e_k\}_{k=1}^{k=m \times n}$ (3) із $R^{X,Y}$ і такий набір одночасно не рівних нулеві коефіцієнтів $\{C_k\}_{k=1}^{k=m \times n}$ (4), що для будь-якої функції I із цього простору виконується така рівність

$$I = \sum_{k=0} C_k e_k \quad (5)$$

Якщо додатково припустити ортонормованість базису, тоді

$$(e_p, e_q) = \begin{cases} 0, & p \neq q, \\ 1, & p = q. \end{cases} \quad (6)$$

і виконуватиметься таке співвідношення $C_k = (I, e_k)$ де, C – множина значень атрибутів (як правило, колір). Оскільки двовимірне зображення можна представити, як двовимірний сигнал, то у аналоговій формі цей сигнал неперервний, а у дискретній формі – визначений лише в точках растрового зображення D . Тому для розгляду зображення у визначеному прямокутнику зручно розкласти його в ряд Фур'є.

Розглянемо одновимірні сигнали з одновимірною областю визначення. Якщо представити функцію комплексної змінної (F) у вигляді суми дійсної та уявної частин ($F = \text{Re}(f) + i \text{Im}(f)$), то модуль (або амплітуда) буде рівним $\sqrt{\text{Re}(f)^2 + \text{Im}(f)^2}$, а фазовий зсув складе $\arctg \left[\frac{\text{Im}(f)}{\text{Re}(f)} \right]$.

На графіках будуть подано тільки наочні значення амплітуд. У багатовимірному випадку значення $f \times x$ замінюється на скалярний вираз векторів \vec{f} та \vec{x} . Тоді частотне представлення для одновимірної функції розраховується за допомогою перетворення Фур'є

$F(f) = \int_{-\infty}^{\infty} I(x) [\cos 2\pi f x - i \sin 2\pi f x] dx$, що для загального двовимірного зо-

браження перетворення Фур'є запишеться в такому вигляді:

$$F(f_x, f_y) = \int_{R^2} I(x, y) [\cos(2\pi(f_x x + f_y y)) - i \sin(2\pi(f_x x + f_y y))] dx dy. \quad (7)$$

Застосуємо простіші міркування та розглянемо одновимірні сигнали з одновимірною областю визначення. На рис. 3 представлено одновимірний сигнал як зріз двовимірного зображення. Даний сигнал можна розглянути як в просторовій області (визначеній області) $R^n \in D$, так і в частотній – C^n .

У дискретному випадку, якщо сигнал представлений у вигляді функції визначеного в N точках $x \in 0, \dots, N-1$, використовується дискретне перетворення Фур'є, яке, по суті, є рядом Фур'є.

$$F(f) = \sum_{x=0}^{N-1} I(x) \left[\cos \frac{2\pi f x}{N} - i \sin \frac{2\pi f x}{N} \right], \quad (8)$$

де $f \in 0, \dots, N-1$ – також дискретна. Відповідне зворотне дискретне перетворення Фур'є записується у вигляді:

$$I(x) = \frac{1}{N} \sum_{f=0}^{N-1} F(f) \left[\cos \frac{2\pi f x}{N} + i \sin \frac{2\pi f x}{N} \right]. \quad (9)$$

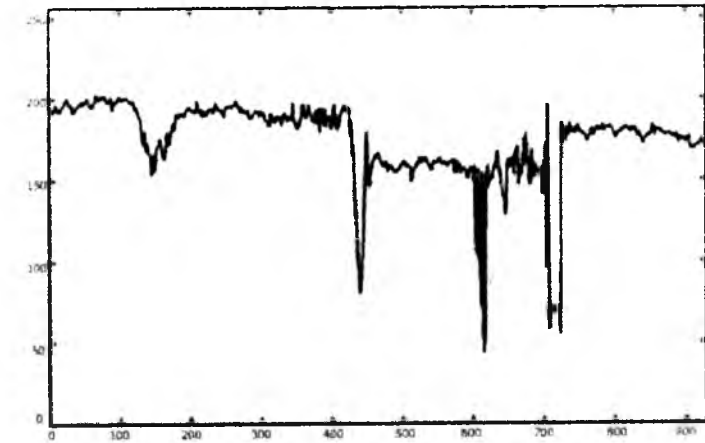


Рис. 3. Зріз як сигнал

Дискретне перетворення володіє такими двома важливими властивостями:

- по-перше, коефіцієнти незалежні один від одного, тобто точність представлення одного коефіцієнта не залежить від будь-якого іншого.
- по-друге, перетворення зберігає основну інформацію за малої кількості коефіцієнтів. Дана властивість найсильніше виявляється на фотореалістичних зображеннях.

У комплексному вигляді наша функція для всього зображення матиме вигляд:

$$F(k, l) = \sum_{p=0}^m \sum_{q=0}^n I(p, q) e^{-\frac{2\pi p k}{m}} e^{-\frac{2\pi q l}{n}}, \quad (10)$$

для всіх $k = 1 \dots m$, $l = 1 \dots n$. Обернене перетворення Фур'є визначається так:

$$I(p, q) = \frac{1}{mn} \sum_{k=0}^m \sum_{l=0}^n F(k, l) e^{\frac{2\pi k p}{m}} e^{\frac{2\pi l q}{n}}. \quad (11)$$

Таким чином, система функцій

$$\left\{ e^{2\pi i \left(\frac{p k}{m} + \frac{q l}{n} \right)} \right\}_{k, l=0}^{m, n}, \quad (12)$$

утворює базис в просторі функцій зображення, а частотний спектр зрізу відображає рис. 4.

Існують алгоритми швидкого перетворення Фур'є. Якщо в області $F(f) = 0, |f| > f_{\text{макс}}$, то сигнал (функція) $I(x)$ має обмежений спектр з максимальною частотою $f_{\text{макс}}$. Тобто під час розкладання функції не присутні тригонометричні функції з частотою понад $f_{\text{макс}}$. Зазвичай дискретизація відбувається шляхом вимірювання сигналу через рівні

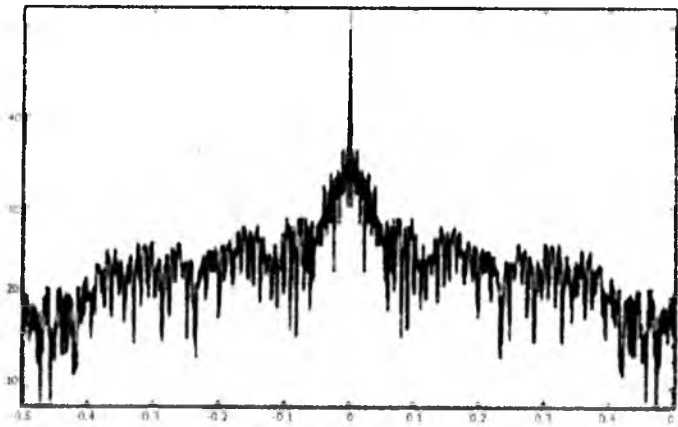


Рис. 4. Частотний спектр зрізу

проміжки в області визначення. Ця операція математично описується як множення функції $I(x)$ на гребінчастий фільтр, що складається з послідовності рівномірно зміщених функцій Дірака $\sigma(x)$:

$$\text{Comb}(x) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sigma(x - nT), \quad (13)$$

де $T = 1/f_s$ – період, f_s – частота дискретизації. Цікавою властивістю функції Comb є те, що її перетворення Фур'є також є функцією Comb , проте із іншою амплітудою (не 1, а f_s) і частотою (також f_s), а σ – функція – це узагальнена функція, що визначається як неперервний лінійний функціонал у просторі функцій, що диференціюються, і не є функцією в класичному розумінні. Ця функція дає змогу записати просторову інтенсивність зображення зосередженою або прикладеною в одній точці. Наприклад, інтенсивність точкового зображення 1, що знаходиться в точці a , еклідового простору R^n , записується за допомогою σ – функції у вигляді $\sigma(x - a)$.

Алгоритм стиснення, використовуваний у форматі зберігання зображень JPEG, побудований на використанні дискретного косинусного перетворення. Хороший ступінь стиснення з малими втратами інформації можна отримати лише у разі, коли багато коефіцієнтів Фур'є близькі або рівні нулеві.

Реальні зображення мають вельми складну структуру, і їх Фур'є-образ може не задовольняти подібним вимогам. Можна розбити зображення на області фіксованого розміру і виконувати перетворення в кожній області окремо (рис. 5). У кожній такій області зображення матиме менше особливостей, ніж все зображення загалом, і образи Фур'є цих областей можуть виявитися більш відповідними для стиснення, ніж образ всього зображення.

Саме так і працює відомий алгоритм стиснення JPEG. Недоліком такого підходу є те, що за високого ступеня стиснення частини єдиного зображення, що обробляються незалежно один від одного, можуть по-

гано поєднуватися, стає очевидним, що зображення зібране з окремих елементів.

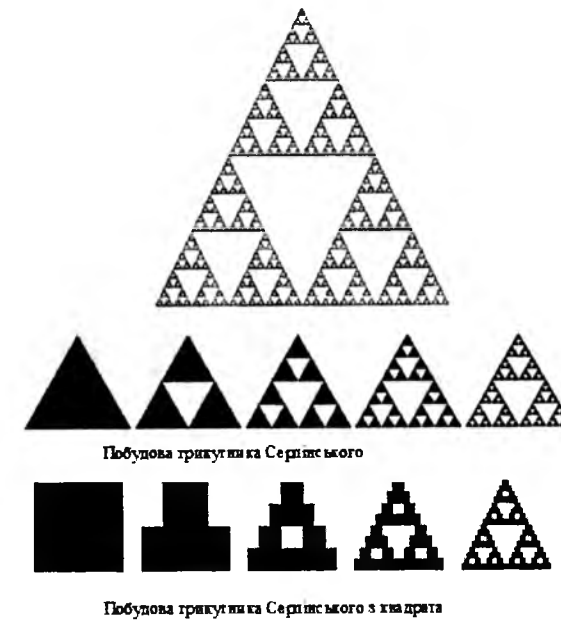


Рис. 5. Розбиття зображення на області

Одним із прикладів є комп'ютерний фільм поганої якості. На ньому можна спостерігати сукупність квадратиків, які утворюють зображення із добре видимими їх контурами. Тоді для усунення цього недоліку, зображення відфільтровують, знімаючи шуми, які породжують таке спотворення. На рис. 6 зображено початковий сигнал зображення як в просторовій, так і в частотній області до косинусної дискретизації, який ми досліджуємо.

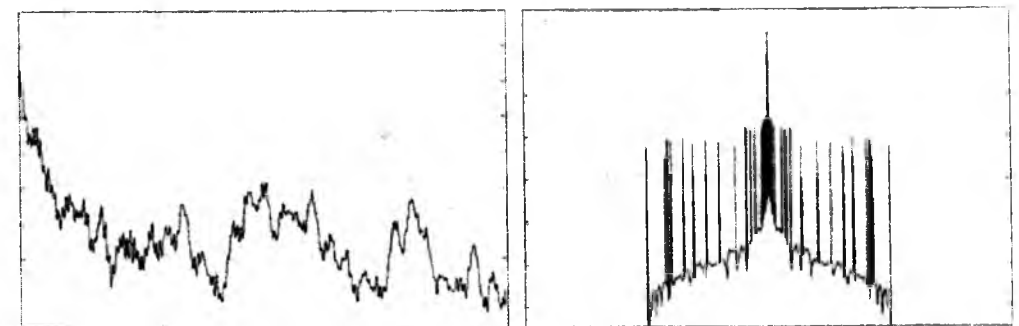


Рис. 6. Початковий сигнал зображення

Після проведення дискретизації, наш графік набуде вигляду зображеного на рис. 7, на якому ми можемо спостерігати високочастотні шуми, і, порівнявши частотні області до і після дискретизації, ми побачимо велику різницю. Ця різниця буде проявлятися на зображенні у вигляді сукупності контурів зібраних областей. Для того, щоб позбутися

цих шумів, потрібно їх відфільтрувати і графік сигналу набуде наступного вигляду (рис.8). Якщо порівняти частотну і просторову область даного сигналу до дискретизації і після фільтрування, слід зауважити, що сигнали майже співпадають, тобто зображення після фільтрування набуде невеликої розмитості і не буде мати такої ж чіткої форми, як початкове зображення, але основна інформація при цьому збережеться.

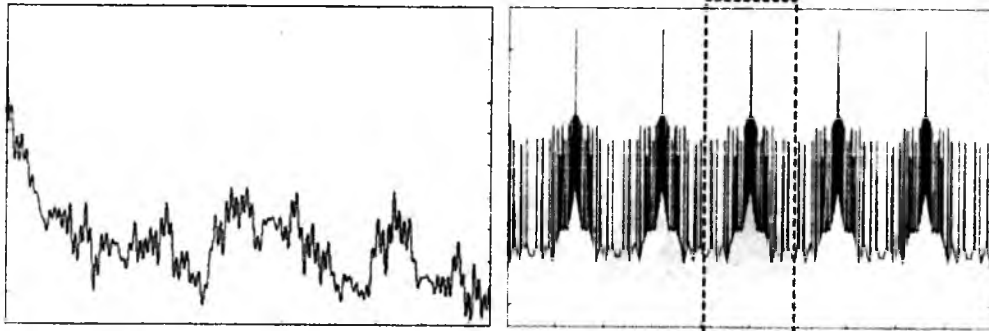


Рис. 7. Сигнал після дискретизації

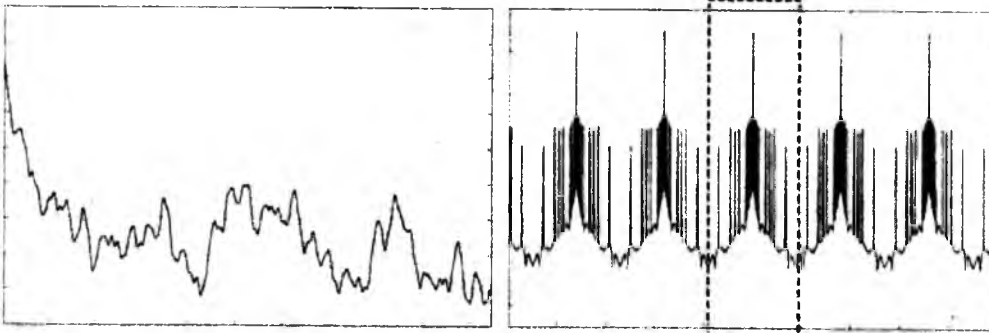


Рис. 8. Сигнал після фільтрування

Ще одне завдання – побудова різного роду сіток. Сітка є зручною для представлення об'єктів найрізноманітнішої структури. У комп'ютерній графіці часто використовуються трикутні сітки, вони відносно прості в обробці, дають можливість представляти об'єкти з високою точністю. Крім того, на багатьох графічних станціях обробка трикутників (наприклад, заливка Гуро) підтримується апаратно. Використання рівномірної сітки буває виправдано не завжди – об'єкт може мати як фрагменти з хорошим ступенем точності уявні лише декількома великими трикутниками, так і деталі з складною структурою, які слід представляти можливо дрібнішою сіткою.

Література

1. Колмогоров А.Н. Элементы теории функций и функционального анализа / А.Н. Колмогоров, С.В. Фомин. – М.: Наука, 1976. – 448 с.
2. Пискунов Н.С. Дифференциальное и интегральное исчисления для вузов / Н.С. Пискунов. – М.: Наука, 1972. – Т.2. – 576 с.
3. Каплан И.А. Практические занятия по высшей математике. Часть IV / И.А. Каплан. – Харьков, 1966. – 236 с.

4. Алгоритмические основы растровой машинной графики / Д.В. Иванов, А.С. Карпов, Е.П. Кузьмин, В.С. Лемпицкий, А.А. Хропов // Интернет-университет информационных технологий. – ИНТУИТ. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 286 с.
5. Казиев В.М. Введение в математику и информатику / В.М. Казиев // Интернет-университет информационных технологий – ИНТУИТ. БИНОМ. Лаборатория знаний, 2007. – 304 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 29.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Мойсшиним В.М.*

FOURIER'S ROWS IN COMPUTER GRAPHICS

L. I. Kryshtopa

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

The paper is devoted to application of the Fourier's rows in computer graphics as two measured images can be represented, as a two measured signal, in spite of the fact that in an analog form this signal is endless, in discrete he is marked only in the points of bitmapped image. The algorithm of compression, used at format of saving of the JPEG image, is offered and developed, built on the basis of discrete cosines transformation, in avoidance of the Gibbs phenomenon. Actuality of researches of the periodic functions decomposed on a spectrum is grounded, that is the physical analogue of mathematical expositions.

Key words: *The Fourier's rows, periodic functions, phenomenon of Gibbs, discrete transformation, cosine transformation, sine transformation, graphic image.*

ДЕЯКІ НЕСТАНДАРТНІ МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ РІВНЯНЬ ТА ДОВЕДЕННЯ НЕРІВНОСТЕЙ

І. В. Федак

Прикарпатський національний університет ім. В. Стефаника;

76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;

Fedak_ivan@rambler.ru

Розглянуті дванадцять нестандартних методів розв'язування рівнянь та доведення нерівностей.

Ключові слова: математична олімпіада, рівняння, нерівність.

На математичних олімпіадах різних рівнів часто пропонуються задачі, які можна розв'язати як стандартними міркуваннями, так і з допомогою нестандартних підходів. Як правило, у другому з цих випадків процес розв'язання вдається суттєво скоротити у порівнянні з першим варіантом. У даній статті ми проаналізуємо дванадцять нестандартних методів розв'язування рівнянь та доведення нерівностей, які в різні роки пропонувалися на третьому та четвертому етапах Всеукраїнської олімпіади з математики.

Як перший приклад розглянемо таку задачу, яка була запропонована автором цієї статті учасникам третього етапу Всеукраїнської олімпіади з математики у 2003 році для учнів дев'ятого класу.

Задача 1. Петрусь виписав на дошці 2003 зведені квадратні рівняння і переконався, що жодне з них не має дійсних коренів. Потім він додав усі ці рівняння. Доведіть, що і отримане у такий спосіб рівняння також не має дійсних коренів.

У ході розв'язування цієї задачі учні міркували приблизно так:

Нехай задані рівняння

$$x^2 + p_k x + q_k = 0, \quad k = 1, \dots, 2003.$$

Оскільки вони не мають дійсних коренів, то при кожному k дискримінанти

$$D_k = p_k^2 - 4q_k < 0.$$

Отримане в результаті додавання рівняння має вигляд

$$2003x^2 + (p_1 + \dots + p_{2003})x + (q_1 + \dots + q_{2003}) = 0.$$

Доведемо, що його дискримінант

$$D = (p_1 + \dots + p_{2003})^2 - 4 \cdot 2003 \cdot (q_1 + \dots + q_{2003}) < 0.$$

Але довести останню нерівність вдалося лише одному учасникові олімпіади, який скористався нерівністю Коші-Буняковського для векторів $\vec{a}(1, \dots, 1)$, $\vec{p}(p_1, \dots, p_{2003})$:

$$(p_1 + \dots + p_{2003})^2 = (\vec{a}, \vec{p})^2 \leq |\vec{a}|^2 \cdot |\vec{p}|^2 = 2003(p_1^2 + \dots + p_{2003}^2) \leq 2003(4q_1 + \dots + 4q_{2003}).$$

Проте бажаного результату можна було би досягнути набагато простіше.

Розв'язання. Оскільки коефіцієнти біля x^2 у всіх рівняннях дорівнюють одиниці і рівняння не мають дійсних коренів, то їх ліві частини набувають лише додатних значень. А, отже, і ліва частина отриманого рівняння також набудатиме лише додатних значень. Тому таке рівняння не матиме дійсних коренів.

Розглянемо ще одну задачу, під час розв'язування якої більшість учнів та й вчителів зразу намагаються скласти та розв'язувати систему з трьох рівнянь. У зв'язку з цим пропонуємо до уваги читачів спосіб розв'язування даної задачі на рівні програми з математики для молодших класів загальноосвітньої школи.

Задача 2. Лев і тигр з'їдають вівцю за 2 год. 24 хв., лев і вовк з'їдають таку ж вівцю за 3 год., а тигр і вовк – за 4 год. За який час вони могли б з'їсти цю вівцю троє разом?

Розв'язання. Припустимо, що згряя із двох левів, двох тигрів і двох вовків напала на отару овець. Розділившись на пари (лев і тигр), (лев і вовк), (тигр і вовк), вони наїдалися протягом 12 годин. За цей час перша пара з'їла 5 овець, друга – 4, а третя – 3. Отже, в середньому на з'їдання однієї вівці вони всі разом витрачали одну годину. Тому один лев, один тигр та один вовк змогли би з'їсти разом одну вівцю за вдвічі більший час, тобто 2 години.

Наступна задача належить авторові цієї статті і була запропонована на фіналі Соросівської олімпіади з математики у 2001 році. Її розв'язання цікаве тим, що ілюструє як звичайне множення обох частин рівняння на сталу призводить до дуже суттєвих спрощень.

Задача 3. Розв'яжіть рівняння

$$(x-1)(500x-501)(1000x-1001)^2 = 2001.$$

Розв'язання. Поможимо обидві частини рівняння на 2000 і запишемо його у вигляді:

$$(1000x-1000)(1000x-1002)(1000x-1001)^2 = 2000 \cdot 2001.$$

Нехай $y = 1000x - 1001$. Тоді рівняння набуває вигляду

$$(y+1)(y-1)y^2 = 2000 \cdot 2001.$$

З отриманого біквдратного рівняння знаходимо $y_{1,2} = \pm\sqrt{2001}$. Отже,

$$x_{1,2} = \frac{1001 \pm \sqrt{2001}}{1000}.$$

Розглянемо ще одне рівняння для учнів одинадцятого класу з четвертого етапу Всеукраїнської олімпіади з математики 2002 року. Справилися з ним лише чотири учасники олімпіади. Більше того, авторське розв'язання задачі також виявилось доволі громіздким. Тому пропонуємо її розв'язання, доступне для розуміння навіть семикласникам.

Задача 4. Знайдіть всі цілочислові розв'язки рівняння

$$m^{2002} = n(n+m)(n+2m)\dots(n+2001m).$$

Розв'язання. Зауважимо, що ліва і права частина рівності матимуть однакову парність тоді і тільки тоді, коли m та n будуть парними. Поклавши $n = 2n_1$, $m = 2m_1$, після скорочення на 2^{2002} прийдемо до початкового рівняння, але відносно нових змінних. Звідси випливатиме, що m_1 та n_1 також можуть бути лише парними. А отже, m та n повинні ділитися на 4. Міркуючи і далі аналогічно, одержимо, що числа m та n при кожному натуральному значенні k діляться на 2^k , а значить, можуть бути лише нулями. Перевірка показує, що пара чисел $m = n = 0$ задовольняє даному рівнянню.

Під час розв'язування наступної задачі на допомогу алгебри доволі ефективно приходить геометрія.

Задача 5. Доведіть, що система рівнянь

$$x^2 + xy + y^2 = 4, \quad y^2 + yz + z^2 = 9, \quad z^2 + zx + x^2 = 36$$

не має розв'язків у додатних чисел.

Розв'язання. Припустимо, що такі розв'язки існують. Тоді існують такі трикутники AOB , BOC , COA зі спільною вершиною O і кутами 120° при цій вершині, що жодні два з них не мають спільних внутрішніх точок і $OA = x$, $OB = y$, $OC = z$. Для цих трикутників із рівнянь системи за теоремою косинусів отримуємо: $AB = 2$, $BC = 3$, $CA = 6$. Але це неможливо, бо трикутника ABC з такими довжинами сторін не існує. Отримане протиріччя доводить, що задана система не має розв'язків у додатних числах x , y , z .

Нестандартні міркування швидко приводять до успіху і при розв'язуванні наступного рівняння, в якому, здавалось би, в першу чергу слід в той чи інший спосіб позбутися радикалів. Проте отримати бажаний результат можна значно простіше.

Задача 6. Розв'яжіть рівняння

$$\sqrt{3+x} + \sqrt[4]{9-x} = \sqrt[6]{27-x^2}.$$

Розв'язання. Зауважимо, що множиною допустимих значень у цьому рівнянні є проміжок $[-3; 3\sqrt{3}]$. Але при всіх належних цьому проміжку x права частина рівняння не перевищує $\sqrt[6]{27} = \sqrt{3}$. Що ж стосується лівої частини, то

$$\sqrt{3+x} + \sqrt[4]{9-x} > \begin{cases} \sqrt{3} + 0 = \sqrt{3}, & x \in (0; 3\sqrt{3}], \\ 0 + \sqrt[4]{9} = \sqrt{3}, & x \in [-3; 0). \end{cases}$$

А оскільки $x = 0$ також не задовольняє нерівності, то задане рівняння не має дійсних коренів.

Нестандартне розв'язування попередньої задачі звелось до доведення нерівностей. Але й при доведенні самих нерівностей на допомогу також часто приходять нестандартні підходи. Прикладом може слугува-

ти така задача з четвертого етапу Всеукраїнської олімпіади юних математиків, яку її автор доволі громіздко пропонував розв'язувати методом математичної індукції. Але, як ми побачимо далі, просте підсилення нерівності зразу приводить до потрібного результату.

Задача 7. Доведіть нерівність

$$\sqrt{6+\sqrt{6+\dots+\sqrt{6+\sqrt{6}}}} + \sqrt[3]{6+\sqrt[3]{6+\dots+\sqrt[3]{6+\sqrt[3]{6}}}} < 5,$$

якщо в обох доданках використано по 2005 радикалів.

Розв'язання.

$$\begin{aligned} & \sqrt{6+\sqrt{6+\dots+\sqrt{6+\sqrt{6}}}} + \sqrt[3]{6+\sqrt[3]{6+\dots+\sqrt[3]{6+\sqrt[3]{6}}}} < \\ & < \sqrt{6+\sqrt{6+\dots+\sqrt{6+\sqrt{9}}}} + \sqrt[3]{6+\sqrt[3]{6+\dots+\sqrt[3]{6+\sqrt[3]{8}}}} = 3+2=5. \end{aligned}$$

Таку ідею доведення нерівностей навряд чи можна віднести до нестандартних. Але, як свідчить досвід проведення математичних олімпіад, нею користується не так вже й багато учнів. Тому вважаю за доцільне навести відповідний приклад.

Задача 8. Для додатних чисел $a_1, a_2, \dots, a_{2009}$ доведіть нерівність

$$\frac{a_1^2}{a_2} + \frac{a_2^2}{a_3} + \dots + \frac{a_{2008}^2}{a_{2009}} + \frac{a_{2009}^2}{a_1} \geq a_1 + a_2 + \dots + a_{2009}.$$

Розв'язання. Для довільних дійсних чисел x, y справедлива нерівність

$$(x-y)^2 \geq 0 \Leftrightarrow x^2 \geq 2xy - y^2.$$

При $y > 0$ її можна записати у вигляді

$$\frac{x^2}{y} \geq 2x - y.$$

Застосовуючи отриманий результат до кожного з доданків у лівій частині нерівності, заданої в задачі, переконуємося у справедливості цієї нерівності.

Зауважимо, що у більш загальному вигляді таку нерівність можна записати як

$$\frac{x^{n+1}}{y^n} \geq (n+1)x - ny, \quad x > 0, y > 0, n \in \mathbb{N}.$$

Для її доведення досить переписати цю нерівність у вигляді

$$\frac{x^{n+1}}{y^n} + \underbrace{y + \dots + y}_n \geq (n+1)x$$

і скористатися нерівністю Коші між середнім арифметичним та середнім геометричним $n+1$ додатних чисел.

Далі розглянемо ще одну задачу з фінального етапу другої Соросівської олімпіади для учнів десятого класу. Її авторське розв'язування проводилось методом математичної індукції з використанням нерівності вигляду

$$\frac{1}{1+a} + \frac{1}{1+b} \leq \frac{1}{1+ab} + 1, \quad a > 0, b > 0,$$

проте значно простіше було би тут скористатися принципом крайнього.

Задача 9. Довести, що для додатних чисел a_1, a_2, \dots, a_n , $n > 1$, таких, що $a_1 a_2 \dots a_n = 1$, виконується нерівність

$$\frac{1}{1+a_1} + \frac{1}{1+a_2} + \dots + \frac{1}{1+a_n} \leq n-1.$$

Розв'язання. Нехай a_k та a_m – два найбільші із заданих чисел. Тоді $a_k a_m \geq 1$, бо у протилежному випадку добуток всіх чисел був би меншим за 1. Оскільки при цьому

$$\frac{1}{1+a_k} + \frac{1}{1+a_m} - 1 = \frac{1-a_k a_m}{(1+a_k)(1+a_m)} \leq 0,$$

то

$$\frac{1}{1+a_k} + \frac{1}{1+a_m} \leq 1.$$

Але кожен з решти доданків також менший одиниці. Тому сума всіх доданків не перевищує $n-1$, причому рівність досягається лише при $n=2$.

Зауважимо, що вибираючи два найменші числа a_k та a_m , ми змогли би довести, що

$$\frac{1}{1+a_1} + \frac{1}{1+a_2} + \dots + \frac{1}{1+a_n} \geq 1.$$

Справді, міркуючи аналогічно, отримаємо, що $a_k a_m \leq 1$ та

$$\frac{1}{1+a_k} + \frac{1}{1+a_m} \geq 1.$$

А оскільки решта доданків додатні, то нерівність доведена. Рівність досягається лише при $n=2$.

Окремо хочеться звернути увагу на геометричні підходи до доведення алгебраїчних нерівностей. Проілюструємо це на прикладі.

Задача 10. Числа x, y, z належать інтервалу $(0;1)$. Доведіть нерівність

$$x(1-y) + y(1-z) + z(1-x) < 1.$$

Розв'язання. Запишемо цю нерівність у вигляді

$$x \cdot (1-y) \cdot 1 + y \cdot (1-z) \cdot 1 + z \cdot (1-x) \cdot 1 < 1$$

і будемо трактувати доданки у лівій частині цієї нерівності як об'єми прямокутних паралелепіпедів з відповідними лінійними вимірами. Оскільки три такі паралелепіпеди можна помістити в одиничний куб, в якому ще залишаються вільні місця, то нерівність доведена.

Наведемо також приклад геометричного доведення нерівності з третього етапу Всеукраїнської олімпіади юних математиків 2008 року,

11 клас. Спроби розв'язувати задачу іншим способом практично заздалегідь були приречені на невдачу, про що й свідчать результати олімпіади – жоден учасник з даною нерівністю не впорався.

Задача 11. Для кожного натурального n доведіть нерівність

$$\sqrt{1 \cdot (4n-1)} + \sqrt{2 \cdot (4n-2)} + \dots + \sqrt{(2n-1) \cdot (4n-(2n-1))} < \pi n^2.$$

Розв'язання. Розглянемо півкруг з діаметром $4n$. З кожної точки півкола такого круга його діаметр видно під прямим кутом. Проведемо перпендикуляри до цього діаметра на відстанях $1, 2, 3, \dots, 2n-1$ від його лівого кінця. Їх довжини в межах півкруга дорівнюють відповідним доданкам у лівій частині нерівності. На кожному з перпендикулярів справа від нього побудуємо прямокутник з основою 1, яка лежить на діаметрі півкруга. Сума площ таких прямокутників дорівнюватиме лівій частині нерівності. Зрозуміло, що ця сума менша площі половини півкруга, тобто менша πn^2 , що й слід було довести.

На завершення статті пропонуємо ще одну цікаву задачу, пов'язану з нерівностями, з четвертого етапу Всеукраїнської олімпіади з математики 1995 року, яка проходила у місті Івано-Франківську. Ця задача пропонувалися учням і десятого, і одинадцятого класу. Але лише де кілька випускників – учасників олімпіади впоралися з нею. Зауважимо також, що авторське розв'язання задачі було доволі непростим, тому пропонуємо децю хитріший підхід до розв'язання.

Задача 12. Чи існує многочлен вигляду

$$f(x) = x^{1995} + a_1 x^{1994} + \dots + a_{1994} x + a_{1995}$$

такий, що при всіх x з відрізка $[0; 3^{1995}]$ виконується нерівність

$$|f(x)| \leq 1?$$

Розв'язання. Скористаємося розкладом многочлена $f(x)$ на лінійні та квадратичні множники. Назвемо проміжок $[a; b]$ забороненим, якщо у всіх його точках принаймні один із множників набуває лише таких значень, які за абсолютною величиною не перевищують 1. Зауважимо, що лінійний множник $x-c$ набуває таких значень лише на проміжку $[c-1; c+1]$. Квадратний тричлен $x^2 + px + q$ із від'ємним дискримінантом набуває мінімуму при $x = -\frac{p}{2}$, причому значення цього мінімуму додатне.

Тоді для всіх x таких, що $\left|x + \frac{p}{2}\right| \geq 1$, будемо мати:

$$x^2 + px + q \geq \left(-\frac{p}{2} \pm 1\right)^2 + p\left(-\frac{p}{2} \pm 1\right) + q = -\frac{p^2}{4} + 1 + q > 1.$$

Таким чином, кожен із множників розкладу визначає заборонений проміжок, довжина якого не перевищує 2. А оскільки всіх таких множників не більше 1995 то і загальна довжина всіх заборонених проміжків не перевищує $2 \cdot 1995 = 3370$. Але $3370 < 3^{1995}$, то на відрізку $[0; 3^{1995}]$ знайдеться принаймні одна точка x_0 , яка не належить жодному забороненому проміжку.

ку. Тоді $|f(x_0)| > 1$. Отже, такого многочлена $f(x)$, який при всіх $x \in [0; 3^{1995}]$ задовольняє нерівності $|f(x)| \leq 1$, не існує.

Зауважимо, що аналогічно можна довести більш загальне твердження: не існує такого многочлена $P_n(x)$, $n \geq 1$, з коефіцієнтом 1 при старшому степені, який при всіх $x \in [0; 3^n]$ задовольняє нерівності $|P_n(x)| \leq 1$.

Відзначимо також, що не існує вказаного многочлена, який би задовольняв нерівність $|P_n(x)| \leq 1$ на відрізок з довжиною 4, проте доведення такого твердження уже не є настільки очевидним.

*Стаття поступила в редакційну колегію 19.07.2009 р.
Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., с.н.с. Загороднюком А.В.*

SOME SUBSTANDARD METHODS OF THE SOLUTION OF EQUATIONS AND PROOF OF INEQUALITIES

I. V. Fedak

*Precarpathian National University by V. Stefanyc;
Ukraine, 76000, Ivano-Frankivsk, Shevchenko street, 57;
e-mail: Fedak_ivan@rambler.ru*

Twelve substandard methods of the solution of equations and proof of inequalities have considered.

Key words: *mathematical olympiad, equation, inequality.*

УДК 519.25

ББК 22.17

ПРО ПОСЛІДОВНИЙ МЕТОД КЛАСИФІКАЦІЇ

М. М. Осипчук

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76018, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57; e-mail: myosvdp@ukr.net*

Розглядається задача оцінки ймовірностей належності об'єкта до двох сукупностей за відомими його незалежними характеристиками. Пропонується методика класифікації таких об'єктів.

Ключові слова: *прогнозування, класифікація, дискримінантний аналіз, статистика.*

Постановка завдання. Проблема полягає у необхідності розробки методу визначення ймовірності належності досліджуваного об'єкта до однієї з двох сукупностей та побудові ефективного методу визначення сукупності, до якої слід віднести об'єкт. Інформація про об'єкт містить значення певної кількості незалежних характеристик. Кожна характеристика може приймати скінченну кількість дискретних значень.

Завдання прогнозування належності досліджуваного об'єкта до однієї з кількох сукупностей є стандартним завданням дискримінантного аналізу. За наявності інформації про значення певної кількості характеристик всіх членів навчальних вибірок із заданих генеральних сукупностей існує можливість побудови дискримінантних функцій (лінійних), за значеннями яких приймається рішення про віднесення нового об'єкта до цих сукупностей. Крім того, можна знайти ймовірності (апостеріорні) належності цього об'єкта до кожної з них. Ситуація ускладнюється, якщо замість інформації про значення характеристик об'єктів даних сукупностей маємо тільки частоти, з якими ці значення спостерігалися. Вивченню саме цього питання присвячена запропонована робота.

Точкова оцінка ймовірності належності об'єкта до однієї з двох сукупностей. Для побудови оцінки ймовірності належності об'єкта до кожної із сукупностей розглянемо навчаючу вибірку (об'єму n) характеристик об'єктів аналогічних досліджуваному, поділену на дві частини (вибірки з двох сукупностей A і B) об'ємів n_1 та n_2 ($n_1 + n_2 = n$). Самі сукупності A і B вважаємо достатньо великими. Кожне вибіркоче значення є вектором $(x_{1i}^{(j)}, x_{2i}^{(j)}, \dots, x_{hi}^{(j)})$, $i = \overline{1, n_j}$, $j = 1, 2$, $h \in N$. Значення $x_{hi}^{(j)}$ належить до деякої k_j -елементної множини M_j . Характеристики ξ_j , вибіркочними значеннями яких є $x_{hi}^{(j)}$, вважаємо незалежними.

Нехай апіорні ймовірності належності об'єкта до сукупностей A і B відповідно дорівнюють p_1 і p_2 , а умовні ймовірності – $P(\xi_j = \bar{x}_{lm} / A) = q_{lm}^{(1)}$, $P(\xi_j = \bar{x}_{lm} / B) = q_{lm}^{(2)}$, де \bar{x}_{lm} – m -тий елемент мно-

жини M_l . За формулою Байеса ймовірність того, що об'єкт зі значенням \bar{x}_{lm} характеристики ξ_l належить до сукупності A , дорівнює

$$p_{lm}^{(1)} = \mathbf{P}(A / \xi_l = \bar{x}_{lm}) = \frac{p_1 q_{lm}^{(1)}}{p_1 q_{lm}^{(1)} + p_2 q_{lm}^{(2)}}, \quad (1)$$

а до сукупності B – $p_{lm}^{(2)} = 1 - p_{lm}^{(1)}$. Враховуючи незалежність характеристик ξ_l , ймовірність належності об'єкта зі значеннями $\xi_1 = \bar{x}_{1m_1}$, $\xi_2 = \bar{x}_{2m_2}$, ..., $\xi_l = \bar{x}_{lm_l}$ до сукупності A можна знайти за рекурентною формулою

$$p_l^{(1)} = \mathbf{P}(A / \xi_1 = \bar{x}_{1m_1}, \dots, \xi_l = \bar{x}_{lm_l}) = \frac{p_{l-1}^{(1)} q_{lm_l}^{(1)}}{p_{l-1}^{(1)} q_{lm_l}^{(1)} + p_{l-1}^{(2)} q_{lm_l}^{(2)}}, \quad (2)$$

$$p_l^{(2)} = 1 - p_l^{(1)}, \quad (3)$$

$$p_0^{(1)} = p_1, \quad p_0^{(2)} = p_2. \quad (4)$$

Замінивши ймовірності, що входять до формул (2) – (4), на їх оцінки, побудовані за навчаючими вибірками, знайдемо оцінки ймовірностей $p_h^{(1)}$ та $p_h^{(2)} = 1 - p_h^{(1)}$. Оцінками ймовірностей p_1 та p_2 можуть бути, відповідно $\bar{p}_1 = 0,5$, $\bar{p}_2 = 0,5$, якщо із сукупностей A і B було одержано незалежні вибірки, об'єми яких ніяк не відображають об'єми цих сукупностей, чи $\bar{p}_1 = \frac{n_1}{n}$, $\bar{p}_2 = \frac{n_2}{n}$, якщо вибірки одержані розбиттям вибірки із об'єднаної сукупності, і їх об'єми пропорційні об'ємам сукупностей.

Оцінити ймовірності $q_{lm}^{(j)}$ можна, знайшовши надійні інтервали для них. Для спрощення викладок введемо такі позначення: p – оцінювана ймовірність, n – об'єм вибірки, ν – відносна частота, з якою у вибірці зустрічається значення, ймовірність якого оцінюється. Враховуючи асимптотичну нормальність величини $\frac{nv - np}{\sqrt{np(1-p)}}$, можна знайти наближений надійний інтервал для p із заданим рівнем надійності:

$$\left(\frac{2nv + \varepsilon^2 - \varepsilon \sqrt{4nv(1-\nu) + \varepsilon^2}}{2(n + \varepsilon^2)}; \frac{2nv + \varepsilon^2 + \varepsilon \sqrt{4nv(1-\nu) + \varepsilon^2}}{2(n + \varepsilon^2)} \right). \quad (5)$$

Тут ε є розв'язком рівняння $\mathbf{P}\left(\left|\frac{nv - np}{\sqrt{np(1-p)}}\right| < \varepsilon\right) = \gamma$, а γ – рівень надійності. За достатньо великого n можна взяти $\varepsilon = u_{\frac{\gamma+1}{2}}$ – квантиль порядку $\frac{\gamma+1}{2}$ стандартного нормального розподілу.

Вибір оцінок $\hat{q}_{lm}^{(j)}$ ймовірностей $q_{lm}^{(j)}$ з інтервалів типу (5) потрібно здійснювати з врахуванням того, що $\sum_{m=1}^{k_l} \hat{q}_{lm}^{(j)} = 1$. Один з варіантів такого вибору додає до середини інтервалу (5) поправку

$$\Delta_l^{(j)} = \frac{(2 - k_l) \varepsilon^2}{2k_l(n_j + \varepsilon^2)}, \quad (6)$$

яка рівномірно розподіляє між оцінками $\hat{q}_{lm}^{(j)}$ відмінність від 1 суми середин згаданих інтервалів. Таким чином оцінками ймовірностей $q_{lm}^{(j)}$ є статистики

$$\hat{q}_{lm}^{(j)} = \frac{n_j k_l \nu_{lm}^{(j)} + \varepsilon^2}{k_l(n_j + \varepsilon^2)}, \quad (7)$$

де $\nu_{lm}^{(j)}$ – відносна частота значення \bar{x}_{lm} характеристики ξ_l в j -тій навчаючій вибірці. Зауважимо, що для бінарних характеристик ($k_l = 2$) поправка (6) дорівнює нулю і відповідні оцінки є серединами інтервалів (5).

З властивостей оцінки (7) слід відмітити такі.

1. Оцінка (7) належить інтервалу (5).

Дійсно, це підтверджують очевидні нерівності

$$\left| \Delta_l^{(j)} \right| = \frac{\left(1 - \frac{2}{k_l}\right) \varepsilon^2}{2(n_j + \varepsilon^2)} < \frac{\varepsilon^2}{2(n_j + \varepsilon^2)} \leq \frac{\varepsilon \sqrt{4n_j \nu_{lm}^{(j)}(1 - \nu_{lm}^{(j)}) + \varepsilon^2}}{2(n_j + \varepsilon^2)}.$$

2. Оцінка (7) асимптотично незміщена.

Для доведення, врахувавши, що $\mathbf{M} \nu_{lm}^{(j)} = q_{lm}^{(j)}$, знайдемо

$$\mathbf{M} \hat{q}_{lm}^{(j)} = \frac{n_j k_l \mathbf{M} \nu_{lm}^{(j)} + \varepsilon^2}{k_l(n_j + \varepsilon^2)} = \frac{n_j k_l q_{lm}^{(j)} + \varepsilon^2}{k_l(n_j + \varepsilon^2)} \rightarrow q_{lm}^{(j)}, \quad n_j \rightarrow \infty.$$

3. Дисперсія оцінки (7) еквівалентна дисперсії відносної частоти $\nu_{lm}^{(j)}$ і прямує до нуля при $n_j \rightarrow \infty$. Це впливає з рівності

$$\mathbf{D} \hat{q}_{lm}^{(j)} = \frac{n_j^2 \mathbf{D} \nu_{lm}^{(j)}}{(n_j + \varepsilon^2)^2} = \frac{n_j^2}{(n_j + \varepsilon^2)^2} \cdot \frac{q_{lm}^{(j)}(1 - q_{lm}^{(j)})}{n}.$$

Надійний інтервал для ймовірності належності об'єкта до однієї з двох сукупностей. Такий інтервал може бути знайдений з допомогою відомих надійних інтервалів для умовних ймовірностей значень кожної характеристики в розглянутих сукупностях. Нехай $q_{lm}^{(j)} \in (\alpha_{lm}^{(j)}; \beta_{lm}^{(j)})$ з ймовірністю $\gamma_{lm}^{(j)}$. Досліджуючи екстремуми функції

$$f(x, y, z) = \frac{xy}{xy + (1-x)z},$$

можемо стверджувати, що врахування перших l характеристик приводить до такого надійного інтервалу $(p_l^-; p_l^+)$ для ймовірності належності об'єкта до першої ($j=1$) із сукупностей, для якого мають місце рівності

$$p_l^- = \frac{p_{l-1}^- \alpha_{lm_l}^{(1)}}{p_{l-1}^- \alpha_{lm_l}^{(1)} + (1 - p_{l-1}^-) \beta_{lm_l}^{(2)}}, \quad (8)$$

$$p_l^+ = \frac{p_{l-1}^+ \beta_{lm_l}^{(1)}}{p_{l-1}^+ \beta_{lm_l}^{(1)} + (1 - p_{l-1}^+) \alpha_{lm_l}^{(2)}}; \quad (9)$$

$$p_0^- = p_0^+ = \bar{p}_1. \quad (10)$$

Тут ми вважаємо, що досліджуваний об'єкт має значення l -тої характеристики, рівне \bar{x}_{lm_l} . Ітеруючи рівності (8), (9) з врахуванням (10), одержимо, що врахування всіх h характеристик дає надійний інтервал $(p_j^-; p_j^+)$ з межами:

– для ймовірності належності до сукупності A

$$p_1^- = \frac{\prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(1)}}{\prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(1)} + \prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(2)} \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}}, \quad p_1^+ = \frac{\prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(1)}}{\prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(1)} + \prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(2)} \frac{\bar{p}_2}{\bar{p}_1}}; \quad (11)$$

– для ймовірності належності до сукупності B

$$p_2^- = \frac{\prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(2)}}{\prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(2)} + \prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(1)} \frac{\bar{p}_1}{\bar{p}_2}}, \quad p_2^+ = \frac{\prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(2)}}{\prod_{l=1}^h \beta_{lm_l}^{(2)} + \prod_{l=1}^h \alpha_{lm_l}^{(1)} \frac{\bar{p}_1}{\bar{p}_2}}. \quad (12)$$

Надійність цих інтервалів становить $\gamma = \prod_{l=1}^h \gamma_{lm_l}^{(1)} \gamma_{lm_l}^{(2)}$. Якщо ж вибрати надійності інтервалів для ймовірностей $q_{lm_l}^{(j)}$ однаковими, то вони повинні бути рівними $2^{h\sqrt{\gamma}}$ для забезпечення надійності γ .

Метод дискримінації. Побудова дискримінуючого правила повинна враховувати наведені вище викладки та умови проведення дослідження. Найбільш очевидним і водночас досить вимогливим щодо величини об'єму навчаючої вибірки є наступне. Досліджуваний об'єкт слід віднести до сукупності A , якщо $p_2^+ < p_1^-$, або – до сукупності B , якщо $p_1^+ < p_2^-$. Інші варіанти є випадками невизначеності. Такий підхід вимагає вузьких надійних інтервалів з межами (11), (12), що зменшує ймовірність невизначеності. Цього можна досягти за умови достатньо великих об'ємів навчаючих вибірок.

Інший варіант дискримінуючого правила простіший для застосування, хоча виглядає дещо необґрунтованим. Згідно цього правила спостереження відноситься до сукупності A , якщо ймовірність з (2) $p_h^{(1)} > 0,75$, та до сукупності B , якщо $p_h^{(1)} < 0,25$. В інших випадках маємо невизначеність. Надійність такого методу може бути оцінена з використанням частоти правильних дискримінацій за екзаменууючою вибіркою. Вибір меж 0,25 та 0,75 є безперечно умовним, хоча досвід робіт [1], [2], вказує на можливість побудови досить якісного методу дискримінації саме з такими межами.

На завершення ще раз звернемо увагу на основне обмеження щодо застосування описаного методу. Характеристики, що застосовуються для класифікації, повинні бути незалежними в сукупності.

Література

1. Матейко Г.Б. Прогнозування ускладнень вагітності і пологів у жінок з герпесвірусною інфекцією / Г.Б. Матейко, М.М. Осипчук, Б.М. Дикий // Галицький лікарський вісник. – 2006. – Т.13. – № 4. – С. 103-105.
2. Матейко Г.Б. Антенатальне прогнозування внутрішньоутробного інфікування плода у вагітних жінок з герпетичною і цитомегаловірусною інфекціями / Г.Б. Матейко, М.М. Осипчук // Архів клінічної медицини. – 2006. – № 2(10). – С. 45-47.

Стаття постуила в редакційну колегію 02.11.2009 р.

Рекомендовано до друку чл.-кореспондентом НАН України, професором **Портенком М.О.**

ABOUT A CONSECUTIVE DISCRIMINATORY ANALYSIS

M. M. Osypchuk

Precarpathian National University named by Vasil Stefanic,

76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57;

e-mail: mvosvp@ukr.net

A task is examined about the evaluation of probabilities of that an object belongs each of two aggregates. We consider known his independent descriptions. The method of classification of such objects is built.

Keywords: *prognostication, classification, discriminant analysis, statistics.*

УДК 539.3+622.248.62

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ПРОСТОРОВИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ПРИХОПЛЕНОЇ БУРИЛЬНОЇ КОЛОНИ ПІД ДІЄЮ ВИБУХОВОЇ ХВИЛІ

В. М. Мойсишин, В. Д. Яцишин

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.

Адаптовано метод просторових характеристик Р. Кліфтона для розв'язку осесиметричних задач динамічної пружності. Практичним втіленням методу став розрахунок напружено-деформованого стану вільної та прихопленої бурильних колон під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку труби.

Ключові слова: метод просторових характеристик, система різницевих рівнянь, осесиметрична задача динамічної пружності, напружено-деформований стан порожнистого кругового циліндра, прихоплена бурильна колона, ударна хвиля вибуху.

1. Актуальність та постановка задачі дослідження. Одним з найбільш ефективних методів ліквідації аварій та ускладнень у процесі спорудження свердловин є застосування енергії вибуху. Завдяки використанню торпед і перфораторів вдається ліквідувати різні аварії, пов'язані з прилипанням труб до стінки свердловини під дією перепаду тиску, заклинюванням в жолобах і місцях звуження отвору свердловини, утворенням сальника на бурильній колоні, втратою циркуляції промивальної рідини, залишенням сторонніх предметів на вибої і т.п. Спосіб торпедування у свердловині застосовують для "струшування" бурильного інструменту, розгвинчування різьбових з'єднань, обривання колони з метою підняття на поверхню вільної ділянки труби. За допомогою перфораторів вирішують задачі підвищення віддачі пластів, проведення ізоляційних робіт, відновлення циркуляції у свердловині тощо.

У [1] проаналізовано застосування прострільно-вибухової апаратури (ПВА) для ліквідації прихоплень бурильного інструменту на підприємствах Держкомгеології України за 1973-1997 р.р. Із 506 розвідувальних свердловин, на яких відбулося прихоплення, ПВА використовувалась у 283 (54,9%) випадках. Торпедування було успішним у 248 з 277 випадків, а перфорація – у 7 з 8 випадків, що склало відповідно 89,5% та 87,5%.

Вивчення напруженого стану бурильних труб і визначення їх радіальних зміщень є актуальною задачею під час проведення вибухових робіт у свердловині з метою ліквідації прихоплень бурильної колони без руйнування елементів останньої. Перед початком операції визначають

межі прихоплення, прикладають до колони цілком визначені силу натягу і крутний момент, перекидають усю прихоплену ділянку труб циліндричним зарядом [2]. Внаслідок дії ударної хвилі на внутрішню стінку колони затрубна порода відкладається і ущільнюється. Описаний метод "струшування" є найбільш ефективним на початкових стадіях аварії, коли хімічні процеси у свердловині ще не призвели до утворення механічно стійких осадів.

Для з'ясування особливостей напружено-деформованого стану (НДС) труби в умовах, що розглядаються, розв'яжемо методом просторових характеристик осесиметричну задачу пружності для порожнистого кругового циліндра при динамічній дії тиску на його внутрішню поверхню.

Затрубний матеріал, що взаємодіє з зовнішньою стінкою колони радіусом r_2 (рис.1), представимо пружними елементами з коефіцієнтом жорсткості K_0 . Тиск ударної хвилі $p(t)$ на внутрішню стінку труби радіусом r_1 задано залежністю

$$p(t) = \begin{cases} p_m \frac{t}{\theta_1}, & 0 \leq t \leq \theta_1; \\ p_m e^{-\frac{t-\theta_1}{\theta_2}}, & t > \theta_1, \end{cases} \quad (1)$$

де p_m – амплітуда імпульсу тиску, Па;

θ_1 – час наростання імпульсу, с;

θ_2 – характерний час спаду навантаження, с.

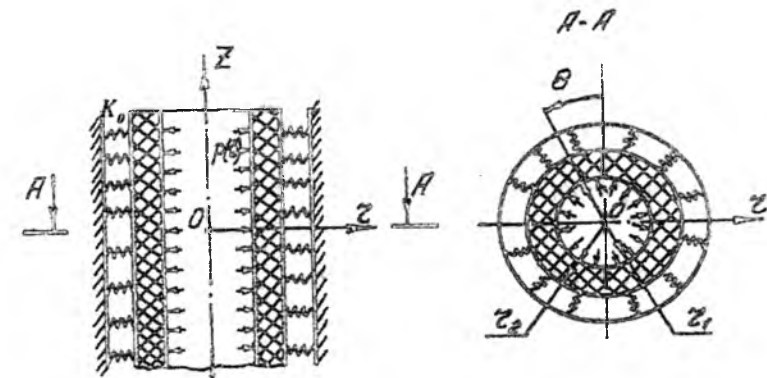


Рис. 1. Розрахункова схема

Метою даного дослідження є розвиток методу просторових характеристик для розв'язку осесиметричних задач динамічної пружності.

Метод просторових характеристик, який вперше запропоновано Р. Кліфтоном [3] для розв'язку плоских задач динамічної теорії пружності, має низку переваг у порівнянні з іншими чисельними методами.

По-перше, точність розв'язку порядку $O(k^3)$ (k – крок за часом) можна отримати, використовуючи для подання перших і других похід-

них скінченнорізницеві формули порядку точності $O(k^2)$ і $O(k)$ відповідно.

По-друге, метод прямим шляхом призводить до відповідних різницевих рівнянь у граничних точках.

У роботі [4] метод просторових характеристик використано для дослідження хвильових процесів у суцільному напівнескінченному циліндрі з навантаженим торцем. Дослідження точності розв'язку там не наведено. Але оскільки чисельний розв'язок знайдено при $\Delta r = \Delta z = 0,025$; $k = 0,0125$ ($\Delta r, \Delta z$ – кроки за координатами, k – крок за часом), можна припустити, що саме за таких значень $\Delta r, \Delta z, k$ одержано прийнятні значення точності розв'язку.

У пропонованій роботі метод просторових характеристик при значно більших кроках по координатах і часу ($\Delta r = 0,1$; $\Delta z = 0,16$; $k = 0,07$) дає досить високу точність. Розбіжність між повною енергією і виконаною роботою по деформуванню труби на інтервалі часу 1000 мкс склала 1,78%.

2. Виведення різницевих рівнянь

Оскільки суть методу просторових характеристик детально подано в роботах [3, 4], то обмежимося коротким викладом основних положень.

У циліндричній системі координат r, z, θ для осесиметричного випадку, коли змінні є функціями координат r, z , рівняння руху можна подати у вигляді:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u_r}{\partial t^2}, \\ \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial r} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\tau_{rz}}{r} &= \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для одержання замкненої системи до рівнянь (2) приєднаємо співвідношення закону Р. Гука:

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_r}{\partial r}, \\ \sigma_z &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z}, \\ \sigma_\theta &= \lambda \Omega + 2\mu \frac{u_r}{r}, \\ \tau_{rz} &= \mu \left(\frac{\partial u_r}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial r} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

λ, μ – сталі Ламе;

u_r, u_z – переміщення вздовж осей r та z відповідно;

Ω – об'ємна деформація,

$$\Omega = \frac{\partial u_r}{\partial r} + \frac{u_r}{r} + \frac{\partial u_z}{\partial z}. \quad (4)$$

Розв'язок будемо шукати в змішаній формі (в напруженнях і переміщеннях). Співвідношення (2) – (4) подамо у безрозмірній формі. Для цього додамо і віднімемо вирази для напружень σ_r та σ_z , отримані рівняння закону Р. Гука продиференціюємо за часом, введемо безрозмірні величини за формулами:

$$\begin{aligned} \bar{r} &= \frac{r}{h}, \quad \bar{z} = \frac{z}{h}, \quad \bar{t} = \frac{at}{h}, \\ p &= \frac{\sigma_r + \sigma_z}{2\rho a^2}, \quad \rho = \frac{\sigma_r - \sigma_z}{2\rho a^2}, \quad \sigma = \frac{\sigma_\theta}{\rho a^2}, \quad \tau = \frac{\tau_{rz}}{\rho a^2}; \\ \bar{u}(\bar{r}, \bar{z}, \bar{t}) &= \frac{1}{a} \frac{\partial u_r}{\partial t}, \quad \bar{v}(\bar{r}, \bar{z}, \bar{t}) = \frac{1}{a} \frac{\partial u_z}{\partial t}; \\ a &= \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad b = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}, \quad \gamma = \frac{a}{b} > 1, \end{aligned}$$

де h – характерний розмір (в даному випадку товщина циліндра), a – швидкість хвиль розширення, b – швидкість хвиль зсуву, ρ – густина матеріалу труби.

Виконавши вказані операції, отримаємо систему рівнянь в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} u_t - p_r - q_r - \tau_z &= \frac{p + q - \sigma}{r}, \\ v_t - p_z + q_z - \tau_r &= \frac{\tau}{r}, \\ \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} p_t - u_r - v_z &= \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{u}{r}, \\ \gamma^2 q_t - u_r - v_z &= 0, \\ \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 2} \sigma_t - u_r - v_z &= \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 2} \frac{u}{r}, \\ \gamma^2 \tau_t - u_z - v_r &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де індекси означають частинне диференціювання за вказаною незалежною змінною.

Перетворимо систему рівнянь (5) до симетричного виду. Для цього знайдемо різницю між п'ятим і третім рівняннями системи. Визначивши вираз для u/r , підставимо його в третє рівняння. Одержимо систему рівнянь, матриці за t, r, z якої симетричні:

$$\begin{aligned} u_t - p_r - q_r - \tau_z &= \frac{p + q - \sigma}{r}, \\ v_t - p_z + q_z - \tau_r &= \frac{\tau}{r}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\gamma^4}{3\gamma^2-4} p_t - \frac{\gamma^2(\gamma^2-2)}{3\gamma^2-4} \sigma_t - u_r - v_z &= 0, \\ \gamma^2 q_t - u_r + v_z &= 0, \\ -\frac{\gamma^2(\gamma^2-2)}{3\gamma^2-4} p_t + \frac{\gamma^2(\gamma^2-1)}{3\gamma^2-4} \sigma_t &= \frac{u}{r}, \\ \gamma^2 \tau_t - u_z - v_r &= 0. \end{aligned} \quad (6)$$

Наступний етап виведення різницевої рівнянь достатньо повно відображено в роботі [4]. Запишемо тільки результат цього етапу – систему рівнянь у приростах:

$$\begin{aligned} \delta u - \frac{k}{2r} \delta p - \frac{k}{2r} \delta \sigma + \frac{k}{2r} \delta \sigma &= \frac{a_1 - a_3}{2} - \frac{b_2 - b_4}{2} - \frac{k}{2} (p_r + q_r + \tau_z), \\ \delta v - \frac{k}{2r} \delta \tau &= \frac{a_2 - a_4}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} - \frac{k}{2} (p_z - q_z + \tau_r), \\ -\frac{\gamma^2-2}{\gamma^2-1} \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2}{\gamma^2-1} \delta p &= \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{2} - \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \frac{k}{2} (u_r + v_z) + \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2(\gamma^2-1)} \frac{k}{r} u, \\ \gamma^2 \delta q &= \frac{a_1 + a_2 + a_3 + a_4}{2} + \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \frac{k}{2} (u_r - v_z), \\ \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2(\gamma^2-2)}{3\gamma^2-4} \delta p - \frac{\gamma^2(\gamma^2-1)}{3\gamma^2-4} \delta \sigma &= -\frac{k}{r} u, \\ \gamma \delta \tau &= \frac{b_1 - b_2 + b_3 - b_4}{2} - \frac{k}{2\gamma} (u_z + v_r), \end{aligned} \quad (7)$$

де

$$a_i = -\frac{k}{2} S_1(\alpha_i) - W_1(\alpha_i),$$

$$b_i = -\frac{k}{2} S_2(\alpha_i) - W_2(\alpha_i),$$

$S_1(\alpha_i)$, $W_1(\alpha_i)$, $S_2(\alpha_i)$, $W_2(\alpha_i)$ – вирази, що визначаються співвідношеннями вздовж біхарактеристик ([3], [4]).

Запишемо ці вирази в розгорнутому вигляді:

$$W_1(0) = (u' - u_1) + (p' - p_1) + (q' - q_1),$$

$$W_1\left(\frac{\pi}{2}\right) = (v' - v_2) + (p' - p_2) - (q' - q_2),$$

$$W_1(\pi) = -(u' - u_3) + (p' - p_3) + (q' - q_3),$$

$$W_1\left(\frac{3}{2}\pi\right) = -(v' - v_4) + (p' - p_4) - (q' - q_4),$$

$$S_1(0) = -\frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} v_{z1} - \tau_{z1} - \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \left(\frac{u}{r}\right)_1 + \left(\frac{p+q-\sigma}{2}\right)_1,$$

(8)

$$\begin{aligned} S_1\left(\frac{\pi}{2}\right) &= -\frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} u_{r2} - \tau_{r2} - \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \left(\frac{u}{r}\right)_2 - \left(\frac{\tau}{r}\right)_2, \\ S_1(\pi) &= -\frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} v_{z3} + \tau_{z3} - \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \left(\frac{u}{r}\right)_3 + \left(\frac{p+q-\sigma}{r}\right)_3, \\ S_1\left(\frac{3}{2}\pi\right) &= -\frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} u_{r4} + \tau_{r4} - \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} \left(\frac{u}{r}\right)_4 + \left(\frac{\tau}{r}\right)_4. \end{aligned} \quad (9)$$

Індекси 1, 2, 3, ... означають, що значення змінної необхідно брати у відповідній точці (рис. 2). Слід звернути увагу на те, що величину r не можна вважати постійною в точках 1, 3.

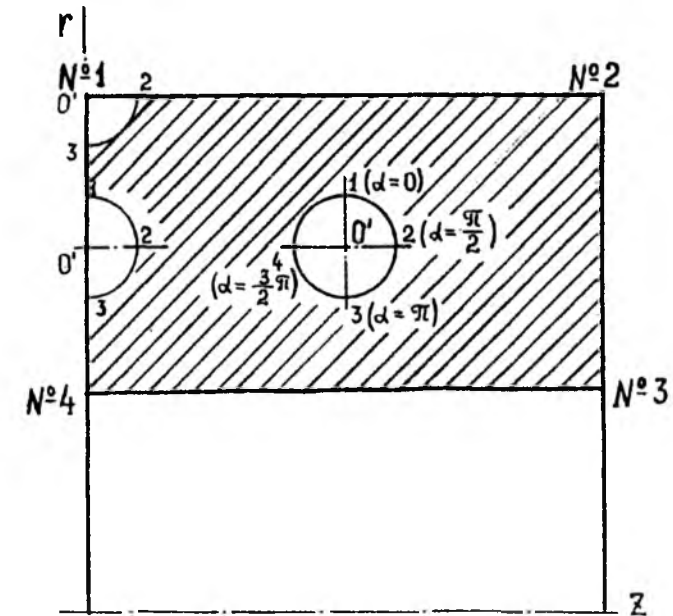


Рис. 2. Досліджувана ділянка труби, для якої складаємо систему різницевої рівнянь

Далі знаходимо вирази $a_1 + a_3$, $a_1 - a_3$, $a_2 + a_4$ і т.д.

$$a_1 + a_3 = -\frac{k}{2} [S_1(0) + S_1(\pi)] - [W_1(0) + W_1(\pi)].$$

Після відповідних підстановок і групувань отримаємо:

$$\begin{aligned} a_1 + a_3 &= \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} - \frac{k}{2} (v_{z1} + v_{z3}) + \frac{\gamma^2-2}{\gamma^2} - \frac{k}{2} \left[\left(\frac{u}{r}\right)_1 + \left(\frac{u}{r}\right)_3 \right] + (u_1 - u_3) + \\ &+ \frac{k}{2} \left[\left(\frac{p+q-\sigma}{r}\right)_1 - \left(\frac{p+q-\sigma}{r}\right)_3 \right] + (p_1 + p_3) + (q_1 + q_3) + \frac{k}{2} (\tau_{z1} - \tau_{z3}) - 2(p+q). \end{aligned} \quad (10)$$

Так само чином можна отримати інші вирази ($a_2 + a_4$, $a_1 - a_3$, ...).

Співвідношення типу (10) містить значення функцій і їх похідних в т. 1, 2, 3, 4 (рис. 2). Необхідно подати їх через значення функцій та їх похідних в точці $O'(r, z)$.

Співвідношення, що входять до (10) перетворюємо у наступні вирази:

$$\begin{aligned} & f(r+ck, z) - f(r-ck, z), \\ & f(r+ck, z) + f(r-ck, z), \\ & f_r(r, z+ck) - f_r(r, z-ck), \\ & f_r(r, z+ck) + f_r(r, z-ck), \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{де } c = \begin{cases} 1 - \frac{\alpha \epsilon \gamma}{\gamma} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r}, \\ \frac{1}{\gamma} - \frac{\alpha \epsilon \gamma}{\gamma} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r} \frac{\partial \tau}{\partial r} \frac{\partial \sigma}{\partial r}. \end{cases}$$

Можна знайти також вирази, отримані після перестановки z і r . Розвинення функції $f(r, z)$ в ряд Тейлора в околі точки $O'(r, z)$ свідчить, що вирази (11) відрізняються від наведених нижче величин членами порядку $O(k^3)$:

$$2ckf_r(r, z), 2f(r, z) + (ck)^2 f_{rr}(r, z), 2ck^2 f_{rz}(r, z), 0. \quad (12)$$

Після відповідних перетворень отримаємо систему рівнянь для внутрішньої точки, яка відрізняється від наведеної в роботі [4].

$$\begin{aligned} \delta u - \frac{k}{2r} \delta p - \frac{k}{2r} \delta q + \frac{k}{2r} \delta \sigma &= -\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r^2} u + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u_r + \frac{k^2}{2} u_{rr} + \\ &+ \frac{k^2}{2\gamma^2} u_{zz} + \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} v_{rz} + \frac{k}{r} (p + q - \sigma) + k(p_r + q_r + \tau_z), \\ \delta v - \frac{k}{2r} \delta \tau &= \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u_z + \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} u_{rz} + \frac{k^2}{2\gamma^2} v_{rr} + \frac{k^2}{2} v_{zz} + \\ &+ k(p_z - q_z + \tau_r) + \frac{k}{r} \tau, \\ -\frac{\gamma^2 + 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} \delta p &= \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{r} u + k(u_r + v_z) - \frac{k^2}{2r^2} (p + q - \sigma) + \\ &+ \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r + \tau_z) + \frac{k^2}{2} (p_{rr} + q_{rr} + p_{zz} - q_{zz} + 2\tau_{rz}), \\ \gamma^2 \delta q &= k(u_r - v_z) - \frac{k^2}{2r^2} (p + q - \sigma) + \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r - \tau_z) + \\ &+ \frac{k^2}{2} (p_{rr} + q_{rr} - p_{zz} + q_{zz}), \\ \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 2)}{3\gamma^2 - 4} \delta p - \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 1)}{3\gamma^2 - 4} \delta \sigma &= -\frac{k}{r} u, \\ \gamma^2 \delta \tau &= k(u_z + v_r) + \frac{k^2}{2r} (p_z + q_z - \sigma_z + \tau_r) + \frac{k^2}{2} (2p_{rz} + \tau_{rr} + \tau_{zz}) - \frac{k^2}{2r^2} \tau. \end{aligned} \quad (13)$$

Під час складання різницьових рівнянь для поверхонь і кутових точок необхідно врахувати, що деякі біхарактеристики проходять поза досліджуваною областю і їх необхідно виключити із системи рівнянь (7).

Наведемо виведення системи різницьових рівнянь для лівої торцевої поверхні (рис.2). З рівняння (7) необхідно виключити співвідношення a_4 і b_4 . Для цього додамо перше і шосте, друге і третє рівняння та від другого віднімемо четверте. П'яте рівняння залишимо без змін.

Отримаємо:

$$\begin{aligned} \delta v - \gamma^2 \delta q - \frac{k}{2r} \delta \tau &= -\frac{a_1 + a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} + a_2 - \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k}{2} (u_r - v_z) - \\ &- \frac{k}{2} (p_z - q_z + \tau_r), \\ -\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{2r} \delta u + \delta v + \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} \delta p - \frac{k}{2r} \delta \tau &= \frac{a_1 + a_3}{2} + \frac{b_1 - b_3}{2} + a_2 + \\ &+ \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2(\gamma^2 - 1)} \frac{k}{r} u - \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k}{2} (u_r + v_z) - \frac{k}{2} (p_z - q_z + \tau_r), \\ \delta u - \frac{k}{2r} \delta p - \frac{k}{2r} \delta q + \frac{k}{2r} \delta \sigma + \gamma \delta \tau &= \frac{a_1 - a_3}{2} + \frac{b_1 + b_3}{2} + \\ &+ b_2 - \frac{k}{2} (u_z + v_r) - \frac{k}{2} (p_r + q_r + \tau_z), \\ \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 2)}{3\gamma^2 - 4} \delta p - \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 1)}{3\gamma^2 - 4} \delta \sigma &= -\frac{k}{r} u. \end{aligned} \quad (14)$$

Оскільки значення $a_1 + a_3, a_1 - a_3, \dots$ відомі, можна знайти $a_1, a_2, a_3, a_4, \dots$. При цьому необхідно слідкувати за тим, щоб перетворення забезпечували точність $O(k^3)$.

Систему рівнянь для довільної точки на лівій торцевій поверхні (крім кутових точок) отримаємо з рівнянь (14) шляхом підстановки в них виразів $a_1 + a_3, a_1 - a_3, \dots$:

$$\begin{aligned} \delta v - \gamma^2 \delta q - \frac{k}{2r} \delta \tau &= -k(u_r - v_z - p_z + q_z - \tau_r) + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u_z + \\ &+ \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} u_{rz} + \frac{k^2}{2} (v_{zz} - p_{rr} - q_{rr} + p_{zz} - q_{zz}) + \frac{k^2}{2\gamma^2} v_{rr} + \\ &+ \frac{k^2}{2r^2} (p + q - \sigma) - \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r - \tau_z) + \frac{k}{r} \tau, \\ -\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{2r} \delta u + \delta v + \frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} \delta p - \frac{k}{2r} \delta \tau &= \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{r} u + k(u_r + v_z + p_z - q_z + \tau_r) + \\ &+ \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u_z + \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} u_{rz} + \frac{k^2}{2\gamma^2} v_{rr} + \frac{k^2}{2} (v_{zz} + p_{rr} + q_{rr} + p_{zz} - q_{zz} + 2\tau_{rz}) - \\ &- \frac{k^2}{2r^2} (p + q - \sigma) + \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r + \tau_z) + \frac{k}{r} \tau, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \delta u - \frac{k}{2r} \delta p - \frac{k}{2r} \delta q + \frac{k}{2r} \delta \sigma + \gamma \delta \tau = & -\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} u_r + \\ & + \frac{k^2}{2} u_{rr} + \frac{k^2}{2\gamma^2} u_{zz} + \frac{k}{\gamma} (u_z + v_r) + \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma} \frac{k^2}{2} v_{rz} + \frac{k}{r} (p + q - \sigma) + \\ & k(p_r + q_r + \tau_z) + \frac{k^2}{2\gamma r} (p_z + q_z - \sigma_z + \tau_r) + \frac{k^2}{2\gamma} (2p_{rz} + \tau_{rr} + \tau_{zz}) - \frac{k^2}{2\gamma r^2} \tau, \\ \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 2)}{3\gamma^2 - 4} \delta p - \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 1)}{3\gamma^2 - 4} \delta \sigma = & -\frac{k}{r} u. \end{aligned} \quad (15)$$

Для отримання замкненої системи слід записати ще два рівняння, які складемо, виходячи з крайових умов.

Так само можна вивести рівняння для інших поверхонь.

При складанні системи рівнянь для кутової точки № 1 (рис. 2) з рівнянь (7) необхідно виключити a_1, b_1, a_4, b_4 , оскільки ці біхарактеристики проходять поза розглядуваною областю. При цьому отримаємо два рівняння, яких для деяких типів крайових умов може виявитися недостатньо [3]. Додаткове (третє) рівняння можна отримати безпосередньо із співвідношень на біхарактеристиках.

Після всіх перетворень система різницевих рівнянь для першої кутової точки набуде вигляду:

$$\begin{aligned} \left(1 + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1}\right) \delta u - \delta v - \left(\frac{\gamma^2}{\gamma^2 - 1} + \frac{k}{2r}\right) \delta p - \frac{k}{2r} \delta q + \frac{k}{2r} \delta \sigma + \left(\gamma + \frac{k}{2r}\right) \delta \tau = \\ = -\left(\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2 - 1} \frac{k}{r} + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r^2}\right) u - k(u_r + v_z + p_z - q_z - p_r - q_r + \tau_r - \tau_z) + \\ + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} (u_r - u_z) + \frac{k}{\gamma} (u_z + v_r) + \frac{k^2}{2} (u_{rr} - p_{rr} - q_{rr} - v_{zz} - p_{zz} + q_{zz} - 2\tau_{rz}) + \\ + \frac{k^2}{2\gamma^2} (u_{zz} - v_{rr}) - \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} (u_{rz} - v_{rz}) + \frac{k}{r} \left(1 + \frac{k}{2r}\right) \times (p + q - \sigma) - \\ - \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r + \tau_z) + \frac{k^2}{2\gamma r} (p_z + q_z - \sigma_z + \tau_r) + \frac{k^2}{2\gamma} (2p_{rz} + \tau_{rr} + \tau_{zz}) - \\ - \frac{k}{r} \left(1 + \frac{k}{2\gamma r}\right) \tau, \\ \delta u + \delta v - \frac{k}{2r} \delta p - \left(\gamma^2 + \frac{k}{2r}\right) \delta q + \frac{k}{2r} \delta \sigma - \frac{k}{2r} \delta \tau = -\frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r^2} u - \\ - k(u_r - p_r - q_r - \tau_r - v_z - p_z + q_z - \tau_z) + \frac{\gamma^2 - 2}{\gamma^2} \frac{k^2}{2r} (u_r + u_z) + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} + \frac{k^2}{2} (u_{rr} - p_{rr} - q_{rr} + v_{zz} + p_{zz} - q_{zz}) + \frac{k^2}{2\gamma^2} (u_{zz} + v_{rr}) + \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \frac{k^2}{2} (u_{rz} + v_{rz}) + \\ + \frac{k}{r} \left(1 + \frac{k}{2r}\right) \cdot (p + q - \sigma) - \frac{k^2}{2r} (p_r + q_r - \sigma_r - \tau_z) + \frac{k}{r} \tau - \frac{k^2}{\gamma} (\tau_{rr} - \tau_{zz}), \\ \frac{k}{2r} \delta u + \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 2)}{3\gamma^2 - 4} \delta p - \frac{\gamma^2(\gamma^2 - 1)}{3\gamma^2 - 4} \delta \sigma = -\frac{k}{r} u. \end{aligned} \quad (16)$$

Наступні три (або чотири) рівняння отримаємо з крайових умов. Аналогічно можна скласти рівняння для інших кутових точок.

3. Чисельне представлення частинних похідних.

До правих частин рівнянь (13), (15), (16) входять частинні похідні, які необхідно представити в різницевому виді. Для забезпечення точності розв'язку порядку $O(h^3)$ необхідно і достатньо, щоб залишковий член в різницевих формулах для обчислення перших і других похідних був відповідно $O(h^2)$ і $O(h)$. Таку точність дає трьохточкова схема. Краще використати центровані різниці. У випадку, коли деякі точки з'являються на межі досліджуваної області, необхідно використати односторонні різниці.

Запишемо формули для обчислення похідних (3) з використанням центрованих різниць:

$$\begin{aligned} f_r(m, n) &= \frac{1}{2\Delta r} [f(m+1, n) - f(m-1, n)] - O(\Delta r^2), \\ f_{rr}(m, n) &= \frac{1}{\Delta r^2} [f(m+1, n) - 2f(m, n) + f(m-1, n)] - O(\Delta r^2), \\ f_{rz}(m, n) &= \frac{1}{4\Delta r \Delta z} [f(m+1, n+1) - f(m-1, n+1) - f(m+1, n-1) + f(m-1, n-1)] \end{aligned} \quad (17)$$

і з використанням односторонніх різниць:

$$\begin{aligned} f_r(m, n) &= \frac{1}{2\Delta r} [-3f(m, n) + 4f(m+1, n) - f(m+2, n)] + O(\Delta r^2), \\ f_{rr}(m, n) &= \frac{1}{\Delta r^2} [f(m, n) - 2f(m+1, n) + f(m+2, n)] - O(\Delta r), \\ f_{rz}(m, n) &= \frac{1}{2\Delta r \Delta z} [f(m+1, n+1) - f(m+1, n-1) - f(m, n+1) + f(m, n-1)] \end{aligned} \quad (18)$$

для точок поверхні $m = 1, 1 < n < n_f$,

$$f_{rz}(m, n) = \frac{1}{\Delta r \Delta z} [f(m+1, n+1) - f(m+1, n) - f(m, n+1) + f(m, n)]$$

для кутової точки $m = 1, n = 1$.

Замінивши r на z , можна записати формули для визначення похідних за незалежною змінною z .

Може здатися, що чим вищий порядок різницевої формули, за якою знаходились похідні, тим точнішим буде загальне рішення. Однак, як свідчать чисельні експерименти, використання різницевої схеми більш високого порядку точності недоцільне. Точність рівнянь (7) і точність обчислення похідних повинні бути узгоджені. Порушення цього призводить або до нестійкості, або до зниження точності розв'язку.

4. Чисельний приклад. Вивчення НДС вільної та прихопленої труб

Методом просторових характеристик визначимо параметри НДС вільної та прихопленої (рис.1) труб під дією динамічного навантаження на внутрішній поверхні, заданого залежністю (1).

До моменту навантаження циліндр є вільним від напружень. Задача розв'язується для початкових нульових умов:

$$p = q = \sigma = \tau = u = 0, \quad t \leq 0. \quad (19)$$

Граничні умови мають вигляд:

для внутрішньої поверхні $\left(r = \frac{b}{2}, 0 < z < l \right)$

$$\begin{aligned} \delta p + \delta q &= \delta p_i, \\ \delta \tau &= 0; \end{aligned} \quad (20)$$

для зовнішньої поверхні $\left(r = \frac{a}{2}, 0 < z < l \right)$

$$\begin{aligned} \delta p + \delta q &= 0, \\ \delta \tau &= 0; \end{aligned} \quad (21)$$

для торцевих поверхонь $\left(z = 0 \vee z = l, \frac{b}{2} < r < \frac{a}{2} \right)$

$$\begin{aligned} \delta p - \delta q &= 0, \\ \delta \tau &= 0; \end{aligned} \quad (22)$$

для кутових точок

$$\begin{aligned} \delta p + \delta q &= 0, & \delta p + \delta q &= \delta p_i, \\ \delta p - \delta q &= 0, & \text{або} & \delta p - \delta q = 0, \\ \delta \tau &= 0 & \delta \tau &= 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Рівняння (13), (15), (16) та інші разом з граничними умовами утворюють замкнені системи, які можна розв'язати відносно приростів.

За наведеним алгоритмом створено програму, яка дає змогу знаходити параметри НДС труби в фіксовані моменти часу, а також напруження і переміщення (як функції часу) в фіксованих точках циліндра. Для контролю точності і стійкості розв'язку на кожному кроці за часом обчислювались повна енергія циліндра і виконана робота, які порівнювались, і у такий спосіб визначалась похибка.

Розрахунки проводились за наступних вихідних даних:

амплітуда імпульсу тиску $p_m = 0,2 \cdot 10^6 \text{ Па}$, час наростання імпульсу $\theta_1 = 20 \cdot 10^{-6} \text{ с}$, характеристичний час спаду навантаження $\theta_2 = 80 \cdot 10^{-6} \text{ с}$;

зовнішній та внутрішній діаметри труби $D = 0,146 \text{ м}$; $d = 0,0683 \text{ м}$; модуль Юнга $E = 0,19 \cdot 10^6 \text{ МПа}$, коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,27$, густина матеріалу труби $\rho = 0,774 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3$, жорсткість прихоплюючої породи $K_0 = 20 \cdot 10^6 \text{ Н/м}$.

Характеристики розрахункової сітки:

$$\Delta r = 0,1; \Delta z = 0,16; k = 0,07.$$

Результати розрахунків подано на рис.3–6.

Як бачимо, частоти поздовжніх коливань прихопленої труби у порівнянні з вільною зростають, а амплітуди напружень σ_z утричі зменшуються (рис.3), що природно, оскільки на зовнішню стінку прихопленої труби діють додаткові в'язі, накладені внаслідок обвалу або осипання розбурюваної породи.

Зіставляючи діаграми (рис.4а та 4б) бачимо, що, зменшення амплітуд колових напружень σ_θ на внутрішній поверхні прихопленої труби, призводить до змін характеру залежності $\sigma_\theta(t)$. На час дії імпульсу (0,2 мс) амплітуди напружень σ_θ доволі значні, а після дії імпульсу процес стає усталеним з амплітудою втричі меншою. Для вільної труби перехідний процес на час дії імпульсу майже не помітний, хоча амплітуди напружень σ_θ , зрозуміло, більші в 7 разів.

Як свідчать рис. 5а і 5б, так само характеризують процес графіки залежностей $u_r(t)$. На період дії імпульсу прихоплена труба "дихає" з амплітудами в 5-6 раз більшими, ніж в усталеному режимі коливань. Це і сприяє вивільненню прихопленої ділянки бурильного інструменту. Для вільної труби такого стрибка амплітуд не спостерігається.

Графіки 6а, 6б зміни в часі безрозмірної повної енергії циліндра використовуються для оцінки збіжності хвильового процесу. Зрозуміло, що вільна труба накопичує енергії більше, ніж прихоплена. Порівнюючи повну внутрішню енергію циліндра з роботою, виконаною ударною хвилею за деформування циліндра, можна оцінити похибку обчислень (у нас вона не перевищує 1,8%). Якщо процес розбіжний, то спостерігається різне зростання повної внутрішньої енергії і дисбаланс між енергією і роботою.

Висновки

1. У статті застосовано метод просторових характеристик Р. Дж. Кліфтона для розв'язку осесиметричних задач динамічної пружності.

2. З метою практичного втілення методу розраховано напружено-деформований стан вільної і прихопленої бурильних колон під дією вибухової хвилі на внутрішню стінку труби.

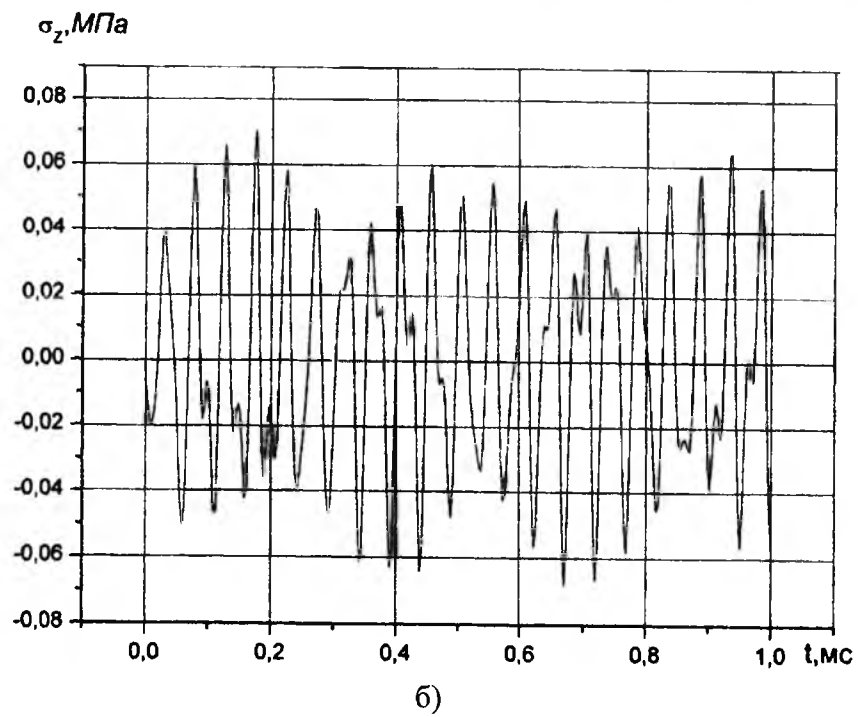
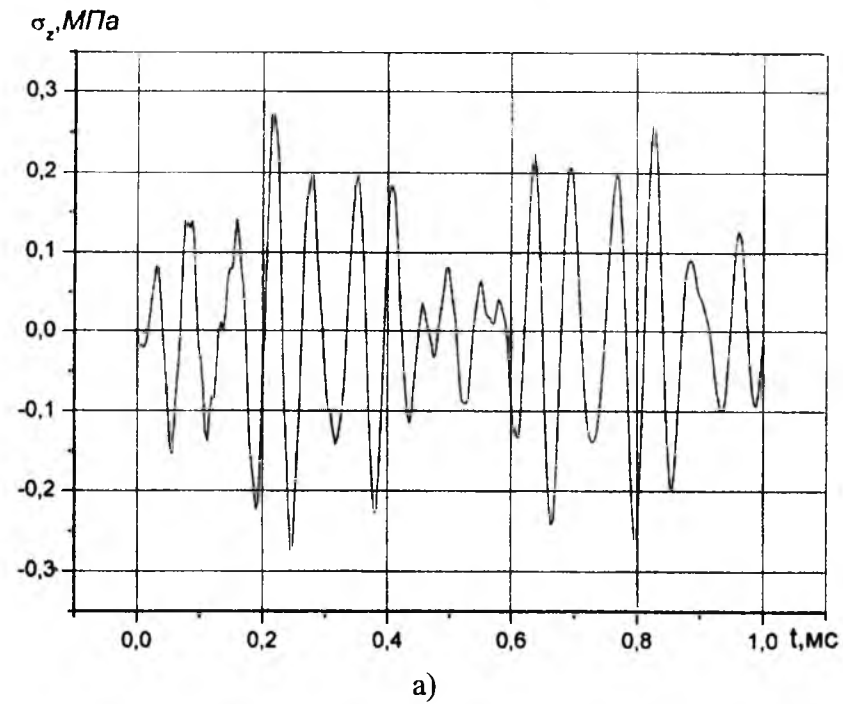


Рис. 3. Графіки зміни в часі осевого напруження σ_z на внутрішній поверхні труби (а – вільної, б – прихопленої)

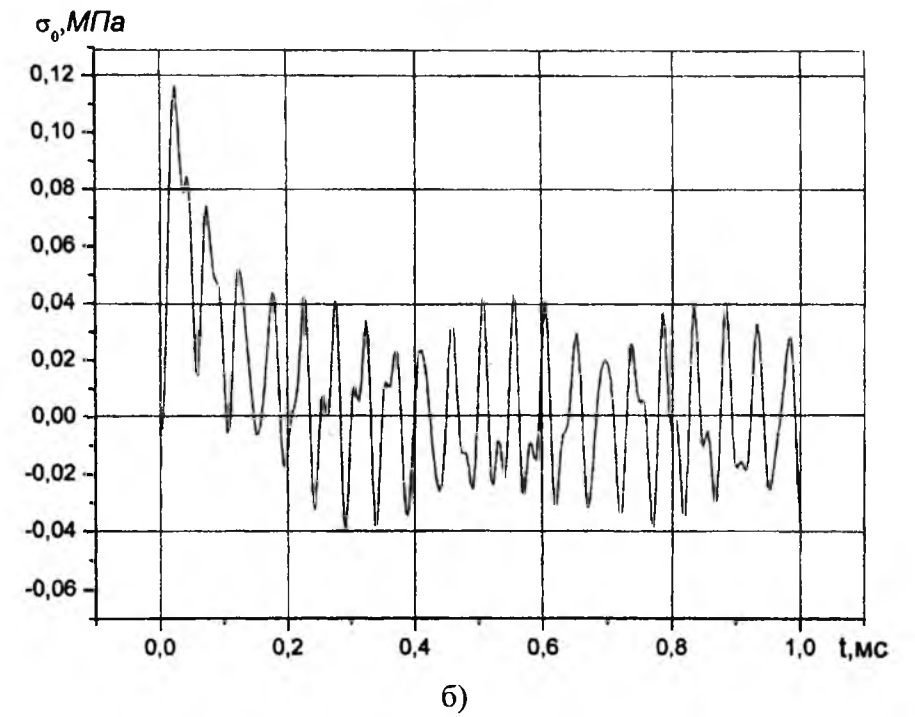
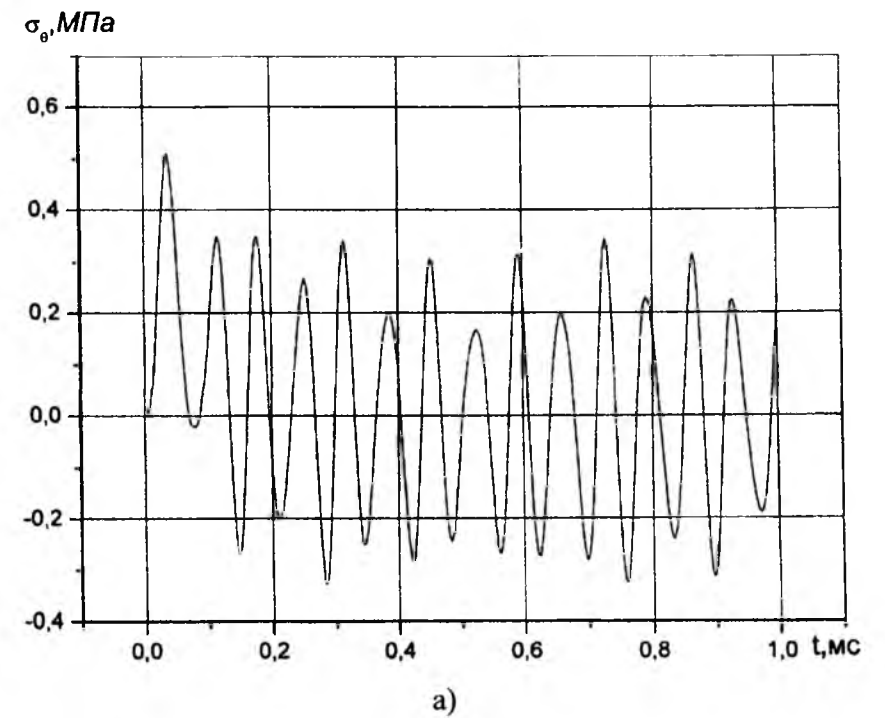


Рис. 4. Графіки зміни в часі колового напруження σ_θ на внутрішній поверхні труби (а – вільної, б – прихопленої)

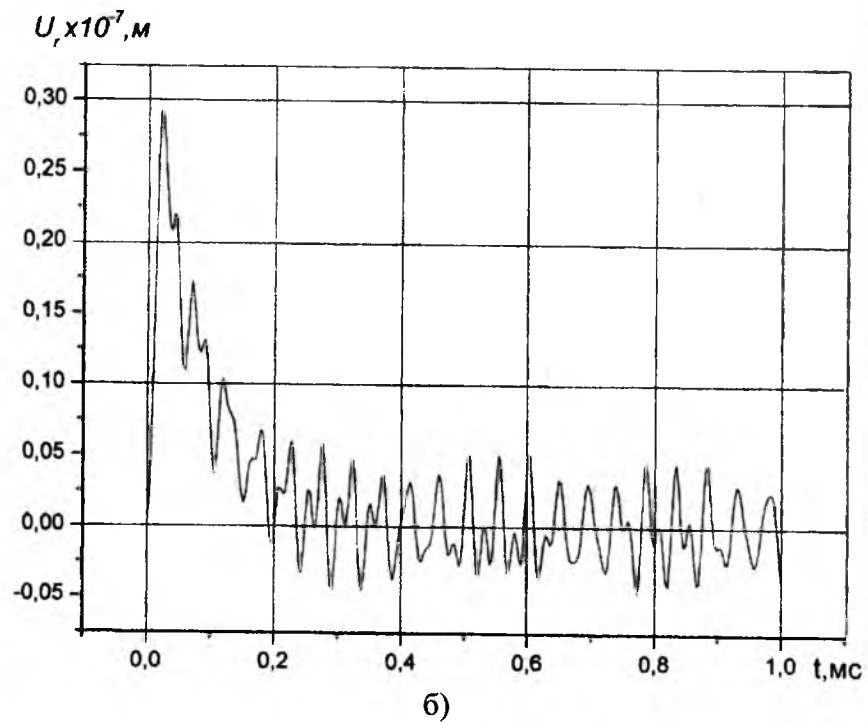
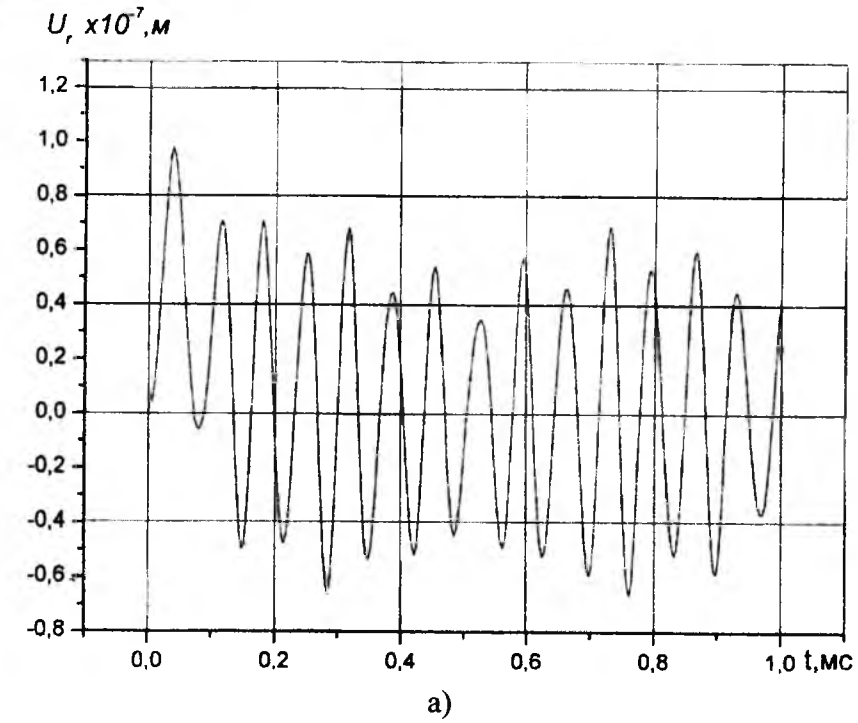


Рис. 5. Графіки зміни в часі радіальних переміщень u_r внутрішньої поверхні труби (а – вільної, б – прихопленої)

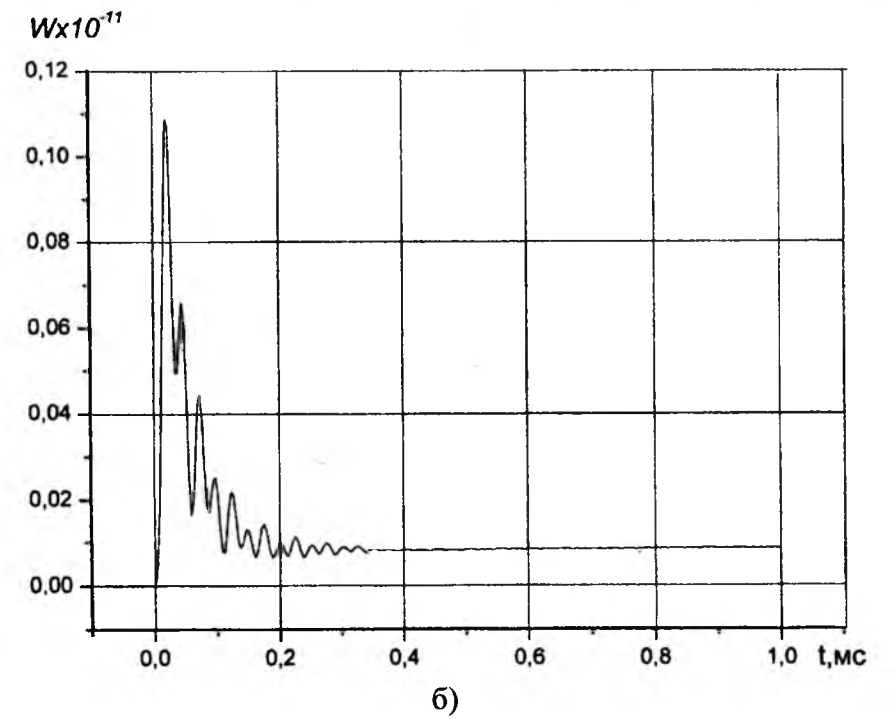
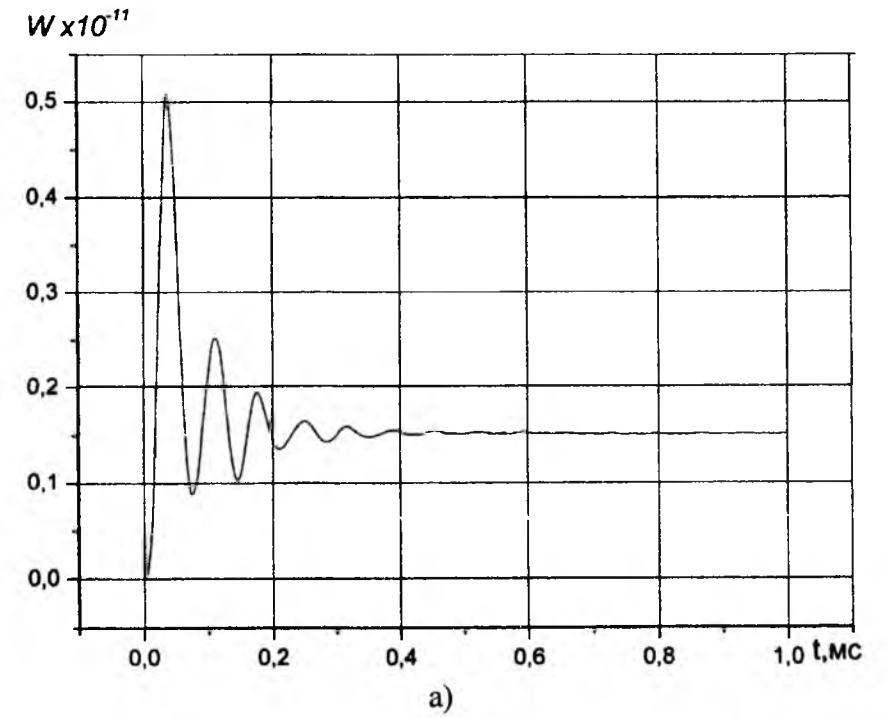


Рис. 6. Графіки зміни в часі повної внутрішньої енергії W труби (а – вільної, б – прихопленої; енергія W – безрозмірна)

Література

1. Мойсишин В.М. Застосування прострільно-вибухової апаратури для ліквідації прихоплень в геологорозвідувальному бурінні / В.М. Мойсишин, С.В. Гошовський // Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Серія: Буріння нафтових і газових свердловин, Розвідка та експлуатація нафтових і газових родовищ. – 1997. – Вип.34. – С. 69-74.
2. Техническая инструкция по прострелочно-взрывным работам в скважинах. – М.: Недра, 1978. – 64 с.
3. Клифтон Р.Дж. Разностный метод в плоских задачах динамической упругости / Р.Дж. Клифтон // Сб. переводов “Механика”. – 1968. – №1.
4. Сабодаш П.Ф. Применение метода пространственных характеристик к решению осесимметричных задач по распространению упругих волн / П.Ф. Сабодаш, Р.А. Чередниченко. – ПМТФ, 1971. – №4.

Стаття поступила в редакційну колегію 12.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Векериком В.І.

**APPLICATION OF METHOD OF SPATIAL DESCRIPTIONS
FOR STUDY OF TENSE-DEFORMATION BEING
OF THE GRABBED BORING COLUMN UNDER ACTION
OF EXPLOSIVE WAVE**

V. M. Moisyshyn, V. D. Yatsyshyn

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankiv'sk, Carpats'ka street, 15;
ph. +380 (3422); e-mail: math@nung.edu.ua.*

In the article the method of spatial descriptions R. Clifton is adapted for the decision of axessymmetrical tasks of dynamic resiliency. A calculation became practical embodiment of method of the tense-deformation being of free and grabbed boring columns under action of explosive wave on the internal wall of pipe.

Key words: *method of spatial descriptions, system of difference equalizations, axessymmetrical task of dynamic resiliency, tense-deformation being of hollow circular cylinder, grabbed boring column, shock wave of explosion.*

**ГРАВІТАЦІЯ В МЕХАНІЦІ ТА ГРАВІТАЦІЙНІ ЯВИЩА
В КОСМОНАВТИЦІ**

К. Г. Левчук, С. Г. Степаненко

*Національний технічний університет України
“Київський політехнічний університет”;
м. Київ; тел. +380 (44) 454-94-07*

Розглянуто питання сил гравітації та природа появи різноманітних аномальних гравітаційних явищ. Викладені концепція та результати досліджень, що пояснюють механізми появи «вагомості» залежно від розмірів і періоду обертання планет Сонячної системи навколо власних осей і руху об'єкта, гравітацію якого досліджуємо. Побудовано графіки залежності прискорень вільного падіння на поверхнях планет та поблизу них в середовищі Марле. Показано, що живі організми залежать від сил гравітації.

Ключові слова: *гравітація, сила тяжіння, сила інерції, планета, космічні технології.*

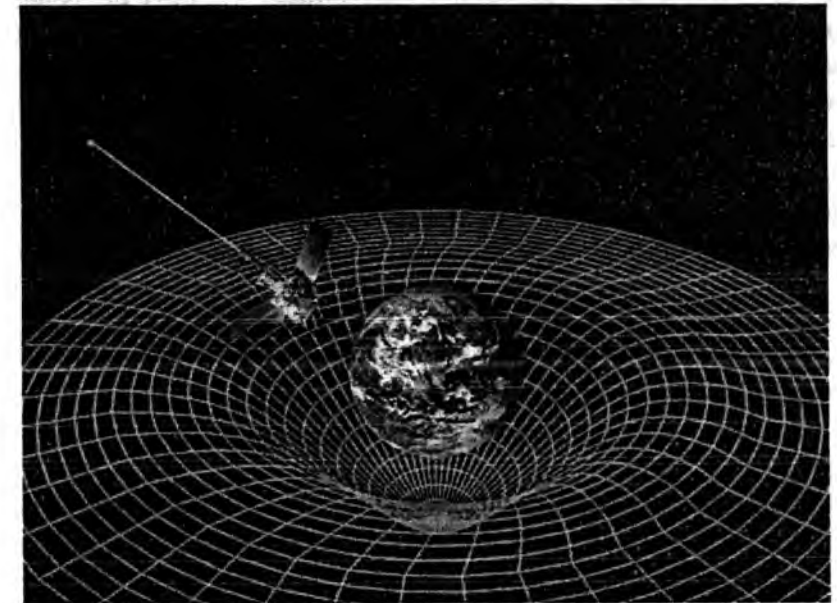


Рис. 1. Гравітаційне поле Землі

Вступ

Сучасні тенденції в розвитку механіки ініціювали появу таких гравітаційних явищ, як мікро-, макро-, гіпергравітація, левітація, невагомість. Всі ці поняття тісно пов'язані з поняттям «вагомості» і знайшли застосування у найрізноманітніших прикладних науках і техніці, а саме: в космонавтиці, авіації, пароплаванні, біофізиці, медицині, біомеханіці, спортивній метрології, конструюванні машин і апаратів.

Постановка задачі

Залежно від «вагомості», що викликана силою тяжіння та рухом об'єкта, необхідно дослідити явища, що виникають у космонавтиці [1]. Методи теоретичної механіки, що не зважаючи на появу таких нових теорій, як загальна теорія відносності, теорія Ейнштейна-Картана, скалярно-тензорна теорія гравітації (теорія Бранса-Дикке), біометрична теорія Розена або релятивістська теорія гравітації Лагунова, вузлова квантова гравітація, теорія Калуци-Клейна або теорія Шмутцера [2] з достатньою точністю уможливають розрахунок гравітаційних характеристик поблизу планет. На прикладі Сонячної системи покажемо абсолютні та відносні значення прискорень вільного падіння на поверхні планет та в космічному просторі поблизу них.

Вагомість як фундаментальне поняття механіки

Теорії гравітації змінювалися з часом. Історично першою була описана сила взаємодії між тілами математичною теорією в античні часи. Аристотель вважав, що об'єкти з різною масою падають з різною швидкістю. Галілео Галілей за допомогою випробувань спростував це твердження і спробував пояснити рух планет. Нині відомо, що у безповітряному просторі всі тіла прискорюються однаково. У дослідженнях з небесної механіки Й. Кеплер (три закони про рух планет) узагальнив учення М. Коперніка. У 1687 р. Ісаак Ньютон відкрив закон Всесвітнього тяжіння, що описує загальну поведінку сили тяжіння [3]. Згодом з'явилися комбіновані теорії гравітації і світла, що спиралися на концепцію ефіру або корпускулярну теорію світла, наприклад, теорія гравітації Фатіо-Лесажа. Після створення спеціальної теорії відносності виникла необхідність поєднати останню з гравітаційними силами. З розвитком техніки вчені-механіки отримали можливість експериментально перевірити основні положення теорії відносності і гравітації: лоренц-інваріантності, гравітаційного відхилення світла й еквівалентності інертної і гравітаційної мас (експеримент Етвеша). Ці експерименти й інші судження зрештою привели до відкриття у 1915 р. загальної теорії відносності Альбертом Ейнштейном [4], яка досконаліше описувала гравітацію в термінах геометрії «простір – час».

Оскільки масштаби викривлень світових траєкторій і гравітаційні поля за Загальною теорією відносності занадто малі, в області космонавтики і галактичної механіки, ньютонівський підхід і нині залишається найбільш адекватним [4].

У теоретичній механіці під вагою \vec{P} розуміють силу, що є рівнодійною сил тяжіння та інерції:

$$\vec{P} = \vec{F} + \vec{\Phi} = m\vec{g},$$

де \vec{F} – сила взаємного притягання тіл, $\vec{\Phi}$ – сила інерції рухомого об'єкта, вагу якого визначають. Саме фізична складова сили ваги зумовлює аномальні гравітаційні явища.

Сила тяжіння в гравітаційній теорії Ньютона

Сила тяжіння є визначальною для сили ваги. Згідно з класичною механікою Ньютона [3] матеріальні точки притягуються з силою, що має назву сили тяжіння та описується законом Всесвітнього тяжіння

$$\vec{F} = -G \frac{m \cdot M}{R^3} \vec{R} = m\vec{a}_g,$$

де $G = 6,673 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/(\text{кг}\cdot\text{с}^2)$ – гравітаційна стала, m і M – маси тіл, \vec{R} – радіус вектор, проведений з центра тіла, яке притягує, до центра тіла, що притягується.

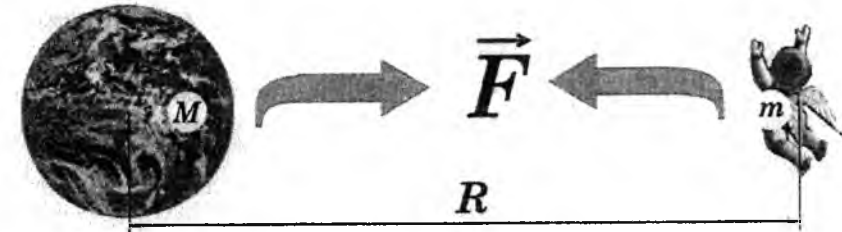


Рис. 2. До визначення сили тяжіння

Сила тяжіння – далекодіюча фундаментальна взаємодія в природі, яка властива всім матеріальним тілам. Це означає, що незалежно від виду руху тіл, у будь-якій точці простору сила тяжіння залежить тільки від взаємного положення тіл в даний момент часу і їхніх мас.

За сучасними даними сила тяжіння є універсальною взаємодією, що, на відміну від інших сил, всім тілам без винятку надає однакове прискорення

$$\vec{a}_g = -G \frac{M}{R^3} \vec{R}.$$

У випадку взаємодії точки і тіла має місце розподіл ваги по тілу:

$$\vec{F} = -G \cdot m \int_0^{R} \int_0^{360^\circ} \int_0^{90^\circ} \gamma(\rho, \lambda, \varphi) \frac{\vec{\rho}}{\rho^3} d\rho \cdot d\lambda \cdot d\varphi = m\vec{a}_g,$$

де m – маса точки, що притягується до центра тіла; γ – густина тіла (ρ – відстань від центра тіла до точки; λ, φ – відповідно довгота і широта місця на поверхні тіла), $\vec{\rho}$ – радіус вектор, проведений з центра тіла до точки.

Великі космічні об'єкти – планети, зірки та галактики – мають величезні маси (M), внаслідок чого виникають значні гравітаційні поля, що викликають прискорення \vec{a}_g .

Прискорення вільного падіння планет Сонячної системи

Сила гравітації, тобто сила, що діє на тіло на поверхні планети, складається із сили тяжіння $\vec{F} = m\vec{a}_g(\varphi, \rho)$ та переносної сили інерції $\vec{\Phi}_e = -m\vec{a}_e$ ($a_e = \omega^2 \rho \cos \varphi$ – прискорення, викликане обертанням планети навколо власної осі, де ω – кутова швидкість обертання планети навколо власної осі, ρ – відстань від центра планети до тіла на її поверхні, φ

– широта місця розташування тіла на планеті). На полюсах планет і у космічному просторі сила гравітації визначається лише силою тяжіння $\vec{F} = m\vec{a}(\rho)$. Тоді прискорення вільного падіння на поверхні \vec{g}_{iia} і поблизу планети \vec{g}_{ie} відповідно визначатиметься за формулами

$$\vec{g}_{iia} = \vec{a}_g - \vec{a}_e \quad \text{і} \quad \vec{g}_{ie} = \vec{a}_g.$$

У математичному пакеті *Maple* були розраховані значення прискорень вільного падіння на поверхнях та поблизу поверхонь дев'яти планет Сонячної системи та Місяця (супутника Землі). Параметри, від яких залежить прискорення планет Сонячної системи, що були використані для розрахунків, зведено до таблиці.

Табл. Загальні відомості про планети Сонячної системи

Назва планети	Маса, $\times 10^{24}$, кг	Діаметр, км	Період обертання, год	Відстань від Сонця, млн.км	Період обертання по орбіті (земних років)
Юпітер	1900	142984	9,93	778,33	11,86
Сатурн	570	120536	10,23	1 426,98	29,46
Уран	86,8	51 118	17,25	2 847,00	84,01
Нептун	102,9	48 600	15,80	8 997,00	164,79
Земля	5,98	12 756	23,56	149,60	365,25
Венера	4,87	12 102	5293,93	108,20	224,70
Марс	0,64	6 786	24,62	227,90	687,00
Меркурій	0,33	4 878	1381,79	57,90	87,97
Плутон	0,1196	2 600	6,00	11 800,00	248,4
Місяць (супутник Землі)	0,0736	3 476	27,30	149,98	27,3

Розраховані прискорення вільного падіння на поверхнях планет з їх відносними розмірами представлені на рисунку, а на графіках – прискорення вільного падіння на поверхнях та поблизу Юпітера, Землі, Марса і Плутона (на відстанях до 10% від радіуса планети).

На графіках стрибки прискорень зумовлені зникненням переносних сил інерції у випадках миттєвих відокремлень від поверхонь планет.

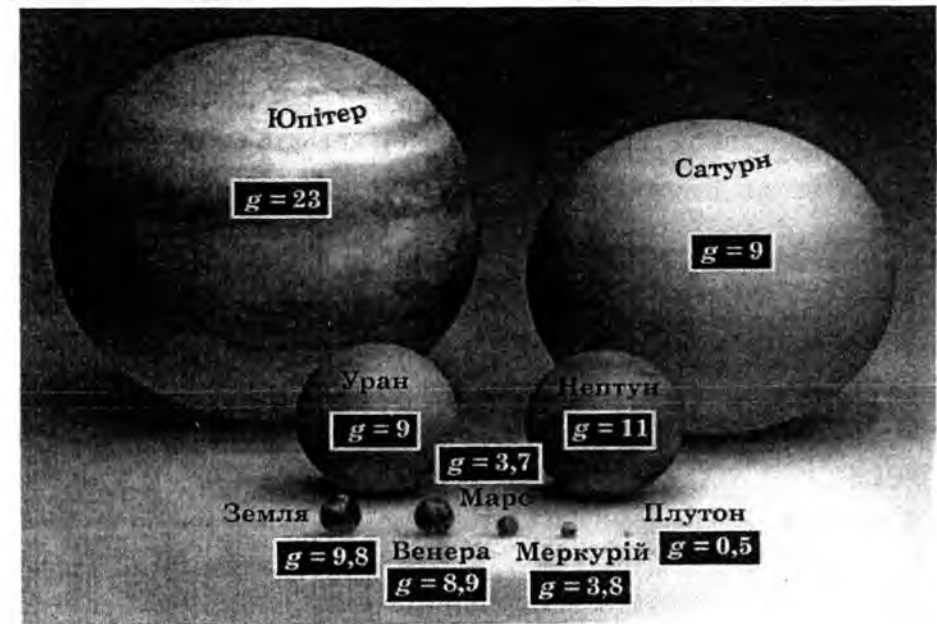


Рис. 3. Прискорення вільного падіння на поверхнях планет

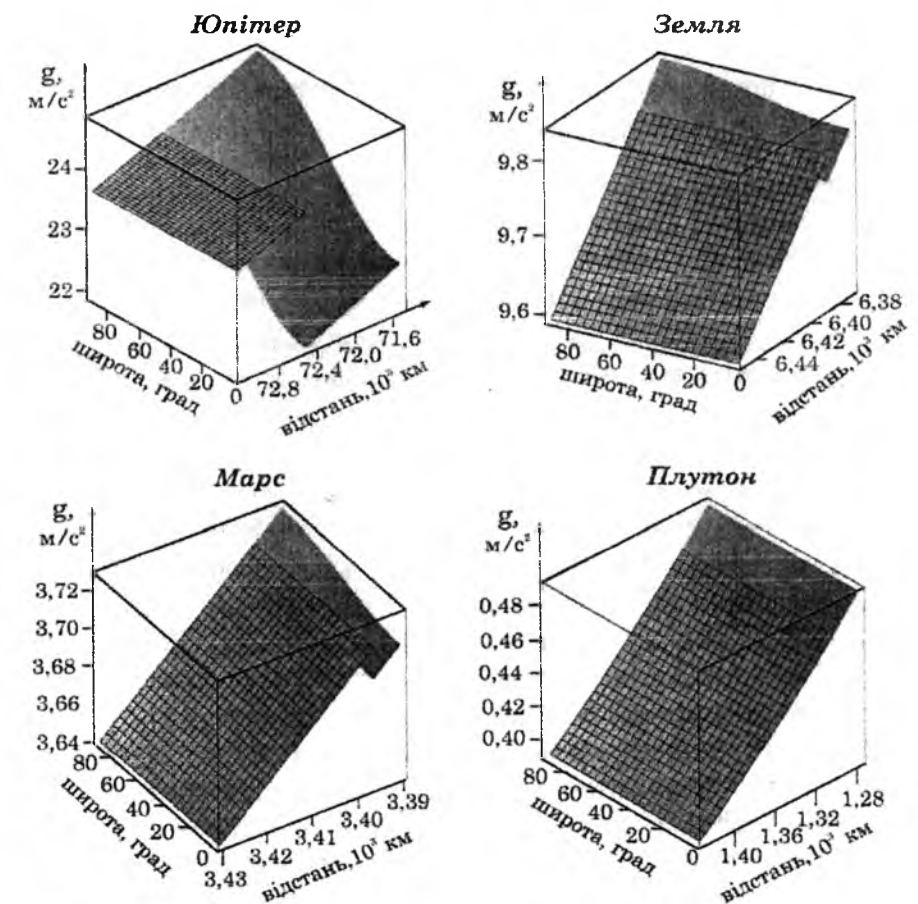


Рис. 4. Залежності прискорення вільного падіння від відстані до поверхні планет

Природа гравітації в космонавтиці

Досить часто зникнення ваги (мікрогравітацію) плутають зі зникненням сили гравітаційного тяжіння. Але це не так, стан невагомості виникає за рахунок сили інерції, викликані нерівномірним рухом

$$\vec{\Phi} = -m\vec{a},$$

де \vec{a} – прискорення.

Тобто

$$\vec{P} = m(\vec{a}_g - \vec{a}) = m\vec{g}.$$

Як приклад можна привести ситуацію на космічній станції [5]. На висоті 350 кілометрів (висота перебування станції) прискорення вільного падіння має значення $a_g = 8,8 \text{ м/с}^2$, що лише на 10 % менше, ніж на поверхні Землі. У випадку, коли тіло, що рухається по круговій орбіті з першою космічною швидкістю

$$V = \sqrt{g \cdot R} = 7,9 \text{ км/с},$$

має прискорення

$$a = \frac{V^2}{R + 350} = \frac{7,91^2}{6371 + 350} = 0,009 \text{ км/с}^2 = 9,286 \text{ м/с}^2.$$

Отже, $g = a_g - a = 0,486 \text{ м/с}^2$.

В залежності від значення g/a_g розрізняють поняття мікро- ($g/a_g \leq 0,1$) та макрогравітації ($g/a_g > 1$).

На Землі короточасний стан невагомості виникає під час руху літаків по балістичній траєкторії чи в початковий момент вільного падіння тіла в атмосфері, коли опір повітря ще невеликий. Таке ж явище відбувається під час підйому у ліфті, що гальмує з прискоренням $\vec{a} = \vec{a}_g$.

На атракціоні «сюрприз», де майданчик швидко обертається в горизонтальній площині, сила інерції притискає людей до стінки і збільшуючи їхню силу ваги із зростанням кутової швидкості обертання.

Для виходу у відкритий космос подібно до того, як електрон у атомі повинен обертатись навколо ядра, щоб не впасти на нього (тобто врівноважити силу притягання протилежно заряджених частинок), космонавт повинен обертатись навколо планети, щоб врівноважити силу гравітаційного притягання до неї. Зрозуміло, що зі збільшенням швидкості обертання він потрапить у поле гравітації сусідньої планети. Тому, щоб подорожувати у галактиці, людина мусить перебувати у різних станах – від мікро- до гіпервагомості.

Перелічені стани «вагомості» штучно створюють для тренування космонавтів [6]. Якщо літак перебуває у стані рівноваги, то кулька, підвішена на нитці у кабіні пілота, зазвичай натягує нитку вниз. Зрозуміло, якщо раптом нитка, на якій висить кулька, не буде натягнута, то пілот перебуватиме в стані невагомості. Таким чином, пілот повинен керувати літаком так, щоб кулька «висіла у повітрі». Заради цього літак

повинен мати прискорення $\vec{a} = \vec{a}_g$. Таким чином, всі тіла: літак, кулька, нитка, пілот і будь-яке тіло, що знаходиться в літаку, будуть падати безвідносно одне до одного.

На атракціоні «колесо огляду», що обертається у вертикальній площині, сила інерції викликає зміну сили ваги людей, які знаходяться усередині великого колеса. Сила, що змінює вагу людей від мікро- ($g/a_g \approx 0,1$) до макрогравітації ($g/a_g \approx 3$), може викликати запаморочення.

Космонавти відчувають також гіпергравітацію до $g/a_g = 3,2$ при запуску космічного корабля і близько $g/a_g = 1,4$ при їх поверненні на Землю. Серце при цьому змінює свій ритм дії, б'ється частіше і збільшуються витрати крові. Це може викликати у космонавтів критичний стан: від запаморочення до, у виняткових випадках, навіть втрати свідомості. Для запобігання цим негативним явищам космонавтів тренують у центрифугах, де можливо утримувати контрольовані дози гіпергравітації, подібні до тих, що виникають перед стартом або поверненням, і вони зможуть бути більш пристосованими до перевантажень.

А. Ейнштейн [3] спробував глибше пояснити гравітацію, замінивши поняття про поле гравітації поняттям про кривизну простору поблизу масивного тіла. Ця ідея створила підґрунтя для вивчення зірок і Всесвіту [7], ініціювавши ряд відкриттів, найцікавіше з яких – чорні дірки, що можуть бути тунелями в просторі-часі, які ведуть в інші світи. Однак, для земних практиків ця теорія не дала нічого нового ні в розрахунках, ні в поясненнях у порівнянні з уявленнями І. Ньютона оскільки жодних інших можливостей викривляти простір, крім як за допомогою дуже великих мас, у теорії Ейнштейна немає.

Чорна дірка – область у просторі-часі, гравітаційне поле якої настільки велике, що залишити її не можуть ні об'єкти, що рухаються зі швидкістю світла, ні матерія, ні інформація. Передбачається, що такі області можуть утворюватися, як результат колапсу масивних зірок. Оскільки матерія може потрапляти в чорну дірку (наприклад, з міжзоряного середовища), але не може її залишати, маса чорної дірки згодом може тільки зростати. Подібні астрофізичні об'єкти мають назву у науковій літературі "сколапсовані зірки", або «застиглі зірки», або «колапсари».

Висновки

З розвитком космічних технологій і випробувань виникла необхідність у подальшому розвитку теорій гравітації. Чимало підходів, розроблених після створення теорії Ейнштейна, були спростовані, і загальна тенденція має характер розробки найзагальніших форм теорій гравітації. Зафіксовані відхилення, ймовірно, занадто великі, щоб їх можна було пояснити з позиції хоча б однієї з цих новітніх теорій.

У даний час альтернативні теорії не підтверджені експериментально, однак ньютоніко-копернікова теорія гравітації перевірена аж до субміліметрової шкали масштабів. Саме класична теорія дозволила людині

підкорити космічний простір і відкриває перед космонавтикою нові горизонти.

Література

1. Юровицкий В.М. Космонавтика требует новой механики и нового понимания гравитации / В.М. Юровицкий. – М.: МФТИ, РГСУ, 2006.
2. Ландау Л.Д. Теоретическая физика / Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. – М.: Наука, 1988. – Т.2.
3. Newton I. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica / I. Newton. – London, 1687.
4. Альберт Эйнштейн и теория гравитации: Сборник статей / под ред. Е. Куранского. – М.: Мир, 1979. – С. 146-196.
5. Весомый фактор невесомости / К.С. Елкин, В.Л. Левтов, М.З. Мухоян, В.В. Семенченко, Г.Р. Успенский. – М.: ФГУП «ЦНИИМашиностроения», 2007.
6. Еркин А. Антигравитация / А. Еркин. – М., 2004.
7. Масевич А. Г. Эволюция звезд: теория и наблюдения / А.Г. Малевич, А.В. Тутуков. – М., Наука, 1988. – 280 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 21.09.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Векериком В.І.*

GRAVITATION IN MECHANICS AND GRAVITATION PHENOMENA IN COSMONAUTICS

C. G. Levchuk, S. G. Stepanenco
*National technical university of Ukraine
"Kiev polytechnic university";
Kiev; tel. +380 (44) 454-94-07*

The article examines the problems of gravitational forces and the nature of the various abnormal gravitational phenomena occurrence. The concept and results researches explaining mechanisms of "weightiness" occurrence depending on the sizes and the rotational period of the planets of solar system around their own axes and the movement of object whose gravitation is researched are stated in the article. Graphs showing the relation of free falling acceleration on the surface of the planets and nearby their surfaces are constructed using Maple (program). It is shown that living organisms depend on forces of gravitation.

Key words: gravitation, attractive power, force of inertia, planet, space technologies.

УДК 519.63

РЕАЛІЗАЦІЯ МЕТОДУ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ АЛЬТЕРНАТИВНИХ МОДЕЛЕЙ

С. О. Камасьва, М. Г. Федоришин

*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*

Дана робота присвячена розв'язуванню задачі про кручення призматичних стрижнів з прямокутним перерізом. При цьому розглядається можливість застосування методу скінченних елементів з використанням не лише стандартних моделей, а й альтернативних, побудованих засобами геометричного моделювання. Аналізується точність розрахунків в залежності від порядку та кількості елементів, на які розбивається поперечний переріз. Розв'язується обернена задача з метою отримання оптимізованих моделей.

Ключові слова: функція напружень, крутний момент, максимальне дотичне напруження, модель, серендиповий елемент.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день у прикладних дослідженнях все частіше використовуються наближені методи. Це пояснюється, насамперед тим, що знайти аналітичний розв'язок буває надто важко або й взагалі неможливо. Одним з найбільш популярних обчислювальних методів є метод скінченних елементів (МСЕ), який успішно застосовується під час розв'язування різних інженерних задач. Проте проблема удосконалення схем МСЕ з метою зменшення витрат на їх реалізацію є актуальною не лише в Україні, а й за її межами.

Аналіз попередніх публікацій. Поява МСЕ пов'язана з розв'язуванням задач космічних досліджень (1950 р.). Вперше він був опублікований в роботі М. Тернера, Р. Клафа, Х. Мартіна і Л. Топпа [1], яка сприяла появі нових робіт із застосуванням МСЕ до задач будівельної механіки, гідро- і тепломеханіки та ін [2]. З появою продуктивних ЕОМ вдалось прискорити проведення надскладних обчислень та отримати більш точні розрахунки. Проте робота над вдосконаленням універсальних обчислювальних програм продовжується і понині.

Ціль статті. На прикладі задачі про кручення призматичних стрижнів з прямокутним перерізом реалізувати схеми МСЕ з використанням стандартних і альтернативних моделей та розглянути можливість їх оптимізації.

Основна частина. Дана робота присвячена розв'язуванню задач про кручення призматичних стрижнів з прямокутним перерізом $2a \times 2b$ (рис. 1). Як відомо, ці задачі утворюють важливий розділ теорії пружності, а концепції, що використовуються при дослідженні кручення стри-

жнів некругового перерізу, однаково корисні як для механічних задач, так і для задач теорії поля.

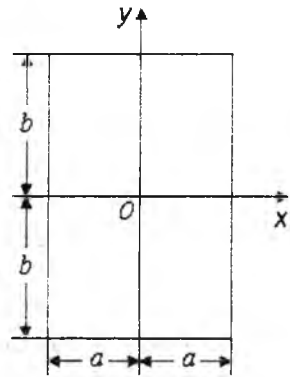


Рис. 1. Поперечний переріз стрижня

Математичною моделлю такої задачі є рівняння Пуассона:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = -2G\theta,$$

де φ – функція напружень (функція Прандтля), G – модуль зсуву матеріалу, θ – кут закручування на одиницю довжини, з крайовою умовою:

$$\varphi(x, y)|_{\Gamma} = 0,$$

де Γ – контур поперечного перерізу.

Спочатку розглянемо частинний випадок, коли поперечний переріз – квадратний. За допомогою МСЕ знайдемо максимальне дотичне напруження τ_{max} та крутний момент M_t і порівняємо з результатами, отриманими аналітично [3]. При цьому аналізуватимемо точність розрахунків в залежності від кількості та порядку серендипових елементів, на які будемо розбивати переріз, з використанням стандартних та альтернативних моделей.

Дослід 1. Покриємо поперечний переріз стрижня 4-ма білінійними елементами (рис. 2а). В силу симетрії розглянемо його четвертину (рис. 2б).

Наведемо базисні функції білінійного елемента. Зазвичай, даний елемент розглядається в нормальних координатах, коли $|\xi| \leq 1$ та $|\eta| \leq 1$, тому для вузла 1 маємо [2]:

$$N_1(x, y) = \frac{1}{4}(1-x)(1-y).$$

Решта функцій отримується з даної шляхом циклічної перестановки координат. (При розгляді довільного прямокутника $2a \times 2b$ замість ξ, η використовуються ξ/a та η/b).

Для переходу до глобальної системи координат Oxy зробимо заміну:

$$x = \xi + \frac{a}{2}, \quad y = \eta + \frac{a}{2}.$$

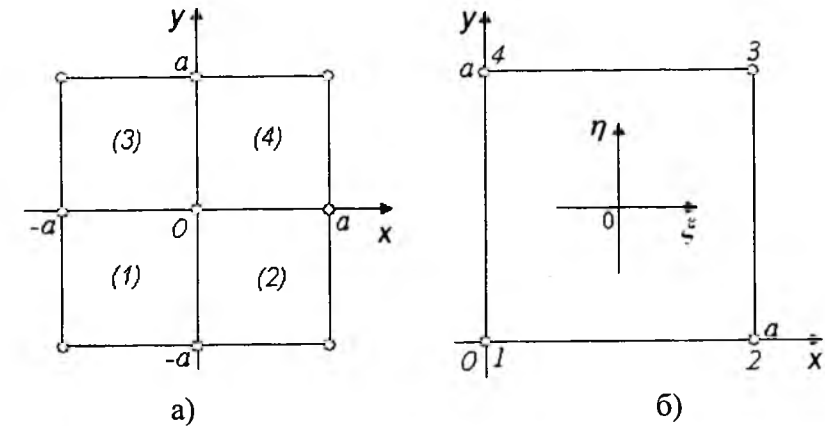


Рис. 2. Покриття поперечного перерізу чотирма білінійними СЕ

Поставлену задачу зручно розв'язувати в варіаційній постановці, яка пов'язана з розглядом функціоналу

$$\chi = \int_V \left[\frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 - 2G\theta\varphi \right] dV.$$

Мінімізація χ за набором вузлових значень шуканої функції $\{\Phi\}$ призводить до системи лінійних рівнянь

$$\sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} [B^{(e)}]^T [D^{(e)}] [B^{(e)}] dV \{\Phi\} = \sum_{e=1}^E \int_{V^{(e)}} [N^{(e)}]^T (2G\theta) dV,$$

де $[N^{(e)}]$ – функції форми довільного елемента (e), $[B^{(e)}]$ – матриця градієнтів, $[D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$.

Розв'язавши СЛАР відносно $\{\Phi\}$, знайдемо

$$\varphi^{(e)} = [N^{(e)}] \{\Phi\} = \begin{bmatrix} N_1^{(e)} & N_2^{(e)} & \dots & N_r^{(e)} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Phi_1 \\ \Phi_2 \\ \dots \\ \Phi_r \end{Bmatrix},$$

де r – число вузлів елемента.

Як відомо, крутний момент (геометрична жорсткість) шукається за формулою:

$$M_t = 2 \int_{-a}^a \int_{-b}^b \varphi(x, y) dx dy, \quad (1)$$

де a, b – половини сторін прямокутного перерізу.

В [3] приводиться і спрощена формула для визначення M_t :

$$M_t = k_1 G \theta (2a)^3 2b, \quad (2)$$

де k_1 – числовий множник, що залежить від величини відношення b/a .

Компоненти напруження шукаються за допомогою операції диференціювання:

$$\tau_{yz} = -\frac{\partial \varphi}{\partial x}, \quad \tau_{xz} = -\frac{\partial \varphi}{\partial y}. \quad (3)$$

Якщо $b = a$, то максимальне дотичне напруження, що відповідає максимальному нахилу мембрани [3], діє в середніх точках сторін квадрата. Якщо ж $b > a$, то – в середніх точках довших сторін $x = \pm a$ прямокутника.

В [3] наводиться спрощена формула для визначення τ_{max} :

$$\tau_{max} = k2G\theta a, \quad (4)$$

де k – числовий множник, що залежить від величини відношення b/a .

Маючи аналітичний вираз для $\varphi(x, y)$ знаходимо крутний момент та максимальне дотичне напруження за формулами (1) і (3) відповідно та порівнюємо отримані результати з результатами за формулами (2) та (4). Відносні похибки для τ_{max} та M_t становлять відповідно 44,444 % та 33,321 %. Зрозуміло, що такої кількості елементів недостатньо для отримання прийнятної точності, тому ми покрили поперечний переріз 16-ма білінійними елементами, в результаті чого відносні похибки для τ_{max} та M_t набули значень відповідно 28,571 % та 9,031 %. Очевидно, що точність буде покращуватись із збільшенням елементів, але це призведе до збільшення обсягу роботи та ускладнення обчислювального процесу.

Дослід 2. Спробуємо замість білінійних використати біквадратичні елементи (8 вузлів). Покриємо поперечний переріз одним 8-вузловим елементом (рис. 3). В даному випадку зручно зробити заміну

$$\varphi(x, y) = U(x, y) - \frac{1}{2}(x^2 + y^2)G\theta, \quad (5)$$

завдяки якій переходимо від рівняння Пуассона до рівняння Лапласа

$$\Delta U(x, y) = 0$$

з неоднорідною умовою Діріхле на границі

$$U(x, y)|_r = \frac{1}{2}(x^2 + y^2)G\theta.$$

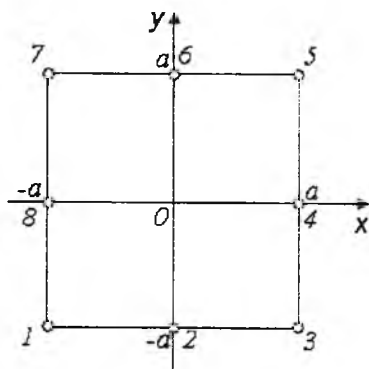


Рис. 3. Покриття поперечного перерізу одним СЕ

Функція всередині елемента визначається за формулою, що являє собою математичне сподівання:

$$U = \sum_{i=1}^{12} N_i \cdot U_i,$$

де U_i – значення функції в граничних точках, N_i – базисні функції.

Знайшовши $U(x, y)$, отримуємо $\varphi(x, y)$ за формулою (5). Відносні похибки розрахунків τ_{max} та M_t за (1) і (3) в порівнянні з результатами за (2) і (4) для стандартної [2] та альтернативних моделей [4] наведені в табл. 1. В цій же таблиці наведено порівняльний аналіз точності розрахунків при покритті поперечного перерізу 4-ма та 16-ма біквадратичними ССЕ.

Табл. 1. Відносні похибки для τ_{max} та M_t , [%]

Модель	1 ССЕ		4-и ССЕ		16 ССЕ	
	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t
$N_1^{(1)}(x, y) = \frac{1}{4}(1-x)(1-y)(-1-x-y),$ $N_2^{(1)}(x, y) = \frac{1}{2}(1-x^2)(1-y)$ (стандартна)	100	100	2,37	2,11	2,42	0,18
$N_1^{(2)}(x, y) = \frac{1}{4}(1-x)(1-y)xy,$ $N_2^{(2)}(x, y) = \frac{1}{4}(1-x^2)(1-y)^2$	25,92	20,97	2,98	18,56	3,86	3,71
$N_1^{(3)}(x, y) = \frac{1}{20}(1-x)(1-y)(1+x+y+6xy)$ $N_2^{(3)}(x, y) = \frac{1}{10}(1-x^2)(1-y)(2-3y)$ (гармонічна за критерієм Привалова)	11,11	5,17	6,06	24	0,8	5,81
$N_1^{(4)}(x, y) = \frac{1}{12}(1-x)(1-y)(1+x+y+4xy)$ $N_2^{(4)}(x, y) = \frac{1}{6}(1-x^2)(1-y)(1-2y)$ (гармонічна за критерієм Кьюбе)	1,23	5,37	13,7	27	5,35	6,93

З таблиці видно, що із збільшенням кількості елементів однією з найкращих виявилась стандартна модель. Проте альтернативних моделей є безліч і тому можна припустити, що існує така модель, що забезпечує прийнятну точність розрахунків за менших витрат. Розв'язуючи

обернену задачу з врахуванням точного значення для τ_{max} та використовуючи процедуру «зважування» моделей

$$N_i^{(k)}(\xi, \eta) = \alpha N_i^{(1)}(\xi, \eta) + (1 - \alpha) N_i^{(2)}(\xi, \eta), \quad (i = \overline{1, 8}), \quad k = 3, 4, \dots$$

було отримано аналітичну залежність відносної похибки розрахунків δ від параметру α . Графік цієї залежності зображено на рис. 4.

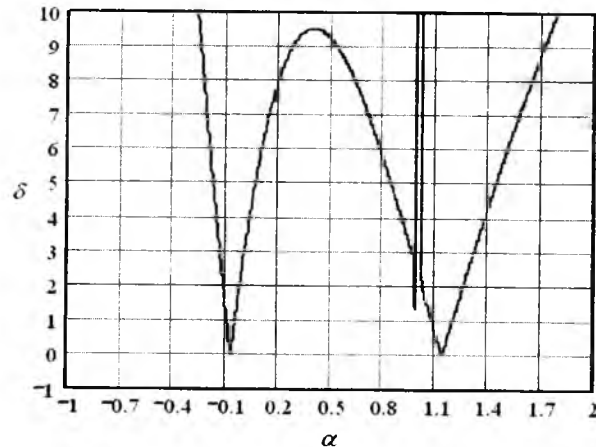


Рис. 4. Відносна похибка $\delta(\alpha)$ при зважуванні моделей

Виявилось, що існує два значення цього параметра, за яких отримані «зважені» моделі забезпечують точний результат по τ_{max} :

$$\alpha_1 = 1.138 \text{ та } \alpha_2 = -0.076.$$

Базисні функції моделі, отриманої зважуванням з коефіцієнтом α_1 :

$$N_1^{(5)}(x, y) = \frac{1}{2000} (1-x)(1-y)(-569 - 569x - 569y - 69xy);$$

$$N_2^{(5)}(x, y) = \frac{1}{2000} (1-x^2)(1-y)(1069 + 69y).$$

Базисні функції моделі, отриманої зважуванням з коефіцієнтом α_2 :

$$N_1^{(6)}(x, y) = \frac{1}{1000} (1-x)(1-y)(19 + 19x + 19y + 269xy);$$

$$N_2^{(6)}(x, y) = \frac{1}{1000} (1-x^2)(1-y)(231 - 269y).$$

Зазначимо, що отримані моделі будуть містити 9 параметрів.

Дослідження отриманих моделей показало, що модель $N_i^{(5)}(x, y)$ забезпечує кращу точність розрахунків, ніж $N_i^{(6)}(x, y)$. Так, відносні похибки для M_t при розбитті перерізу на 4 елементи становлять 1,51 % та 20,69 % відповідно (відносні похибки для τ_{max} становлять 0 %). Ця оптимізована модель була протестована на задачах про кручення призматичних стрижнів з прямокутними перерізами. Відносні похибки розрахунків для τ_{max} та M_t в порівнянні з точними [3] для різних відношень

сторін прямокутника b/a наведені в табл. 2. В цій же таблиці проведено порівняльний аналіз з відповідними результатами для стандартної і відомих альтернативних моделей.

Зауважимо, що ці результати були отримані при розбитті перерізу лише на чотири елементи.

Табл. 2. Відносні похибки для τ_{max} та M_t при прямокутному перерізі, [%]

Модель	$\frac{b}{a} = 1.0$		$\frac{b}{a} = 1.2$		$\frac{b}{a} = 1.5$		$\frac{b}{a} = 2.0$		$\frac{b}{a} = 2.5$	
	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t	τ_{max}	M_t
$N_i^{(5)}(x, y)$ (оптиміз.)	0	1.51	2.78	1.42	5.48	1.84	7.42	3.91	8.04	3.48
$N_i^{(1)}(x, y)$ (станд.)	2.37	2.11	5.46	2.03	8.58	2.47	11.14	4.59	12.37	4.25
$N_i^{(2)}(x, y)$	2.98	18.56	10.39	18.48	18.77	18.76	28.18	20.38	34.86	20.01
$N_i^{(3)}(x, y)$	6.06	24.11	2.35	23.95	12.09	23.91	23.28	24.85	31.17	24.02
$N_i^{(4)}(x, y)$	13.76	27.41	4.83	27.19	5.74	26.91	18.15	27.38	26.89	26.22

Висновки. В даній роботі нам вдалось отримати нову модель на бікватратичному елементі, що забезпечує кращу точність розрахунків за меншої кількості елементів, на які розбивається поперечний переріз. Таким чином, зменшується об'єм обчислювальної роботи. Отриману модель можна рекомендувати до використання і в інших прикладних задачах.

Література

1. Stiffness and Deflection Analysis of Complex Structures / M.J. Turner, R.W. Clough, H.C. Martin, L.J. Topp // J. Aeronaut. Sci. – 1956. – V.23. – P. 805-824.
2. Зенкевич О. Конечные элементы и аппроксимация / О. Зенкевич, К. Морган. – М.: Мир, 1986. – 328 с.
3. Тимошенко С. П. Теория упругости / С. П. Тимошенко, Дж. Гудьер. – М.: Наука, 1979. – 2-е изд. – 560 с.
4. Камаева С.О. Дослідження властивостей серендипових моделей / С.О. Камаева // Актуальные достижения европейской науки – 2009: V Междунар. науч.-практ. конф., Дніпропетровськ, 17-25 черв. 2009 р.: тез. докл. – Чехія; Дніпропетровськ, 2009. – Т. 11. – С. 55-58.

Стаття поступила в редакційну колегію 09.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Хомченком А.Н.

REALIZATION OF FINITE ELEMENT METHOD USING ALTERNATIVE MODELS

S. O. Kamaieva, M. G. Fedoryshyn

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankiv'sk, Carpats'ka street, 15;
ph. +380 (3422) 4 21 27; e-mail: Svitlana.Kamaeva@gmail.com*

This work is devoted to the solving task about torsion of prism rod with the rectangular section. The opportunity to apply the finite element method using not only standard models, but also alternative, built by the geometric modeling, is examined. The accuracy of estimation depending on the order and quantity of elements, that cover the transverse section is analyzed. The inverse task with the aim to obtain optimized models is being solved.

Key words: *stress function, moment of torsion, maximum tangent stress, model, serendipity element.*

Фізика і хімія твердого тіла

УДК 530.1

МОДЕЛЬ КВАНТОВОЇ МЕХАНІКИ З ВИПАДКОВИМ ЧИСЛОМ КВАНТІВ ДІЇ

М. А. Рувінський

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;
e-mail: bruvinsky@gmail.com*

На основі уявлення про існування фундаментального кванта дії $\hbar/2$ і наявності у частинки (або системи частинок) стохастичного числа квантів дії з неоднорідним розподілом Пуассона, після усереднення і введення постулату про пропорційність імовірності нульового значення числа квантів дії густині імовірності положення частинки, можна прийти до рівняння Шредінгера і співвідношення невизначеності Гейзенберга. З нової точки зору розглянуто принцип тотожності однакових мікрочастинок і сформульовано варіаційний принцип квантової механіки.

Ключові слова: *фундаментальний квант дії $\hbar/2$, стохастичне поле, неоднорідний розподіл Пуассона, рівняння Шредінгера, співвідношення невизначеності, принцип тотожності, варіаційний принцип.*

Вступ

Історичний нарис проблеми

У межах сучасної квантової фізики постійно робляться спроби повному осмислити глибоку відмінність між фізичним і філософським змістом класичної і квантової теорії [1-19]. Якщо зосередитись лише на інтерпретації хвильової функції Ψ , то можна вважати, що імовірнісну інтерпретацію нерелятивістської квантової механіки, вперше запропоновану Борном, підтверджено експериментом з достатньою точністю, і вона практично не викликає сумнівів. З цього приводу слід звернути увагу на рекомендацію Фейнмана [16]: “Існує декілька проблем, пов’язаних з інтерпретацією, над якими можна було б ще попрацювати... . Одна з них – це довести, що імовірнісна інтерпретація Ψ -функції є єдиною послідовною інтерпретацією цієї величини... . Було б цікаво показати, що не можна запропонувати жодного іншого послідовного тлумачення цієї величини...”. Остаточно це можна буде з’ясувати лише

з подальшим виходом за межі сучасної квантової теорії, якого на даний час ще не існує. На наш погляд, залишаючись у межах квантової теорії, слід пов'язати існуючу інтерпретацію з універсальною фундаментальною сталою Планка, яка визначає квантову теорію (подібно до того, як теорію відносності, релятивістську механіку і електродинаміку визначає інша універсальна стала – c (швидкість світла у вакуумі), з якою пов'язана нова інтерпретація властивостей простору і часу, відмінна від ньютонівської).

Поширеною є думка про те, що класична теорія ймовірностей не може пояснити “інтерференцію ймовірностей” в квантовій механіці, яку яскраво ілюструють на прикладі ідеалізованого досліду з дифракції електронів на двох щілинах. В [13], наприклад, підкреслено, що квантово-механічне означення густини ймовірності відрізняється від статистичного; в [14] визначено новий, квантовомеханічний, закон додавання ймовірностей, який містить, на відміну від класичного закону, інтерференційний доданок. Тому викликає подив, що центральне математичне поняття теорії ймовірностей виявляється непридатним для опису інтерферуючих альтернативних подій [16]. В роботі [19] автора показано, що при адекватному визначенні квантових подій інтерференція ймовірностей не суперечить класичній теоремі додавання ймовірностей.

Існують дві різні точки зору відносно того, чи описує хвильова функція стан квантового ансамблю мікрочастинок чи стан окремої мікрочастинки у відповідних макроскопічних умовах досліду. Перша точка зору була запропонована Мандельштамом [5] і розвинута Блохінцевим [6] і Нікольським [7]. Концепція квантових ансамблів [5-7] є дуже близькою до концепції класичного ансамблю Гіббса, добре відомого із статистичної термодинаміки. На відміну від класичного ансамблю, стан квантового ансамблю не визначається якоюсь імовірністю, а лише амплітудою імовірності, тобто хвильовою функцією для чистого ансамблю, а в більш загальних умовах – матрицею густини для змішаного ансамблю. Більшість фізиків [4, 8-19] підтримує другу точку зору, пов'язану з так званою “копенгагенською інтерпретацією”, згідно з якою хвильова функція характеризує стан окремої мікрочастинки у заданих умовах. Остання концепція була розвинута, насамперед, в роботах Бора, Борна, Гейзенберга, Паулі, Фока та інших. Слід зауважити, що обидві концепції дають однакові практичні результати. Друга концепція здається більш природною, оскільки з самого початку не потребує для пояснення руху однієї мікрочастинки введення уявного ансамблю невзаємодіючих копій частинки.

Найбільш складною і досі нез'ясованою є відповідь на принципове питання: яка природа імовірнісної інтерпретації квантової механіки? В роботах Л. де Бройля [17] і Д. Бома була здійснена спроба повернутись до детермінізму класичної механіки в теорію із “схованими змінними” (невідомими дійсними положеннями частинок), для яких вводились відповідні імовірності. У найбільш розвинутій каузальній механіці Бома стан системи описується хвильовою функцією Ψ разом з дійсними по-

ложеннями частинок. Тому ця теорія визначається двома рівняннями еволюції: рівнянням Шредінгера для Ψ і рівнянням еволюції першого порядку (для схованих конфігураційних змінних). Статистичний опис в механіці Бома пов'язаний з невідомою дійсною конфігурацією частинок, як це прийнято в класичній статистичній механіці.

В подібних теоріях із схованими змінними повинні виконуватись нерівності Белла [4, 14]. Проте поставлені критичні експерименти не підтвердили виконання цих нерівностей для мікрочастинок, що свідчить на користь квантової механіки і відхиляє назавжди цілий клас локальних теорій із схованими змінними [4].

В роботі [20] густину імовірності було введено для опису статистичної поведінки уявного ансамблю [5, 6] нерелятивістських невзаємодіючих частинок, кожна з яких рухається за рівнянням Гамільтона-Якобі. Якщо для густини імовірності у згаданому ансамблі формально і невідомо чому виконується аналог закону Фур'є для теплопровідності з коефіцієнтом пропорційності $\hbar/2m$, де $\hbar = h/2\pi$, h – стала Планка, m – маса частинки, то можна прийти до рівняння Шредінгера.

В роботі [21] подано короткий огляд теорії зв'язку різних стохастичних процесів з квантовою механікою, причому основна увага приділяється стохастичним диференціальним рівнянням дифузійного типу з коефіцієнтом дифузії \hbar/m , коли можна отримати рівняння Шредінгера (Нельсон, 1966 р.) та рівняння Паулі при узагальненні рівняння на двокомпонентні спінори.

Робота [22] враховує давно відому формальну аналогію між рівнянням Шредінгера і рівнянням дифузії. Показано, що квантова динаміка може розглядатись як випадковий процес у фазовому просторі, але цей процес описується “псевдоімовірностями”, тобто ймовірностями як додатного, так і від'ємного знаку. При цьому еволюція функції сумісного розподілу за координатою та імпульсом збігається з динамікою функції Вігнера квантової системи.

В додатку до книги [23] Гейлікмана сформульовані класичні моделі квантовомеханічних систем, для яких функція Лагранжа залежить не тільки від координат і швидкості, але і від прискорення. Після усереднення класичної динаміки за швидкозмінним рухом і формального введення як просторового масштабу довжини хвилі де Бройля можна отримати рівняння Шредінгера.

Все більшого поширення набуває фейнманівське формулювання [16] квантової механіки, яке ґрунтується на постулаті Дірака про квазі-класичний зв'язок [14] пропагатора з функцією дії S частинки і введенні поняття безмежнократних функціональних інтегралів за траєкторіями. Слід мати на увазі [6, 13], що ці “траєкторії”, строго кажучи, не можна вважати траєкторіями руху частинки в класичному розумінні, оскільки вони можуть не мати неперервних дотичних (похідних) в жодній точці. У зв'язку з підходом Фейнмана в [25] влучно зауважено, що “... дія S , якою прекрасно б вона не була, відіграла лише дуже незначну роль в класичній механіці, оскільки там потрібно було лише знати положення

її екстремумів. У квантовій же механіці дія використовується у всіх точках. Звертаючись до минулого, як не замислитись над тим, чи задавали собі фізики минулого століття питання, чому так мало береться від поняття дії”.

В основу подальшого розгляду ми покладемо факт існування фундаментального кванта дії, що вже явно використовувалось ще на зорі розвитку старої квантової теорії Зоммерфельдом (з напівкласичних позицій [1]) і у дослідженнях Румера [24] з 5-вимірної теорії поля (де квантування було проявом гіпотетичної періодичної залежності фізичних величин від п'ятої координати – дії). Деякі попередні ідеї і результати на ранній і початковій стадії нашого розгляду викладено в [26-29].

В даній роботі при формулюванні нерелятивістської квантової механіки використовується метод Ланжевена [30, 31], при якому досліджуються певні стохастичні диференціальні рівняння для функцій дії.

1. Кванти дії, неоднорідний розподіл Пуассона і хвильове рівняння Шредингера

Фундаментальним квантом дії вважаємо [26] величину $\hbar/2$, що збігається також з висновком нещодавньої роботи Суханова [32] з квантового узагальнення рівноважної статистичної термодинаміки. У відповідності з методом Ланжевена [30, 31] функцію дії S мікрочастинки представляємо у вигляді суми двох функцій:

$$S = S_C + S', \quad (1)$$

де $S'(\vec{r}, t)$ – стохастична дія, а $S_C(\vec{r}, t)$ – дія, що має звичайний класичний аналог при $\hbar \rightarrow 0$. Зауважимо, що у фейнманівському формулюванні квантової механіки [16, 13] виділення доданку функціонала дії за класичною траєкторією розглядається як зручний методичний прийом для обчислення функціональних інтегралів. Стохастичну дію $S'(\vec{r}, t)$, в якій виявляється існування скінченного кванта дії $\hbar/2$, визначимо так:

$$S'(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar}{2} N(\vec{r}, t), \quad (2)$$

де $N(\vec{r}, t)$ приймає випадкові цілочисельні і невід'ємні значення, що дорівнюють числу квантів стохастичної дії мікрочастинки під час її руху у зовнішньому полі $V(\vec{r}, t)$. Згідно (1), швидкість частинки з масою m дорівнює

$$\frac{\nabla S}{m} = \frac{\nabla S_C}{m} + \frac{\nabla S'}{m}. \quad (3)$$

Нехай джерелом поля швидкостей $\nabla S_C/m$ і $\nabla S'/m$ частинки є частота зміни у неї числа квантів дії N :

$$\text{div} \frac{\nabla S_C}{m} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_C, \quad (4)$$

$$\text{div} \frac{\nabla S'}{m} = \frac{\delta N}{\delta t}, \quad (5)$$

$$\text{де} \quad \left(\frac{dN}{dt} \right)_C \equiv \frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial N}{\partial \vec{r}} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)_C, \quad \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right)_C \equiv \frac{\nabla S_C}{m}; \quad (6)$$

$$\frac{\delta N}{\delta t} \equiv \left(\frac{dS_C}{dt} - L \right) / (\hbar/2), \quad (7)$$

$$\frac{dS_C}{dt} \equiv \frac{\partial S_C}{\partial t} + \frac{\partial S_C}{\partial \vec{r}} \cdot \frac{d\vec{r}}{dt}, \quad \frac{d\vec{r}}{dt} \equiv \frac{\nabla S}{m}; \quad (8)$$

$$L = \frac{(\nabla S)^2}{2m} - V \quad (9)$$

– функція Лагранжа.

З рівнянь (4) і (5) випливає, що вихід частинки з даної точки простору (або її прибуття) пов'язано із зростанням (або зменшенням) у неї числа квантів дії, і рух мікрочастинки значною мірою обумовлений стохастичною дією S' . Диференційованість випадкових функцій в (3)-(9) має певний математичний зміст з точки зору імовірнісної збіжності [31]. Якщо ж похідної в імовірнісному понятті не існує, то відповідні “диференціальні рівняння” мають лише деякий символічний зміст. Тоді в ланжевенівському підході цікавляться змістом кінцевого розв'язку або розв'язком усереднених рівнянь (подібно до того, як визначають функціональний інтеграл за відсутності похідних до фейнманівських “траєкторій” в кожній точці).

Після підстановки (1)-(3), (6)-(9) в (5) і (4) і усереднення за випадковим числом квантів дії N , враховуючи просторово-часову неоднорідність у зовнішньому полі $V(\vec{r}, t)$, отримаємо систему рівнянь для усереднених функцій дії $\bar{S}_C(\vec{r}, t)$ і $\bar{S}'(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar}{2} \bar{N}(\vec{r}, t)$:

$$\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t} + \frac{(\nabla \bar{S}_C)^2}{2m} - \frac{\hbar}{2} \text{div} \frac{\nabla \bar{S}'}{m} - \frac{(\nabla \bar{S}')^2}{2m} + V + \frac{(\nabla \sigma_C)^2}{2m} - \frac{(\nabla \sigma')^2}{2m} = 0, \quad (10)$$

$$\frac{\partial \bar{S}'}{\partial t} + \frac{1}{m} \nabla \bar{S}_C \nabla \bar{S}' + \frac{\hbar}{2} \text{div} \frac{\nabla \bar{S}_C}{m} + \frac{1}{m} \nabla \sigma_C \nabla \sigma' = 0, \quad (11)$$

$$\text{де} \quad \sigma_C = S_C - \bar{S}_C, \quad \sigma' = S' - \bar{S}', \quad (12)$$

($\bar{V} = V$). Дисперсія “класичної” швидкості $\nabla S_C/m$ повністю обумовлена дисперсією стохастичної швидкості $\nabla S'/m$, а їх випадкові значення статистично незалежні (за означенням (1)), тобто

$$\overline{(\nabla \sigma_C)^2} = \overline{(\nabla \sigma')^2}, \quad (13)$$

$$\overline{\nabla \sigma_C \nabla \sigma'} = 0. \quad (13')$$

Тоді з (10) і (11) маємо замкнену систему рівнянь:

$$\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t} + \frac{(\nabla \bar{S}_C)^2}{2m} - \frac{\hbar}{2} \text{div} \frac{\nabla \bar{S}'}{m} - \frac{(\nabla \bar{S}')^2}{2m} + V = 0, \quad (14)$$

$$\frac{\partial \bar{S}'}{\partial t} + \frac{1}{m} \nabla \bar{S}_C \nabla \bar{S}' + \frac{\hbar}{2} \text{div} \frac{\nabla \bar{S}_C}{m} = 0. \quad (15)$$

З розглянутої точки зору поняття просторової локалізації частинки в даний момент часу повинно бути пов'язано з випадковою подією наявності у частинки нульового числа квантів дії $N = 0$. При $N \geq 1$ в даній точці простору виникає делокалізованість і виявляється невизначеність місцеположення частинки, що можна тлумачити, як появу “віртуального стану” частинки. Отже, вводимо постулат: густина імовірності $w(\vec{r}, t)$ знаходження частинки у просторово-часовій точці (\vec{r}, t) пропорційна імовірності $P_0(\vec{r}, t)$ нульового значення числа квантів дії у частинки в даній точці, тобто

$$w(\vec{r}, t) = CP_0(\vec{r}, t), \quad (16)$$

де C – константа, яка визначається з умови нормування $w(\vec{r}, t)$.

Якщо для випадкового числа N квантів дії частинки існують неоднорідний розподіл Пуассона [31] (під час руху частинки у зовнішньому полі $V(\vec{r}, t)$), то імовірність

$$P_N(\vec{r}, t) = \frac{(\bar{N})^N}{N!} e^{-\bar{N}}. \quad (17)$$

При $N = 0$

$$P_0(\vec{r}, t) = e^{-\bar{N}(\vec{r}, t)}. \quad (18)$$

При $N = 1$

$$P_1(\vec{r}, t) = -P_0(\vec{r}, t) \ln(P_0(\vec{r}, t)) = -[w(\vec{r}, t)/C] \ln[w(\vec{r}, t)/C]. \quad (19)$$

Згідно з (17) і (16)

$$P_N(\vec{r}, t) = \frac{(-1)^N}{N!} [w(\vec{r}, t)/C] \{\ln[w(\vec{r}, t)/C]\}^N. \quad (20)$$

Бачимо, що функція $P_1(\vec{r}, t)$ (19) є “першим моментом” міри невизначеності місцеположення частинки в даній просторово-часовій точці (\vec{r}, t) (певний аналог поняття густини ентропії в статистичній фізиці [33]).

З (2), (18) і (16) матимемо

$$\bar{S}' = \frac{\hbar}{2} \ln[w(\vec{r}, t)/C]. \quad (21)$$

Після підстановки (21) в (14) і (15) одержимо:

$$\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t} + \frac{(\nabla \bar{S}_C)^2}{2m} + V - \frac{\hbar^2 \nabla^2 \sqrt{w}}{2m \sqrt{w}} = 0, \quad (22)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \text{div} w \frac{\nabla \bar{S}_C}{m} = 0. \quad (23)$$

Рівняння (22) і (23), як відомо [15], еквівалентні нерелятивістському рівнянню Шредінгера для хвильової функції частинки

$$\Psi = \sqrt{w} \exp(i\bar{S}_C / \hbar), \quad (24)$$

а рівняння (23) є звичайним квантовомеханічним рівнянням неперервності. В рівнянні (22) останній член

$$V_{\text{кв}}(\vec{r}, t) = -\frac{\hbar^2 \nabla^2 \sqrt{w}}{2m \sqrt{w}} \quad (25)$$

часто формально трактують [1] як “квантовий потенціал” в узагальненому рівнянні Гамільтона-Якобі (на відміну від класичного потенціалу V). Зауважимо, що основне рівняння нерелятивістської квантової механіки виявилось пов'язаним з неоднорідним розподілом Пуассона для квантів дії мікрочастинки.

Розглянуті міркування легко узагальнюються на випадок системи частинок. Замість (2)-(6), (8), (9) тепер будемо мати (формули (1), (7) зберігають свій вигляд):

$$S'(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t) = -\frac{\hbar}{2} N(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t), \quad (26)$$

$$\frac{\nabla_i S}{m_i} = \frac{\nabla_i S_C}{m_i} + \frac{\nabla_i S'}{m_i}, \quad (27)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{div}_i \frac{\nabla_i S_C}{m_i} = \left(\frac{dN}{dt} \right)_C, \quad (28)$$

$$\sum_{i=1}^n \text{div}_i \frac{\nabla_i S'}{m_i} = \frac{\delta N}{\delta t}, \quad (29)$$

$$\left(\frac{dN}{dt} \right)_C \equiv \frac{\partial N}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial N}{\partial \vec{r}_i} \left(\frac{d\vec{r}_i}{dt} \right)_C, \quad \left(\frac{d\vec{r}_i}{dt} \right)_C \equiv \frac{\nabla_i S_C}{m_i}; \quad (30)$$

$$\frac{dS_C}{dt} \equiv \frac{\partial S_C}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{\partial S_C}{\partial \vec{r}_i} \frac{d\vec{r}_i}{dt}, \quad \frac{d\vec{r}_i}{dt} \equiv \frac{\nabla_i S}{m_i}; \quad (31)$$

$$L = \sum_{i=1}^n \frac{(\nabla_i S)^2}{2m_i} - V(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t), \quad (32)$$

де S , S_C , S' , N , L і V – вже відносяться до системи n частинок. Крім зовнішнього поля, $V(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)$ містить також і міжчастинкову взаємодію; $N(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)$ є випадковим числом квантів стохастичної дії $S'(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)$ (26) всієї системи; m_i – маса i -ої частинки. Певна дійсна конфігурація системи частинок пов'язана лише з випадковим значенням $N = 0$ (при $N \geq 1$ маємо “віртуальні конфігурації”). Подібно до одночастинкового випадку після відповідного усереднення (28), (29) за умов

$$\sum_{i=1}^n \frac{(\nabla_i \sigma_C)^2}{2m_i} = \sum_{i=1}^n \frac{(\nabla_i \sigma')^2}{2m_i}, \quad (33)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{1}{m_i} \nabla_i \sigma_C \nabla_i \sigma' = 0 \quad (34)$$

(σ_C і σ' визначаються формулами (12)), узагальнення постулату (16) для всієї системи і підстановки

$$\bar{S}'(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t) = \frac{\hbar}{2} \ln[w(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)/A] \quad (35)$$

отримаємо рівняння

$$\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \frac{(\nabla_i \bar{S}_C)^2}{2m_i} + V - \sum_{i=1}^n \frac{\hbar^2}{2m_i} \frac{\nabla_i^2 \sqrt{w}}{\sqrt{w}} = 0, \quad (36)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \sum_{i=1}^n \operatorname{div}_i w \frac{\nabla_i \bar{S}_C}{m_i} = 0, \quad (37)$$

де $w(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)$ – густина імовірності певної конфігурації системи (A – стала нормування w). З рівняння (36) випливає рівняння Шредінгера для хвильової функції системи частинок

$$\Psi(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t) = [w(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)]^{1/2} \exp\left[\frac{i}{\hbar} \bar{S}_C(\vec{r}_1, \vec{r}_2, \dots, \vec{r}_n, t)\right], \quad (38)$$

а (37) є узагальненням рівняння неперервності на випадок системи частинок [6, 12]. Отже, рівняння Шредінгера системи частинок пов'язано з пуассонівським характером стохастичної дії S' всієї системи. У розглянутій трактовці не виникають труднощі, властиві стандартним моделям квантових систем в абстрактному конфігураційному просторі.

2. Співвідношення невизначеності

Виявляється, що з рівності (13) дисперсій двох швидкостей частинки впливає співвідношення невизначеності Гейзенберга для координати та імпульсу. Оскільки густина імовірності знаходження частинки у просторово-часовій точці (\vec{r}, t) визначається згідно (16), (18) середнім числом $\bar{N}(\vec{r}, t)$ квантів дії мікрочастинки у цій точці

$$w(\vec{r}, t) = C e^{-\bar{N}(\vec{r}, t)}, \quad (39)$$

то ліва і права частини в (13) залежать від випадкових місцеположень частинки. Проведемо усереднення (13) за просторовим розподілом (39) у довільний фіксований момент часу t , яке позначимо кутовими дужками $\langle \dots \rangle$:

$$\langle (\nabla \sigma_C)^2 \rangle = \langle (\nabla \sigma')^2 \rangle. \quad (40)$$

Для одновимірного руху вздовж осі x , враховуючи (12), (2) і (39) в (40), отримаємо

$$\langle (\Delta p_x)^2 \rangle = \frac{\hbar^2}{2} \left\langle \left(\frac{d\Delta N}{dx} \right)^2 \right\rangle, \quad (41)$$

де $\langle (\Delta p_x)^2 \rangle$ – дисперсія складової імпульсу p_x , $\Delta N \equiv N - \bar{N}$. Визначимо середнє квадратичне відхилення координати $\sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle}$ за лінійною дисперсією [6, 13] числа квантів дії $\sqrt{2 \langle (\Delta N)^2 \rangle}$, тобто

$$\sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle} = \frac{\sqrt{2 \langle (\Delta N)^2 \rangle}}{\sqrt{\left\langle \left(\frac{d\Delta N}{dx} \right)^2 \right\rangle}}. \quad (42)$$

Тоді, як легко бачити з (41) і (42), добуток невизначеностей імпульсу і координати дорівнює

$$\sqrt{\langle (\Delta p_x)^2 \rangle} \cdot \sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{2 \langle (\Delta N)^2 \rangle}. \quad (43)$$

Згідно з розподілом Пуассона [30,31]

$$\langle (\Delta N)^2 \rangle = \bar{N}, \quad (44)$$

$$\sqrt{\langle (\Delta p_x)^2 \rangle} \cdot \sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{2 \langle \bar{N} \rangle}, \quad (45)$$

де

$$\langle \bar{N} \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{N}(x, t) w(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\bar{N}(x, t)} dx} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} \bar{N}(x, t) e^{-\bar{N}(x, t)} dx}{\int_{-\infty}^{\infty} e^{-\bar{N}(x, t)} dx}. \quad (46)$$

Оцінку (46) проведено, виходячи з того, що найбільш імовірне положення частинки відповідає мінімальному середньому числу квантів дії $\bar{N}(x_0, t)$ у частинки в даній точці:

$$\bar{N}(x, t) \approx \bar{N}(x_0, t) + \frac{(x-x_0)^2}{2} \frac{d^2 \bar{N}(x, t)}{dx^2} \Big|_{x=x_0}, \quad (47)$$

$$\bar{N}(x_0, t) \geq 0, \quad \frac{d^2 \bar{N}(x, t)}{dx^2} \Big|_{x=x_0} > 0 \quad (48)$$

і домінуючий внесок в (46) пов'язаний з околотою точки x_0 . Тоді

$$\langle \bar{N}(x, t) \rangle = \bar{N}(x_0, t) + \frac{1}{2} \geq \frac{1}{2}. \quad (49)$$

З (45) і (49) маємо відоме співвідношення невизначеності Гейзенберга

$$\sqrt{\langle (\Delta p_x)^2 \rangle} \cdot \sqrt{\langle (\Delta x)^2 \rangle} \geq \frac{\hbar}{2}. \quad (50)$$

яке свідчить про відсутність поняття траєкторії мікрочастинки. В розглянутому підході до квантової механіки рівняння Шредінгера і співвідношення невизначеності Гейзенберга "генетично" пов'язані.

3. Принцип тотожності однакових частинок

У системі багатьох частинок густина імовірності певної конфігурації системи визначається середнім числом квантів стохастичної дії

$\bar{N}(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n, t)$ всієї системи (див. (26), (35)):

$$w(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n, t) = A \exp[-\bar{N}(\bar{r}_1, \bar{r}_2, \dots, \bar{r}_n, t)]. \quad (51)$$

Хвильова функція системи частинок визначається формулою (38). Принцип тотожності однакових частинок набуває тепер такого змісту:

Середнє число квантів стохастичної дії $\bar{N}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ системи однакових частинок не залежить від перестановки частинок, де x_i – сукупність просторових і спінових змінних i -ої частинки.

Оскільки $\bar{N}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ визначає густину імовірності $w(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ певної конфігурації системи однакових частинок, то з переставної інваріантності $\bar{N}(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$ випливає переставна інваріантність $w(x_1, x_2, \dots, x_n, t)$. На останньому ґрунтується доведення Жирардо (M. D. Girardeau, Phys. Rev. B 139, 500 (1965); J. Math. Phys. 10, 1302 (1969)) принципу симетрії для хвильових функцій системи тотожних частинок з висновком про одномірність незвідних представлень групи перестановок [34, 35]. Звідси, як відомо [12-14], і випливає можливість реалізації в природі лише станів з симетричними і антисиметричними хвильовими функціями. Що стосується загального припущення про одномірність незвідних представлень групи перестановок, то в роботі [35] було показано, що опис стану однакових частинок багатомірними незвідними представленнями суперечить поняттю тотожності частинок.

Отже, уявлення про фундаментальні кванти дії узгоджуються з принципом тотожності однакових частинок.

4. Варіаційний принцип

Рівняння (14) і (15) для \bar{S}_C і \bar{S}' , які разом з постулатом про зв'язок густини імовірності $w(\bar{r}, t)$ з неоднорідним розподілом Пуассона $P_0(\bar{r}, t)$ (згідно (16), (18), (21), (24)) приводять до рівняння Шредінгера, можна встановити також на основі варіаційного принципу, пов'язаного із функціоналом, що являє собою середнє від різниці частот зміни числа $\bar{N} = -2\bar{S}'/\hbar$ квантів дії мікрочастинки:

$$I = \left\langle \frac{d\bar{N}}{dt} - \left(\frac{d\bar{N}}{dt} \right)_C - \frac{\delta\bar{N}}{\delta t} \right\rangle = C \int \left[\frac{d\bar{N}}{dt} - \left(\frac{d\bar{N}}{dt} \right)_C - \frac{\delta\bar{N}}{\delta t} \right] e^{-\bar{N}} d\bar{r}, \quad (52)$$

де $\left(\frac{d\bar{N}}{dt} \right)_C$ визначається формулою (6) при заміні $N \rightarrow \bar{N}$, $S_C \rightarrow \bar{S}_C$;

$\frac{\delta\bar{N}}{\delta t}$ – формулами (7)-(9), (1) при $N \rightarrow \bar{N}$, $S_C \rightarrow \bar{S}_C$, $S \rightarrow \bar{S}$; $\frac{d\bar{N}}{dt}$ – фо-

рмулою типу (8), де $S_C \rightarrow \bar{N}$, $S \rightarrow \bar{S}$. Тоді функціонал

$$I = \frac{2C}{\hbar} \int F \left(\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t}, \nabla \bar{S}_C, \bar{S}', \nabla \bar{S}' \right) d\bar{r}, \quad (53)$$

$$F \left(\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t}, \nabla \bar{S}_C, \bar{S}', \nabla \bar{S}' \right) = - \left[\frac{\partial \bar{S}_C}{\partial t} + \frac{(\nabla \bar{S}_C)^2}{2m} + \frac{(\nabla \bar{S}')^2}{2m} + V \right] e^{2\bar{S}'/\hbar}. \quad (54)$$

Рівняння Ейлера-Лагранжа [36] мають вигляд:

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{S}_C} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial (\partial \bar{S}_C / \partial t)} - \nabla \frac{\partial F}{\partial (\nabla \bar{S}_C)} = 0, \quad (55)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{S}'} - \frac{\partial}{\partial t} \frac{\partial F}{\partial (\partial \bar{S}' / \partial t)} - \nabla \frac{\partial F}{\partial (\nabla \bar{S}')} = 0. \quad (56)$$

Використовуючи (54)-(56), отримаємо, що рівняння (55) збігається з рівнянням (15), а рівняння (56) – з рівнянням (14). Таким чином, рівняння Шредінгера можна отримати з варіаційного принципу, який накладає певні обмеження на частотні зміни кількості квантів дії мікрочастинки.

Висновки

У межах ланжевнівського підходу до нерелятивістської квантової механіки вказано на можливий зв'язок хвильового рівняння Шредінгера, співвідношень невизначеності Гейзенберга і принципу тотожності із стохастичним полем, пов'язаним з існуванням у мікросвіті фундаментальних квантів дії $\hbar/2$ з неоднорідним розподілом Пуассона. Сформульовано квантовий постулат про густину імовірності положення частинок і подано іншу версію варіаційного принципу квантової механіки.

Література

1. Джеммер М. Еволюція понять квантової механіки / М. Джеммер. – М.: Наука, 1985. – 380 с.
2. Кадомцев Б.Б. Динамика и информация / Б.Б. Кадомцев. – М.: УФН, 1999. – 400 с.
3. Поппер К.Р. Квантовая теория и раскол в физике / К.Р. Поппер. – М.: Логос, 1998. – 192 с.
4. Боум А. Квантовая механика: основы и приложения / А. Боум. – М.: Мир, 1990. – 720 с.
5. Мандельштам Л.И. Лекции по оптике, теории относительности и квантовой механике / Л.И. Мандельштам. – М.: Наука, 1972. – 438 с.
6. Блохинцев Д.И. Основы квантовой механики / Д.И. Блохинцев. – М.: Наука, 1976. – 664 с.
7. Никольский К.В. Квантовые процессы / К.В. Никольский. – М.-Л.: ГИТТЛ, 1940. – 348 с.
8. Бом Д. Квантовая теория / Д. Бом. – М.: Наука, 1965. – 727 с.
9. Фок В.А. Начала квантовой механики / В.А. Фок. – М.: Наука, 1976. – 376 с.
10. Ландау Л.Д. Квантовая механика. Нерелятивистская теория / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1974. – 752 с.
11. Давыдов А.С. Квантовая механика / А.С. Давыдов. – М.: Наука, 1973. – 703 с.
12. Глауберман А.Ю. Квантова механіка / А.Ю. Глауберман. – Львів:

- ЛДУ, 1962. – 506 с.
13. Юхновський І.Р. Основи квантової механіки / І.Р. Юхновський. – К.: Либідь, 2002. – 390 с.
14. Вакарчук І.О. Квантова механіка / І.О. Вакарчук. – Львів: ЛНУ, 2004. – 784 с.
15. Мессиа А. Квантовая механика / А. Мессиа. – М.: Наука, 1978. – Т.1. – 480 с.
16. Фейнман Р. Квантовая механика и интегралы по траекториям / Р. Фейнман, А. Хибс. – М.: Мир, 1968. – 382 с.
17. Бройль де Л. Соотношение неопределенностей Гейзенберга и вероятностная интерпретация волновой механики. (С критическими замечаниями автора) / Л. де Бройль. – М.: Мир, 1986. – 344 с.
18. Курс загальної фізики. Квантова фізика атомів, молекул і конденсованих середовищ / М.А. Рувінський, Б.К. Остафійчук, М.О. Галуццак, Д.М. Фреїк, М.М. Яцура. – К. – Ів.-Франківськ: Плай, 1998. – 520 с.
19. Рувінський М.А. Про правило додавання ймовірностей у квантовій механіці / М.А. Рувінський // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – Т.6. – №4. – С. 708-711.
20. Ioannidou H. A new derivation of the Schrödinger equation / H. Ioannidou // Lett. Nuovo cim. – 1982. – V.34, №15. – P. 453-458.
21. Jona-Lasinio G. Stochastic processes and quantum mechanics / G. Jona-Lasinio // Asterisque. – 1985. – №10. – P. 203-216.
22. Рубин П.Л. Квантовая динамика как случайный процесс в фазовом пространстве / П.Л. Рубин // ТМФ. – 1997. – Т.110. – №3. – С. 454-458.
23. Гейликман Б.Т. Исследования по физике низких температур / Б.Т. Гейликман. – М.: АИ, 1979. – 216 с.
24. Румер Ю.Б. Исследования по 5-оптике / Ю.Б. Румер. – М.: ГИТТЛ, 1956. – 152 с.
25. Рамон П. Теория поля. Современный вводный курс / П. Рамон. – М.: Мир, 1984. – 336 с.
26. Рувинский М.А. Нерелятивистское уравнение Шредингера и двухкоростная пуассоновская стохастическая механика / М.А. Рувинский // Изв. вузов. Физика. – 1986. – №1. – С. 125; Деп. в ВИНТИ 25.07.85, №5429-85.
27. Рувінський М.А. Кванти дії, розподіл Пуассона і нерелятивістська квантова механіка / М.А. Рувінський // Фізика і хімія твердих тіл. – 1994. – №2. – С. 120-128.
28. Рувінський М.А. Співвідношення невизначеності і принцип тотожності у новому формулюванні квантової механіки / М.А. Рувінський // Вісник Прикарпатського університету. Природничо-математичні науки. – 1995. – В.1. – С.58-63.
29. Рувінський М.А. Про кванти дії, спин електрона, рівняння Паулі і Клейна-Гордона / М.А. Рувінський // Вісник Прикарпатського університету. Природничо-математичні науки. – 1996. – В.2. – С. 91-101.
30. Киттель Ч. Элементарная статистическая физика / Ч. Киттель. – М.: ИЛ, 1960. – 279 с.

31. Рытов С.М. Введение в статистическую радиофизику. Ч.1. Случайные процессы / С.М. Рытов. – М.: Наука, 1976. – 495 с.
32. Суханов А.Д. К квантовому обобщению равновесной статистической термодинамики. Эффективные макропараметры / А.Д. Суханов // ТМФ. – 2008. – Т.154. – №1. – С. 183-196.
33. Климонтович Ю.Л. Статистическая физика / Ю.Л. Климонтович. – М.: Наука, 1982. – 608 с.
34. Каплан И.Г. Принцип запрета и неразличимость тождественных частиц в квантовой механике / И.Г. Каплан // УФН. – 1975. – Т.117. – №4. – С. 691-704.
35. Каплан И.Г. Постулат симметрии и его обоснование в рамках квантовой механики / И.Г. Каплан // Теоретико-групповые методы в физике. Т.1. Труды международного семинара. – М.: Наука, 1980. – С. 175-181.
36. Мэтьюз Дж. Математические методы физики / Дж. Мэтьюз, Р. Уокер. – М.: АИ, 1972. – 400 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 12.10.2009 р.
Рекомендовано до друку д.х.н., професором Фреїком Д.М.*

THE MODEL OF QUANTUM MECHANICS WITH RANDOM NUMBER OF ACTION QUANTA

M. A. Ruvinskii

*PreCarpathian National University by V. Stéfanic;
76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57;
e-mail: bruvinsky@gmail.com.*

On the basis of idea about existence of the fundamental quantum of action $\hbar/2$ and availability of the stochastic number of action quanta of particle (or system of particles) with the non-uniform Poisson distribution, after the averaging and introduction of the postulate about proportionality of the probability of the zero value of the number of action quanta to the probability density of particle's position, it may come to the Schrodinger equation and the uncertainty Heisenberg's relation. The identity principle of the same microparticles is considered and the variational principle of quantum mechanics is formulated from the new point of view.

Key words: fundamental quantum of action $\hbar/2$, stochastic field, non-uniform Poisson distribution, Schrödinger's equation, uncertainty relation, identity principle, variational principle.

УДК: 621.315.592:535.

ТЕРМОДИНАМІКА ТОЧКОВИХ ДЕФЕКТІВ ТА ЇХ ВПЛИВ НА ФІЗИКО-ХІМІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ КРИСТАЛІВ КАДМІЙ ТЕЛУРИДУ (ОГЛЯД)

Д. М. Фреїк, І. В. Горічок

Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76025, м. Івано-Франківськ, Шевченка, 57;
тел. +380 (342) 59-60-82, e-mail: goritchok@rambler.ru

Наведено аналіз основних типів власних точкових дефектів у кристалах телуриду кадмію та їх енергетичних параметрів – енергії утворення, енергії іонізації, зміни частоти коливань атомів в околі дефектів. Встановлено, що відсутність однозначних експериментальних та теоретичних даних про дефектну підсистему є основною причиною існуючої невизначеності під час інтерпретації фізико-хімічних властивостей кадмій телуриду.

Ключові слова: фізико-хімічні властивості телуриду кадмію, кристал, точкові дефекти, енергія утворення, енергія іонізації.

Вступ

- I. Фізико-хімічні властивості монокристалів кадмій телуриду.
- II. Синтез та вирощування монокристалів.
- III. Моделі дефектної підсистеми кристалів.
- IV. Термодинамічні параметри точкових дефектів.
 - IV.1. Енергія утворення дефектів
 - IV.2. Енергії іонізації дефектів
 - IV.3. Зміна частоти коливань в околі дефекту.
- V. Обговорення результатів досліджень

Висновки

Література

Вступ. Кадмію телурид – широкозонний напівпровідник групи A^2B^6 , який використовується як активний елемент у детекторах іонізуючого випромінювання, пасивних та активних елементах нелінійної оптики та оптоелектроніки, в якості підкладки для осадження тонких плівок $Cd_xZn_{1-x}Te$ та $Cd_xHg_{1-x}Te$. З метою створення матеріалу з наперед заданими та відтворюваними властивостями необхідний контроль точкових дефектів як у процесі його синтезу, так і наступної обробки, оскільки саме вони визначають основні фізико-хімічні властивості.

Незважаючи на значну кількість робіт, в яких досліджувалась структура точкових дефектів у кристалах кадмій телуриду, залишається нерозв'язаним повною мірою питання про домінуючі їх види та енергетичні параметри. Пряме експериментальне дослідження точкових дефектів пов'язане з певними труднощами, і значна частина інформації про точкові дефекти, отримана з експерименту, є непрямую і неоднозначною. Проте, наявність такої інформації має велике практичне значення,

оскільки шляхом моделювання дефектної структури кристалів можна прогнозувати властивості матеріалу залежно від умов його отримання та обробки.

Таким чином, завдання щодо визначення природи точкових дефектів, керування їх типом і концентрацією та їх зв'язку з технологічними чинниками є актуальною проблемою матеріалознавства кадмій телуриду. У пропонованому огляді зроблено спробу дати відповідь на поставлені запитання.

1. Фізико-хімічні властивості монокристалів кадмій телуриду

Кадмію телурид кристалізується в структурі цинкової обманки [1]. Область існування $CdTe$ асиметрична, максимальна температура плавлення сполуки відповідає нестехіометричному складу з надлишком телуру і становить $T_m = 1365$ К (рис.1) [2-8]. Стехіометричний $CdTe$ має точку плавлення дещо нижчу T_m . Для температур менших 1000 К більша частина області гомогенності сполуки лежить на боці надлишку Cd, а для температур, вищих 1000 К – зміщується в бік Te (рис.1).

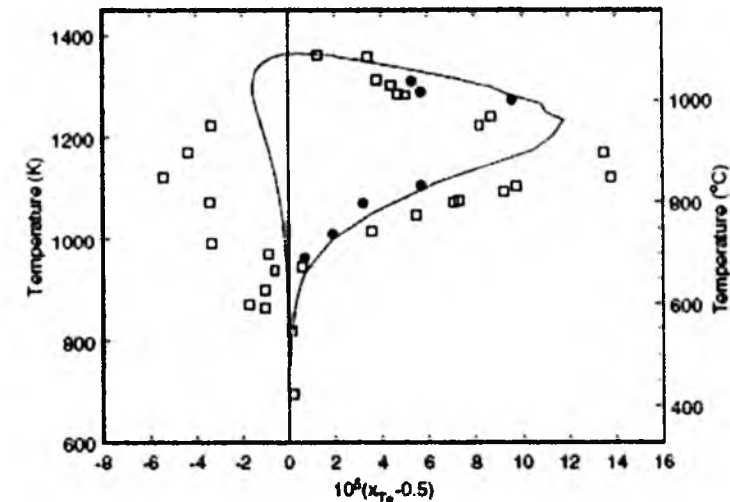


Рис. 1. T - X проекція фазової діаграми $CdTe$. Крива – розрахунок [23], точки експеримент. (● – [9], □ – [12])

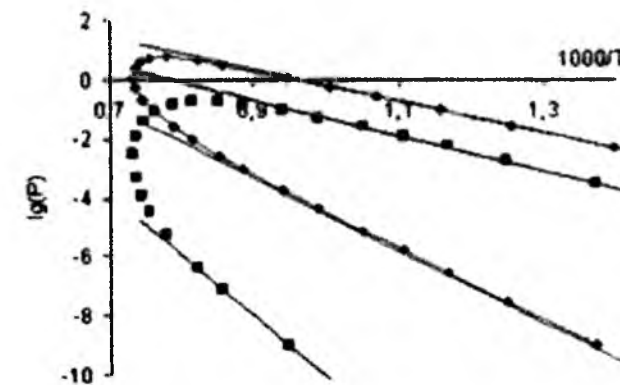


Рис. 2. P - T проекція фазової діаграми $CdTe$ [11-12]

Елементи Cd та Te є відносно легкоплавкими ($T_{\text{пл}}(\text{Cd}) = 590,9 \text{ K}$, $T_{\text{пл}}(\text{Te}) = 719 \text{ K}$). Кадмій в газовій фазі завжди є моноатомним, а теллур, за температур нижчих температури плавлення, в парі утворює переважно двоатомні молекули [14]. Молекул CdTe у парі виявити не вдалось [1].

Тиски парів компонентів (рис. 2) рівні:

$$\lg P_{\text{Cd}}^{\text{max}} = 5,152 - \frac{5342}{T}, \quad \lg P_{\text{Cd}}^{\text{min}} = 7,707 - \frac{12297}{T},$$

$$\lg P_{\text{Te}_2}^{\text{max}} = 4,7614 - \frac{6034,4}{T}, \quad \lg P_{\text{Te}_2}^{\text{min}} = 10,715 - \frac{20802}{T}.$$

Парціальні тиски компонентів Cd і Te₂ пов'язані між собою константою рівноваги реакції:

$$K_p = P_{\text{Cd}}^2 P_{\text{Te}}, \quad \text{або} \quad K_p = P_{\text{Cd}} P_{\text{Te}}^{1/2}.$$

Температурні залежності констант рівноваги K_p за даними різних авторів наведені у таблиці.

Табл. 1. Значення констант рівноваги реакції.

Константа	Числове значення $\lg(K_p)$	Література
$K_p = P_{\text{Cd}}^2 P_{\text{Te}}$	$-29587/T + 19,047$	[1]
$K_p = P_{\text{Cd}} P_{\text{Te}}^{1/2}$	$-36202/T + 24,958$	[2]
$K_p = P_{\text{Cd}} P_{\text{Te}}^{1/2}$	$-15314,2/T + 10,0877$	[11-12]
$K_p = P_{\text{Cd}} P_{\text{Te}}^{1/2}$	$-34609/T + 22,659$	[13]

Розрахунок *ab initio* зонної структури кристалів CdTe проведено з використанням методу псевдопотенціалу у наближенні LDA (апроксимація локальної густини) вказує на те, що краї головних зон (мінімум зони провідності і максимум валентної зони) розміщені при $k=0$ (рис.3) [16]. Слід зауважити, що використання для розрахунків базису, в який включено *d*-електрони, дозволяє отримувати теоретичні параметри (стала ґратки, ефективні маси електронів, та ін.), які добре узгоджуються з експериментально визначеними [16-17].

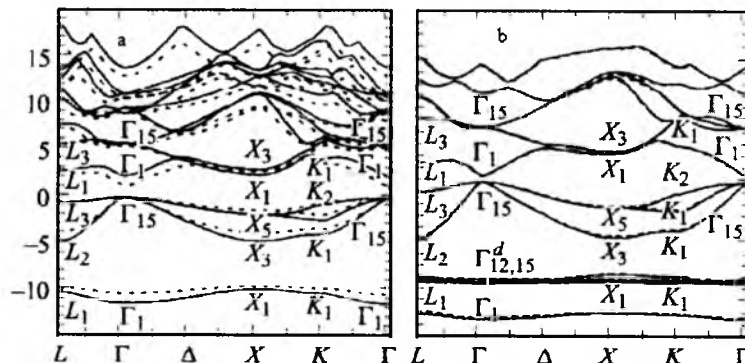


Рис. 3. Зонний спектр CdTe без врахування *d*-електронів (а) та з врахуванням *d*-електронів (б). Штрихові лінії відповідають розрахунку проведеному з використанням емпіричного значення сталої ґратки, суцільні – з використанням теоретично розрахованої сталої ґратки [16]

Ширина забороненої зони телуриду кадмію зростає зі зменшенням температури ($E_g = 1,622 - 3,5 \cdot 10^{-4} T - 1,1 \cdot 10^{-7} T^2 - [2]$,

$$E_g = 1,5976 - 6,09 \cdot 10^{-4} T / (T + 255) - [18], \quad E_g = 1,65 - 5,35 \cdot 10^{-4} T - [19].$$

Величина спін-орбітального розщеплення валентної зони становить 0,93 eV [17], 0,9 eV [20].

Ефективна маса електронів у зоні провідності за різними даними становить $0,13m_0$ [2], $0,11m_0$ [2], $0,096m_0$ [2], $0,096m_0$ [19], $0,090m_0$ [20], $0,096m_0$ [21]. Для дірок ефективні маси становлять $0,41m_0$ [2], $0,63m_0$ [2], $0,11m_0$ (легкі дірки)[20], $0,4m_0$ (важкі дірки)[20].

Характеристичні температури для акустичних та оптичних фононів для CdTe були визначені у роботі [22] ($\theta_{TA} = 69 \text{ K}$, $\theta_{LA} = 144 \text{ K}$, $\theta_{TO} = 200 \text{ K}$, $\theta_{LO} = 220 \text{ K}$).

Провідність матеріалу, рухливість носіїв та їх концентрація [23], енергії випромінювальних переходів [27-28] та інші електричні і оптичні властивості CdTe виявляють сильну залежність від хімічного складу та дефектної структури кристалу (рис. 4-5), формування якої можна ефективно контролювати в процесі післяростової високотемпературної обробки. Встановлено, що за кімнатних та нижчих температур переважачим механізмом розсіювання є розсіювання на іонізованих центрах, а за вищих температур – на оптичних фонах [21, 23, 25-26].

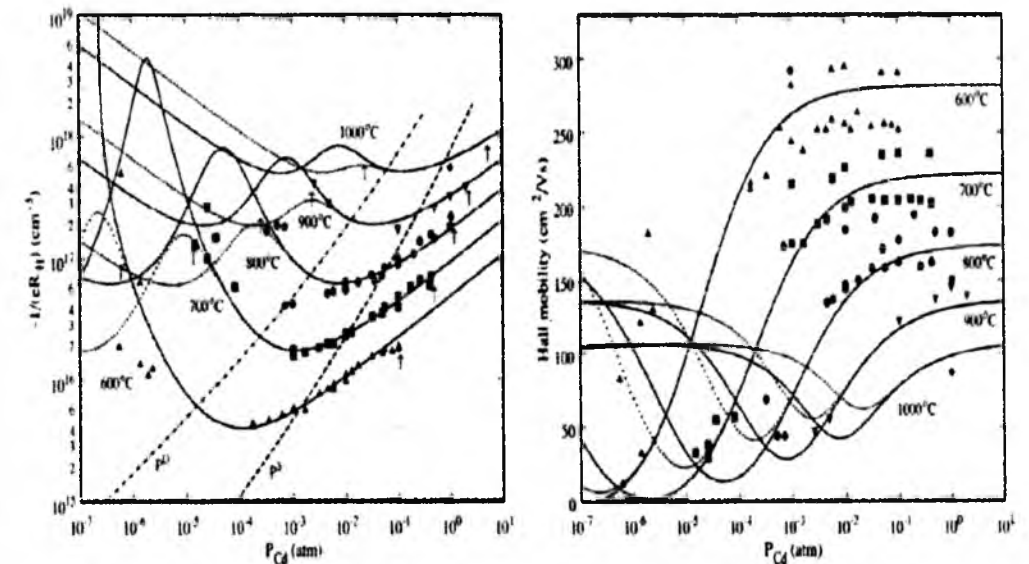


Рис. 4. Залежність холівської концентрації (а) та холівської рухливості (б) від тиску пари кадмію при двотемпературному відпалі при різних температурах відпалу. Точки – експеримент, суцільна та штрихована лінія – моделювання, з врахуванням різних значень енергії іонізації антиструктурного дефекту Te_{Cd} [23]

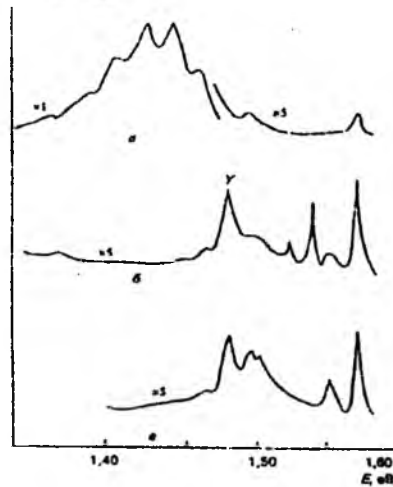


Рис. 5. Спектр фотолюмінесценції полікристалічного CdTe в околі 1,45 eV: а – відразу після вирощування з вихідних компонент Cd і Te, що пройшли один цикл очистки; б – після відпалу вирощеного матеріалу в атмосфері Cd протягом 48 год; в – відразу після вирощування з вихідних матеріалів Cd і Te, що пройшли три цикли очистки [28]

2. Синтез та вирощування монокристалів

Найбільш продуктивним методом вирощування кадмій телуриду є метод Бріджмена [19-36]. Синтез телуриду кадмію проводять у кварцових ампулах шляхом сплавлення елементів кадмію та телуру. Кварцові ампули перед завантаженням промивають гарячим розчином лугу (24 год.), та $\text{HNO}_3:\text{HCl}$ (1:3). Для зменшення взаємодії матеріалу з стінками ампули останню графітизують.

Для гомогенізації ампулу з компонентами декілька годин витримують за $T \approx 773 \text{ K}$, після чого температуру збільшують до величини, трохи вищої від $T_{\text{пл}}$. Після витримки розплав здійснюють спрямовану кристалізацію з швидкістю $\approx 3 \text{ мм/год.}$ (рис.6). Градієнт температури в зоні кристалізації становить приблизно 10 град/см.

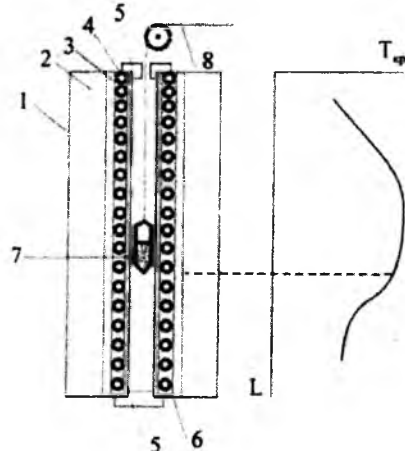


Рис. 6. Схематичне зображення конструкції печі для вирощування кристалів методом Бріджмена і її температурний профіль: 1 – кожух; 2 – азбестова теплоізоляція; 3 – екран; 4 – нагрівник; 5 – заглушки; 6 – керамічна трубка; 7 – ампула; 8 – механізм переміщення

З метою ефективного керування типом провідності і величиною концентрації носіїв струму, проводять термічний відпал отриманих монокристалів за методикою двотемпературного відпалу.

Техніка проведення двотемпературного відпалу схематично зображена на рис. 7. Відпал зразків проводиться у вакуумованих ампулах в двозонній печі, де одна зона забезпечує температуру монокристала, а друга – температуру компонента (Cd чи Te).

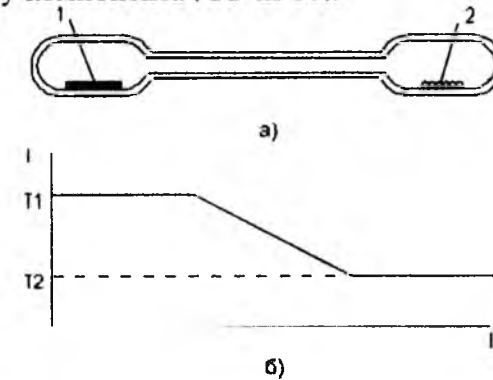


Рис. 7. Схема двотемпературного відпалу (а) і профіль температури (б): 1 – кристали CdTe; 2 – компоненти Te (Cd)

3. Моделі дефектної підсистеми кристалів

Оскільки більшість експериментів, що проводяться з метою визначення типу чи параметрів точкових дефектів (ФЛ, ЕПР, ЕХ та ін.), не дають підстав для однозначних висновків про дефектну структуру кристалів, методи моделювання дефектної структури широко використовуються для пояснення та прогнозування структурно чутливих властивостей кристалів.

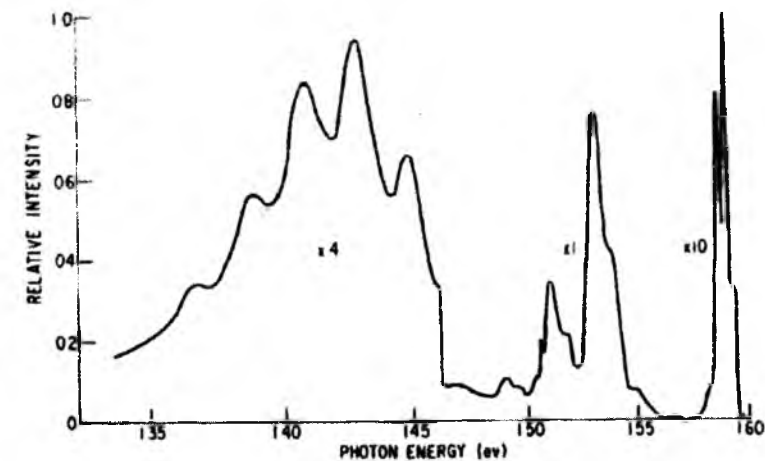


Рис. 8. Спектр фотолюмінесценції кристалів CdTe при температурі 20 K [37]

Дослідження оптичних властивостей кристалів [37-39] дали змогу виявити у кристалах випромінювальні переходи, кількість яких перевищує число можливих власних точкових дефектів, і сильно залежить від умов отримання та обробки матеріалу (рис. 8-9). Тому під час моделю-

вання дефектної структури виникає проблема вибору домінуючих дефектів, які визначають властивості матеріалу. Різними авторами для інтерпретації експериментальних даних отриманих з вимірювань ефекту Холла та оптичних вимірювань, використовуються моделі, що враховують або всі можливі види точкових дефектів (вакансії, міжвузлові та антиструктурні атоми аніонів та катіонів) [24], або тільки деякі з них [23], які, на думку авторів, є переважаючими.

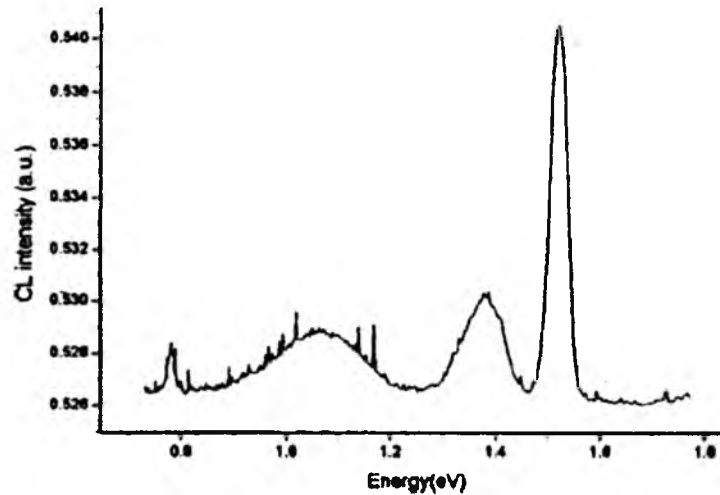


Рис. 9. Спектри катодолумінесценції кристалів CdTe з різними концентраціями дефектів [38]

При цьому більшість моделей задовільно пояснюють електричні властивості кристалів, а в окремих випадках [6, 23] вдається навіть якісно та кількісно правильно описати межі області гомогенності сполуки (рис. 1). Проте дефектні структури, отримані з розрахунків за різними моделями, іноді значно відрізняються між собою (рис. 10).

У роботах, де досліджується природа домінуючих точкових дефектів у насиченому кадмієм телуриді кадмію [2, 40-52], думки про домінуючі точкові дефекти неоднозначні.

Наприклад, згідно з [47-50] у цій області домінуючим є Cd_i за всіх температур відпалу, тоді як у [42-46] автори вважають, що домінуючим є Cd_i за температур $T > 900$ K та V_{Te} – за нижчих.

Більш складним є питання про домінуючі дефекти у матеріалі насиченому телуром. Частково це зумовлено відсутністю достатньої кількості надійних експериментів у цій області, що пов'язано з агресивним середовищем пари телуру.

Згідно з [43-46] у матеріалі, насиченому телуром, домінуючі дефекти є акцепторами (вакансія кадмію або міжвузловий атом телуру), тоді як згідно з [47-52] на роль домінуючого дефекту пропонується антиструктурний телур Te_{Cd} . У [41, 56] було встановлено, що за високого тиску пари телуру провідність не залежить від парціального тиску пари телуру, що, на думку авторів, свідчить про домішкову провідність у цій області тиску компоненту ($[Na] 10^{16} \text{ см}^{-3}$ [41], $[Si] \approx 10^{16} - 10^{17} \text{ см}^{-3}$ [56]).

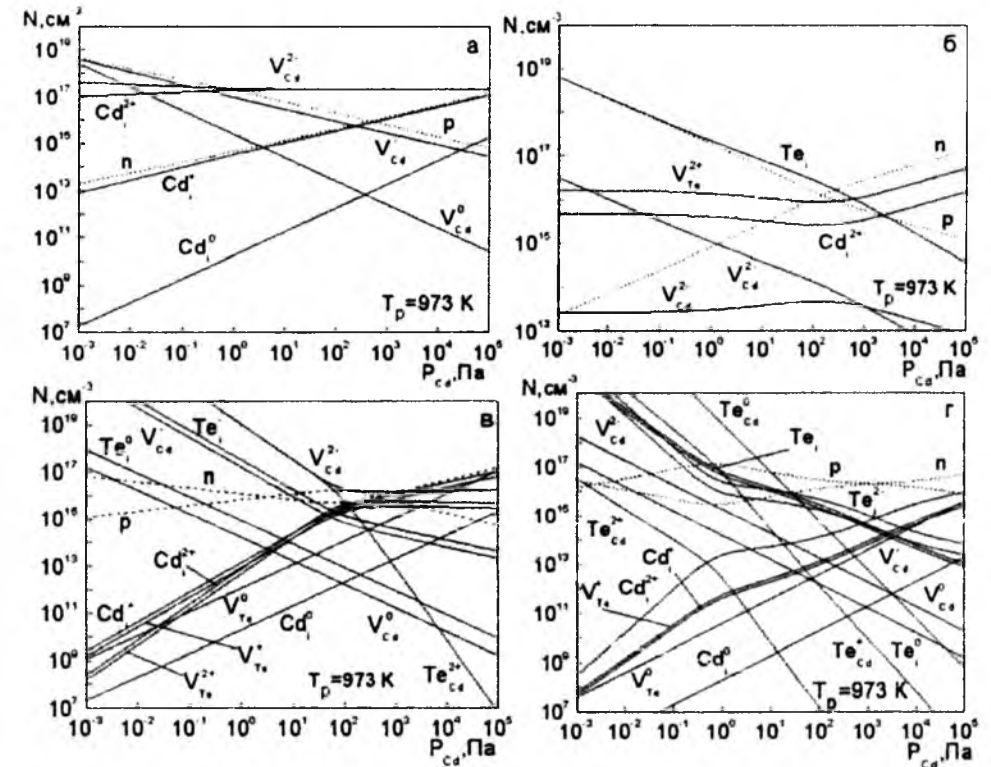


Рис. 10. Залежність концентрації точкових дефектів та вільних носіїв заряду від парціального тиску пари кадмію при температурі 973 K [53] (розрахунок проведений з використанням моделей та констант запропонованих у [55] (а), [43] (б), [54] (в, г))

4. Термодинамічні параметри точкових дефектів

4.1. Енергія утворення дефектів

Енергія утворення дефектів є важливим параметром структури дефектів, що дає змогу визначати імовірний тип домінуючих дефектів і оцінити його концентрацію в залежності від технологічних умов обробки кристалу. Але часто числове значення енергії утворення залежить від методу його визначення.

У [2] з аналізу експериментальних даних було отримано ентальпії утворення міжвузлового атома кадмію ($\Delta H = -0,83 \text{ eV}$), вакансії кадмію ($\Delta H = 3,20 \text{ eV}$) та френкелівського дефекту у катіонній підгратці ($\Delta H = 2,37 \text{ eV}$).

В роботі [43], з огляду на те, що за високих температур домінує один тип дефектів, експериментально визначено ентальпію його утворення: $\Delta H \approx 2,1 \text{ eV}$. На думку авторів, домінуючим дефектом з такою ентальпією утворення є міжвузловий атом кадмію.

Варто зауважити, що у [2] і [43] при визначенні ентальпій утворення дефектів використовували теорію квазіхімічних рівнянь дефектоутворення та апроксимаційну формулу для констант рівноваги у вигляді [55]

$$K = K^0 \cdot \exp(-\Delta H^0 / kT), \quad (1)$$

де K^{0*} і ΔH^{0*} не залежать від температури і є ефективним значенням цих величин. Тому, використовуючи формулу (1), необхідно враховувати, що отримані значення будуть не істинними, а ефективними [55], а їх використання для розрахунків в інших моделях може виявитись некоректним.

Константи K^0 та ентальпії ΔH отримані іншими авторами наведено у табл.2.

Табл. 2. Термодинамічні параметри ($K = K_0 \exp(-\Delta H/kT)$) квазіхімічних рівнянь дефектоутворення в CdTe

№	Рівняння та відповідні константи рівноваги	[42]		[6]		[56]		[24]	
		K_0	$\Delta H, eV$	S/k	$\Delta H, eV$	K_0	$\Delta H, eV$	K_0	$\Delta H, eV$
1	$Cd(v) \rightleftharpoons Cd_{Cd}^0 + V_{Te}^{2+} + 2e^-$	$7,78 \cdot 10^{57}$	1,47	-19,85	1,07	$3 \cdot 10^{57}$	1,3	$9,36 \cdot 10^{59}$	2,35
2	$Cd_i \square Cd_i^+ + e^-$			-5,04	0,14				
3	$Cd(\varepsilon) \square Cd_i$			-36,18	-0,84	$1 \cdot 10^{10}$	-0,95		
4	$Cd(\varepsilon) \square Cd_i^+ + e^-$			-41,22	-0,70	$1 \cdot 10^{30}$	-0,81		
5	$Cd(v) \rightleftharpoons Cd_i^{2+} + 2e^-$	$6,16 \cdot 10^{61}$	2,28	-10,87	2,28	$7 \cdot 10^{63}$	2,5	$9,57 \cdot 10^{61}$	2,21
6	$Cd_{Cd}^0 + 2e^- \rightleftharpoons Cd(v) + V_{Cd}^{2-}$	$2,40 \cdot 10^{-14}$	0,88	19,69	0,88	$2 \cdot 10^{-15}$	1,28	$3,44 \cdot 10^{-14}$	0,89
7	$Cd_{Cd}^0 + e^- \rightleftharpoons Cd(v) + V_{Cd}^-$	$9,8 \cdot 10^7$	2,08	11,98	1,54	$8 \cdot 10^5$	2,08		
8	$CdTe + e^- \rightleftharpoons Cd(v) + Te_i^-$	$3,95 \cdot 10^3$	1,19	8,28	1,19	$2 \cdot 10^3$	1,00		
9	$CdTe \rightleftharpoons Cd(v) + Te_i^0$	$2,75 \cdot 10^3$	3,6	7,84	2,83			$2,86 \cdot 10^{20}$	2,17
10	$0 \rightleftharpoons V_{Cd} + V_{Te}$			27,1	1,9				
11	$0 \rightleftharpoons V_{Cd}^{2-} + V_{Te}^{2+}$	$1,86 \cdot 10^{44}$	2,35	-1,57	2,35			$3,22 \cdot 10^{46}$	3,25
12	$Cd_{Cd} \square Cd_i + V_{Cd}$			-18,75	2,10				
13	$Cd_{Cd} \square Cd_i^+ + V_{Cd}^-$			-17,29	1,04				
14	$Cd_{Cd}^0 \rightleftharpoons Cd_i^{2+} + V_{Cd}^{2-}$	$1,86 \cdot 10^{48}$	3,16	8,81	3,76			$3,29 \cdot 10^{48}$	3,1
15	$0 \rightleftharpoons e^- + h^+$	$6,8 \cdot 10^{42}$	1,92	-3,47	1,60	$3 \cdot 10^{40}$	1,60	$2,52 \cdot 10^{42}$	1,96
16	$V_{Cd} + Cd(\varepsilon) = Cd_{Cd}$			13,64	-2,44	$5 \cdot 10^{27}$	-3,31		
17	$V_{Cd}^- \square V_{Cd} + e^-$			-6,50	1,20				
18	$V_{Cd}^{2-} \rightleftharpoons V_{Cd}^- + e^-$	$1,07 \cdot 10^{-2}$	0,66	-7,71	0,66				
19	$Te_i^0 \rightleftharpoons Te_i^- + h^+$	$4,8 \cdot 10^{-2}$	0,275	-3,04	0,28				
20	$CdTe \rightleftharpoons Cd(v) + \frac{1}{2} Te_2(v)$	$5,7 \cdot 10^9$	2,98						
21	$\frac{1}{2} Te_2(v) \rightleftharpoons Te(v)$	5,39	1,18						
22	$CdTe \rightleftharpoons Cd(v) + Te(v)$	$3,06 \cdot 10^{12}$	4,16						

У роботах [59-60] розрахунок ентальпій утворення вакансій металу та халькогену проводили з використанням термодинамічних параметрів матеріалу без використання теорії квазіхімічних реакцій дефектоутво-

рення. Отримані числові значення становлять: $\Delta H(V_{Cd}) = 1,08 eV$, $\Delta H(V_{Te}) = 2,03 eV$.

Подібним методом енергії утворення вакансій кадмію та телуру визначені також у роботах [61-62]: $\Delta H(V_{Cd}) = 2,32 eV$ [61], $3,00 eV$ [62] та $\Delta H(V_{Te}) = 2,32 eV$ [61], $1,70 eV$ [62]. У [61] були визначені також енергії утворення антиструктурних дефектів – $\Delta H(Te_{Cd}) = 0,98 eV$ та $\Delta H(Cd_{Te}) = 0,98 eV$.

Ab initio розрахунок енергії утворення дефектів виконано у роботах [63-65, 19, 66-71] (табл. 3).

Табл. 3. *Ab initio* розрахунок [19, 71, 63] енергій утворення (в eV) нейтральних дефектів (Два значення для міжвузлових атомів відповідають різним тетраедричним оточенням – аніонне, катіонне)

Література	V_{Cd}	Cd_i	V_{Te}	Te_i	Te_{Cd}	Cd_{Te}
[19]	3,44	1,10; 0,76	5,56	0,85; 1,48	1,72	
[71]	4,7			1,45; 2,63	2,52	
[63]	2,67	2,26; 2,04	3,24	3,41; 3,52	3,70	3,92

У [63-65] розрахунок проводили на базисі плоских хвиль з використанням наближення LDA. В розрахунок разом з s та p включалися 4d орбіталі атомів. Інтегрування проводили не по всій зоні Бріллюена, а тільки у десяти спеціальних точках. Кристал моделювався 32-атомною періодичною коміркою, в центр якої поміщали дефект. Енергія дефекту визначалась як різниця між енергією 32-атомної комірки без дефекту та енергією комірки з дефектом у центрі. Використані у ході розрахунку наближення зумовлюють виникнення похибки під час визначення енергії утворення дефекту, що становить $0,2 eV$ [63].

У [19] для розрахунку використовували базис, побудований на атомних хвильових функціях з $l \leq 5$. Для кращого відтворення розподілу електронної густини у просторі між ядрами додатково до базису додавали атомні хвильові функції центровані між ядрами. Як і у [63], кристал моделювався 32-атомною періодичною коміркою. Інтегрування проводили у 14 точках зони Бріллюена. У випадку утворення дефекту враховували релаксацію першої та другої координаційної сфери навколо дефекту.

У роботах [8, 23, 24, 47-51] енергії утворення нейтральних точкових дефектів використовувались як варіаційні параметри, і були визначені такі числові значення, які дозволяють якнайкраще описати експериментальні залежності холівської концентрації носіїв від технологічних параметрів двотемпературного відпалу. (Часто автори визначали суму $E + U^{vib}$, де U^{vib} – коливна енергія дефекту. В більшості робіт її значення приймають рівним $0,26 eV$, що відповідає енергії осцилятора з трьома ступенями вільності при 1000 K) (табл.4).

У [72] енергію утворення вакансій у сполуках A_2B_6 було розраховано модифікованим методом РМХ (розширений метод Хюкеля), запропонованим у [73-75]. Електронна структура вакансії визначається відповідно до моделі дефектної молекули. В базис такої дефектної мо-

лекули включено валентні s - та p -орбіталі, які у тетраедричних напівпровідниках утворюють sp^3 -гібризовані атомні орбіталі.

Табл. 4. Енергії утворення E та вібраційні ентропії S^{vib} нейтральних дефектів [2, 23-24, 47]

	V_{Cd}	Cd_i	V_{Te}	Te_i	Te_{Cd}
[24]	$E+U^{vib}=3,84 \text{ eV}$ $S^{vib}=-13,05k$	$E+U^{vib}=1,97 \text{ eV}$ $S^{vib}=38,46k$	$E+U^{vib}=1,41 \text{ eV}$ $S^{vib}=33,83k$	$E+U^{vib}=1,97 \text{ eV}$ $S^{vib}=-38,54k$	$E+U^{vib}=-0,81 \text{ eV}$ $S^{vib}=-23,71k$
[23]	$E=3,75 \text{ eV}$ $U^{vib}=-0,26 \text{ eV}$ $S^{vib}=-6,4k$	$E=0,76 \text{ eV};$ $1,09 \text{ eV}$ $U^{vib}=0,26 \text{ eV}$ $S^{vib}=13,9k$			$E=6,1 (6,2) \text{ eV}$ $U^{vib}=-0,52 \text{ eV}$ $S^{vib}=-6,5k$
[47]	$E=3,84 \text{ eV}$ $U^{vib}=-0,26 \text{ eV}$ $S^{vib}=-8,9k$	$E=0,90 \text{ eV};$ $1,10 \text{ eV}$ $U^{vib}=0,26 \text{ eV}$ $S^{vib}=16,4k$			$E=6,3 \text{ eV}$ $U^{vib}=-0,52 \text{ eV}$ $S^{vib}=-5,6k$
[8]	$E=3,75 \text{ eV}$	$E=0,76 \text{ eV};$ $1,09 \text{ eV}$			$E=3,3 \text{ eV}$

У [72] енергію утворення вакансій у сполуках A_2B_6 було розраховано модифікованим методом РМХ (розширений метод Хюкеля), запропонованим у [73-75]. Електронна структура вакансії визначається відповідно до моделі дефектної молекули. В базис такої дефектної молекули включено валентні s - та p -орбіталі, які у тетраедричних напівпровідниках утворюють sp^3 -гібризовані атомні орбіталі.

Результати розрахунків, проведених на основі методу РМХ, а також результати розрахунків, отриманих іншими авторами та експериментальні дані, наведено у таблиці 5.

Табл. 5. Ентальпії утворення вакансій металу V_A та халькогену V_B у сполуках A_2B_6

Сполука	Ентальпія, H_{V_A}, eV		Ентальпія, H_{V_B}, eV		Ентальпія, $H_{V_A} + H_{V_B}, \text{eV}$			
	*	[61]	*	[61]	*	[61]	[55]	Експеримент
ZnS	5,65	2,87	4,33	2,53	9,98	5,30	$3,4 \pm 1,2$ $5,77$	4[55]
ZnSe	4,48	2,56	3,23	2,56	7,71	5,12		$5,9$ [61] $3,1$ [61]
ZnTe	4,08	2,12	2,81	2,64	6,89	4,76		
CdS	5,22	3,01	4,00	2,14	9,22	5,15	4,0	
CdTe	3,65	2,32	2,54	2,32	5,19	4,64		$2,9$ [61] $3,7$ [61]

* – значення, отримані в даній роботі

4.2. Енергії іонізації дефектів

Енергія іонізації дефектів є одним з найважливіших параметрів, що визначає електричні, фотоелектричні, оптичні та інші властивості напівпровідникових сполук. Природа рівнів досліджується в набагато меншій кількості робіт і у багатьох випадках має наближений характер.

У роботах [76, 19, 63, 78] положення енергетичних рівнів дефектів розраховано *ab initio* (табл.6.). Як і можна було очікувати, з огляду на

точність квантовомеханічних методів отримані значення енергій іонізації відрізняються між собою іноді більш, ніж удвічі.

Табл. 6. *Ab initio* розрахунок [63, 19, 76, 78] енергій іонізації дефектів

	[63]		[19]		[76]		[78]	
Дефект	ϵ_1, eV	ϵ_2, eV	ϵ_1, eV	ϵ_2, eV	ϵ_1, eV	ϵ_2, eV	ϵ_1, eV	ϵ_2, eV
V_{Cd}	$E_v+0,13$	$E_v+0,21$	$E_v+0,2$	$E_v+0,8$				
V_{Te}		$E_c-0,71$	$E_c-0,4$	$E_c-0,5$	$E_c-0,38$	$E_c-0,84$		
$Te_i(a)$		$E_v+0,57$						
$Te_i(c)$		$E_v+0,57$					$E_v+0,95$	
$Cd_i(a)$		$E_c-0,45$	E_c-0	$E_c-0,2$				
$Cd_i(c)$		$E_c-0,45$						
Cd_{Te}		$E_c-0,10$						
Te_{Cd}	$E_c-0,34$	$E_c-0,59$	E_c-0	$E_c-0,4$				

Експериментальне визначення енергій іонізації пов'язане з вибором моделей домінуючих точкових дефектів, що часто призводить до неоднозначних висновків [38].

У значеннях енергій іонізації міжвузлового атома кадмію, запропонованих різними авторами, великих розбіжностей нема. Рівні $\epsilon_1=E_c-(0,02[2], 0,016[81], 0,015[82])$ та $\epsilon_2=E_c-(0,17[83])$, що спостерігаються у матеріалі, приписуються авторами відповідно першому та другому зарядовому стану міжвузлового атома кадмію. Розрахунок [19] дає приблизно такі ж результати (табл.6).

Для вакансії телуру є кілька варіантів розташування енергетичних рівнів у забороненій зоні. Згідно з [42] та [99] вакансія телуру створює мілкі донорні рівні ($\epsilon_1=E_c-0,035 \text{ eV}$ [42], $\epsilon_1=E_c-0,04 \text{ eV}$ [99]). Але у роботах [81, 83, 61, 38] автори вважають, що вакансії телуру створюють глибокі донорні рівні ($\epsilon_1=E_c-0,15 \text{ eV}$ [61]; $\epsilon_2=E_c-(0,34[83], 0,43[81], 0,60[81], 0,60[61], 1,10[38]) \text{ eV}$). При теоретичних розрахунках [19, 63, 76] отримано результати, які також вказують на те, що рівні іонізації V_{Te} є глибокими (табл.6).

У роботах [84-86], опираючись на експериментальні дані (в основному ЕПР), авторами робиться висновок, що перший рівень вакансії телуру розміщений поблизу валентної зони – $E_v+0,2 \text{ eV}$, а другий – у валентній зоні. Проте, у [8] висловлюється сумнів щодо такої інтерпретації сигналів ЕПР. Натомість зроблено припущення, що такий рівень скоріш може належати антиструктурному дефекту Te_{Cd}^{2+} . Зокрема під час моделювання у [8] вважали, що антиструктурні дефекти Te_{Cd} створюють у забороненій зоні кристалу глибокі донорні рівні з енергіями $\epsilon_1=E_c-1,44 \text{ eV}$ та $\epsilon_2=E_c-1,60 \text{ eV}$, і при цьому отримали хорошу збіжність між теоретичними та експериментально визначеними холівськими концентраціями.

Глибокі донорні рівні ($E_c-0,75 \text{ eV}$), що можуть належати антиструктурному телуру, спостерігали також у [87, 88, 89]. Проте, у всіх цих роботах досліджувались леговані кристали ([87] – CdTe-Ga, [88] – CdTe-V, [89] – CdTe-Cl), а тому зафіксований рівень може бути пов'язаний з домішкою.

У роботі [90] автори вказують на присутність у кристалах CdTe, насичених телуrom доного рівня $E_c - (0,56-0,58) \text{ eV}$, що, на думку авторів, також може належати антиструктурному дефекту. Оскільки однозначно зарядовий стан цього рівня невідомий, то він може бути або першим або другим енергетичним рівнем дефекту у забороненій зоні. Якщо цей зарядовий рівень перший, то другим може бути рівень визначений у роботі [89] – $E_c - 0,75 \text{ eV}$, що також авторами приписується антиструктурному дефекту. Якщо ж вважати рівень $E_c - (0,56-0,58) \text{ eV}$ створеним двократно іонізованим дефектом, то його значення з точністю до $0,01 \text{ eV}$ збігається з розрахунковими даними для Te_{Cd} [63-65] ($\epsilon_1 = E_c - 0,34 \text{ eV}$ та $\epsilon_2 = E_c - 0,59 \text{ eV}$) (табл. 6).

За даними [63-65] глибоким донором може бути також антиструктурний кадмій Cd_{Te}^{2+} , який створює у забороненій зоні рівень $E_c - 0,1 \text{ eV}$. Ці енергії іонізації є близькими до згадуваних у огляді [99] $E_c - 0,06 \text{ eV}$ та $E_c - 0,08 \text{ eV}$, які також приписують цьому дефекту. Проте достатньо надійні експериментальні дані, які б підтвердили присутність у кристалі цього дефекту відсутні. У роботі [91] навіть наводяться дані, згідно з якими CdTe є акцептором з рівнем $E_v + 0,1 \text{ eV}$.

На думку деяких авторів [19, 63, 38], глибокі донорні рівні можуть також створювати міжвузлові атоми кадмію, найближчими сусідами яких є атоми кадмію (мілкі ж рівні створюють міжвузлові атоми кадмію, найближчими сусідами яких є атоми телуру). Так, виявлений у [38] донорний рівень $E_c - 0,64 \text{ eV}$ автори приписують Cd_i^{2+} .

Для вакансії кадмію енергія першого рівня іонізації за даними різних авторів становить $E_v + (0,05[82], 0,069[92], 0,062[93], 0,055[94], 0,05[95]) \text{ eV}$ або $E_v + (0,13[63], 0,20[19], 0,15[42], 0,30[61]) \text{ eV}$. Експериментально спостережуваний рівень $E_v + (\approx 0,06) \text{ eV}$ є одним з найінтенсивніших в нелегованому та легovanому донорними домішками матеріалі, через що автори пов'язують його з першим зарядовим станом катіонної вакансії, яка найчастіше розглядається як компенсуючий дефект. Рівень $E_v + (\approx 0,15) \text{ eV}$ також часто експериментально спостерігається [2, 42, 38], однак не у всіх зразках і з меншою інтенсивністю. Даний рівень у деяких роботах, зокрема [42, 57], приписується першому зарядовому стану міжвузлового атома телуру.

Енергія іонізації другого електрона вакансії кадмію становить $E_v + (0,90[2], 0,90[61], 0,735[96], 0,76[38], 0,80[19], 0,20[63]) \text{ eV}$.

Однак дослідження спектрів фото-ЕПР [84-86] приводять до висновку, що рівень V_{Cd}^{2-} не може бути розміщений вище, аніж $0,47 \text{ eV}$ від стелі валентної зони. Це припущення може бути справедливим, особливо якщо звернути увагу на роботу [83], автори якої вважають, що один з спостережуваних рівнів ($E_v + 0,86 \text{ eV}$), який часто є домінуючим у матеріалі, і здебільшого ідентифіковується як другий зарядовий стан вакансії кадмію, належить дислокації. Експериментально рівні $E_v + (\approx 0,4) \text{ eV}$ спостерігалась також у роботах [89, 38].

Глибоким подвійним акцептором згідно [63-65] може бути і міжвузловий атом телуру: $E_v + 0,57 \text{ eV}$ [63], $E_v + 0,583 \text{ eV}$ [97], $E_c - 0,06 \text{ eV}$ [42]. Рівень $E_v + 0,57 \text{ eV}$ експериментально спостерігали також у [98], але висновків про те, якому дефекту він належить, автори не роблять. Проте у деяких роботах міжвузловий атом телуру вважають нейтральним [61], чи навіть донорним дефектом [91].

Оскільки кількість експериментально виявлених акцепторних рівнів набагато більша за кількість можливих типів простих дефектів, то у [61] для ідентифікації акцепторних дефектів використано припущення про можливість утворення комплексів точкових дефектів. Порівняння даних (рис.11) з наведеними вище літературними даними свідчить, що експериментально спостережувані рівні дійсно можуть бути пояснені наявністю комплексів типу $(V_{Cd}D_{Te})$, причому роль донора D може відігравати власна вакансія телуру, антиструктурний телур, або залишкові домішки.

Особливо необхідним є введення в моделі дефектної структури комплексів точкових дефектів під час дослідження легованих кристалів телуриду кадмію.

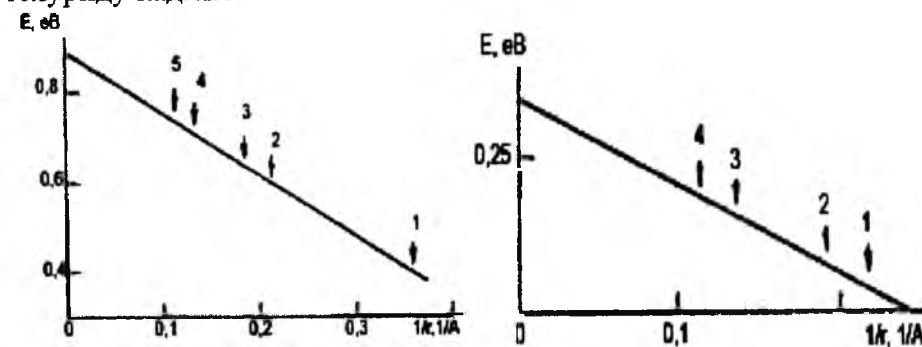


Рис. 11. Залежність енергії іонізації комплексу дефектів $(V_{Cd}^{2-}D_{Te}^{1+})^{1-}$ (а) та $(V_{Cd}^{1-}D_{Te}^{1+})^0$ (б) від оберненої відстані між дефектами, що утворюють комплекс [61]. Цифри – номери координаційних сфер

4.3. Зміна частоти коливань атомів в околі дефекту

Визначення частоти коливань атомів в околі дефекту є однією з найскладніших як теоретичних, так і експериментальних задач теорії дефектоутворення.

У роботі [66] було виведено формули для визначення вільної коливної енергії дефекту. Отримані вирази для коливної ентропії дефекту

$$S^{vib} = 2k \int_0^{\infty} \Delta\rho(\omega^2) \left\{ \frac{\hbar\omega}{2kT} \coth\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) - \ln \left[2 \sinh\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right) \right] \right\} \omega d\omega$$

та для коливної енергії

$$U^{vib} = 2 \int_0^{\infty} \Delta\rho(\omega^2) \left\{ \frac{\hbar\omega}{2} \coth\left(\frac{\hbar\omega}{2kT}\right) \right\} \omega d\omega,$$

а вільна коливна енергія –

$$F^{vib} = U^{vib} - TS^{vib}.$$

За високих температур наближено можна записати:

$$F^{vb} \approx 2kT \int_0^{\infty} \ln\left(\frac{\hbar\omega}{kT}\right) \omega d\omega$$

або

$$F^{vb} \approx 2kT n_m \ln\left(\frac{\hbar\bar{\omega}}{kT}\right),$$

де n_m – кількість фононних мод, утворених в результаті виникнення дефекту, з усередненою частотою $\bar{\omega}$. Оскільки концентрація дефектів пропорційна доданку $\exp(-F^{vb}/kT)$, то можна записати:

$$\exp\left(\frac{F^{vb}}{kT}\right) \approx \left(\frac{kT}{\hbar\bar{\omega}}\right)^{n_m} = CT^{n_m}, \quad (2)$$

де параметри C та n_m залежать від типу дефекту.

Однак використовуючи теоретичні значення S та F у [8] авторам не вдалось пояснити експериментальні залежності концентрацій носіїв від технологічних чинників двотемпературного відпалу. Тому автори використовували параметр C як варіаційний параметр моделі (C_{var}) (табл. 7).

Табл. 7. Теоретично розраховані та експериментально визначені коефіцієнти C [8]

	J	C_{teor}	C_{var}
Cd_i	+1	0,0176 K ⁻¹	0,038 K ⁻¹
V_{Cd}	-1	147,3 K	317 K
Te_{Cd}	0	1,061	62

Неоднозначно визначеним є сам характер зміни частоти коливань атомів в околі дефекту. Вакансії та міжвузлові атоми можуть як збільшувати, так і зменшувати частоти коливань навколишніх атомів. Причому внаслідок утворення міжвузлових атомів частота самого міжвузлового атома може зростати, тоді як частота його сусідів – зменшуватись [55]. Якщо частота атомних коливань ідеального кристала – ω_0 , а недосконалого – ω , то зміну коливної ентропії дефекту можна представити у вигляді:

$$\Delta S = 3xk \ln\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right), \quad (3)$$

де x – число атомів, що змінили частоту коливань. Для вакансії величина x приблизно дорівнює координаційному числу [55].

Аналіз експериментальних даних, представлених у [55], дає підстави зробити висновок, що дефект збільшує або зменшує частоту коливань атомів приблизно удвічі:

$$0,5 \leq \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right) \leq 2,0. \quad (4)$$

Визначені за формулою (3) значення ω/ω_0 представлені у табл.8.

Табл. 8. Зміни частот ω/ω_0 атомних коливань в околі точкових дефектів

Література	V_{Cd}	Cd_i	V_{Te}	Te_i	Te_{Cd}
[6]	3,11	0,09	0,19 (для V_{Te}^{2+})	1,69	
[23]	0,59	2,53			0,65
[24]	0,34	12,99	16,76	0,08	0,21
[47]	0,48	2,98			0,69
[100]	3,75	0,25	1,65	0,15	0,27

5. Обговорення результатів досліджень

Проведений аналіз робіт, присвячених проблемі дефектоутворення у кристалах кадмій телуриду, дає підстави зробити висновок про те, що електричні властивості визначаються донорними дефектами V_{Te} за температур $T < 900$ K, та Cd_i за вищих температур. Використання при інтерпретації холлівських вимірювань у рамках моделі тільки міжвузлового атома кадмію не дозволяє інтерпретувати експериментальні дані настільки ж точно, як у випадку використання одночасно двох типів дефектів – V_{Te} та Cd_i . Відсутність експериментальних даних про антиструктурні дефекти Cd_{Te} , який також може бути домінуючим у насиченому кадмієм матеріалі, не дає підстав зробити однозначних висновків про його наявність чи відсутність у кристалах. Варто зауважити, що жодна з існуючих моделей дефектної структури не дозволяє кількісно правильно описати область гомогенності кадмій телуриду на боці надлишку кадмію.

Відсутність надійних експериментальних даних про електричні властивості CdTe-Te ускладнює визначення домінуючих дефектів. Проте у більшості робіт перевагу надають V_{Cd} , що, ймовірно, пов'язано з вакансійними механізмами дифузії у CdTe. Модель антиструктурних дефектів дозволяє пояснити температурну залежність ширини області гомогенності CdTe на боці надлишку телуру.

Ідентифікація енергетичних рівнів дефектів є складною задачею через те, що кількість експериментально виявлених переходів значно перевищує число можливих власних точкових дефектів.

Найменш дискусійним є питання про енергію іонізації між вузлового атома кадмію – $\epsilon_1 \approx E_c - 0,01$ eV, $\epsilon_2 \approx E_c - 0,2$ eV. У деяких роботах розрізняють Cd_i в оточення катіонів Cd_i^a та аніонів Cd_i^c . Тоді вказані енергії приписують Cd_i^a , а для Cd_i^c визначають енергії: $\epsilon_1 \approx E_c - 0,3$ eV, $\epsilon_2 \approx E_c - 0,6$ eV.

Для вакансії телуру у деяких роботах приписуються значення енергій іонізації, що відповідають мілкому донору. Проте всі теоретичні розрахунки, і це підтверджується у деяких експериментальних роботах, вказують на те, що ці рівні є глибокими – $\epsilon_1 \approx E_c - 0,4$ eV, $\epsilon_2 \approx E_c - 0,7$ eV.

Для антиструктурного дефекту Te_{Cd} визначено рівні $\epsilon_1 \approx E_c - 1,2$ eV, $\epsilon_2 \approx E_c - 1,6$ eV. Але ці донорні рівні ідентифікували тільки методом ЕПР. Тому варто звернути увагу на ті роботи, де донорний рівень $E_c - 0,58$ eV приписується антиструктурному дефекту. Ці дані добре узгоджуються з теоретичними розрахунками – $\epsilon_1 \approx E_c - 0,34$ eV, $\epsilon_2 \approx E_c - 0,59$ eV.

Інший антиструктурний дефект – Cd_{Te} , найімовірніше, також є донором з енергією іонізації першого та другого рівнів $\varepsilon \approx E_c - 0,1$ еВ.

Серед акцепторних дефектів найменше інформації є про міжвузловий атом телуру. У більшості робіт його вважають глибоким акцептором з енергією іонізації $\varepsilon_1 \approx E_v + 0,15$ еВ, $\varepsilon_2 \approx E_v + 0,57$ еВ.

Для вакансії кадмію, за даними різних авторів, перший рівень іонізації знаходиться на $\approx 0,06$ еВ або $\approx 0,2$ еВ вище стелі валентної зони. Другий рівень також визначений неоднозначно і становить або $E_v + 0,47$ еВ, або $E_v + 0,6-0,8$ еВ. Однак з викладеного у п.4.2. все ж таки можна зробити висновок про те, що більш вірогідними є значення $\varepsilon_1 \approx E_v + 0,06$ еВ, $\varepsilon_2 \approx E_v + 0,47$ еВ.

Зміна частот коливань атомів в околі дефекту, а також пов'язана з нею коливна ентропія найчастіше використовується як варіаційний параметр моделі, що ускладнює визначення реальних значень ω/ω_0 та S^{vb} . Але, як видно з табл. 8, все ж існує певна відповідність між параметрами отриманими у різних роботах. Зокрема, вказано, що утворення антиструктурного дефекту Te_{Cd} зменшує частоту коливань атомів. Також характерною і прогнозованою є та закономірність, що в околі між вузлових атомів частоти коливань змінюються більше аніж в околі вакансій. Проте, числові значення все ж залежать від обраної моделі. Як видно з таблиці 8, числові значення ω/ω_0 можуть різнитися до 10 разів. Однак, варто зазначити, що вони розраховані з використанням припущення, що частоту змінюють тільки “найближчі сусіди”. Якщо ж припустити, що змінюється частота і атомів з другої координаційної сфери, то відношення ω/ω_0 приблизно буде відповідати формулі (4).

Висновки

1. Здійснено систематизацію основних типів власних точкових дефектів у кристалах CdTe (V_{Cd} , V_{Te} , Cd_i , Te_i , Te_{Cd}) за різних значень відхилення від стехіометрії.

2. Проведено аналіз літературних даних щодо енергій утворення власних точкових дефектів.

3. Встановлено найбільш ймовірну структуру енергетичних рівнів дефектів у забороненій зоні кристалів кадмій телуриду.

4. Проведено оцінку характеру зміни частот коливань атомів в околі дефектів.

Література

1. Медведева С.А. Физика и химия соединений $A^{II}B^{VI}$ / С.А. Медведева. – М.: Мир, 1970.
2. Nobel D. Phase equilibria and semiconducting properties of cadmium telluride / D. Nobel // Phil. Res. Repts. – 1959. – V.14. – P. 361-492.
3. Иванов Ю.М. Область гомогенности теллурида кадмия / Ю.М. Иванов, В.А. Лейбов, А.В. Ванюков // Рефераты, доклады и сообщения XII Менделеевского съезда по общей и прикладной химии. – М.: Наука, 1981. – Т.1. – С. 50-51.

4. Медведев С.А. Собственные точечные дефекты в нелегированном теллуриде кадмия / С.А. Медведев, В.Н. Мартынов, С.П. Кобелева // Кристаллография. – 1983. – Т.28. – №3. – С. 556-561.
5. Мартынов В.Н. О возможности существования антиструктурных дефектов в нелегированном теллуриде кадмия / В.Н. Мартынов, С.П. Кобелева // Кристаллография. – 1983. – Т. 28. – № 2. – С. 394.
6. Глазов В.М. Область гомогенности на основе теллурида кадмия в системе кадмий-теллур / В.М. Глазов, Л.М. Павлова // Неорганические материалы. – 1994. – Т. 30. – № 5. – С. 629-634.
7. Greenberg J.H. P-T-X phase equilibrium and vapor pressure scanning of non-stoichiometry in the CdTe system / J.H. Greenberg // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 2003. – V. 47. – P. 196-238.
8. Grill R. Point defects and diffusion in cadmium telluride / R. Grill, A. Zappettini // Progress in crystal growth and characterization of materials. – 2004. – V. 48/49. – P. 209-244.
9. Fang R. CdTe I: solidus curve and composition-temperature-tellurium partial pressure data for Te-rich CdTe(s) from optical density measurement / R. Fang, R.F. Brebrick // J. Phys. Chem Solids. – 1996. – V. 57, № 4. – P. 440-450.
10. Brebrick R.F. CdTe II: defect chemistry / R.F. Brebrick, R. Fang // J. Phys. Chem Solids. – 1996. – V. 157. – № 4. – P. 451-460.
11. Greenberg J.H. P-T-X phase equilibrium and vapor pressure scanning of non-stoichiometry in the Cd-Zn-Te system / J.H. Greenberg // Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials. – 2003. – V. 47. – P. 196-238.
12. Greenberg J.H. Vapor pressure scanning implications of CdTe crystal growth / J.H. Greenberg // Journal of Crystal Growth. – 1999. – V. 197 – P. 406-412.
13. Vapor-phase stoichiometry and heat treatment of CdTe starting material for physical vapor transport / Ching-Hua Su, Yi-Gao Sha, S.L. Lehoczky, Hao-Chieh Liu, R. Fang, R.F. Brebrick // Journal of Crystal Growth. – 1998. – V. 183. – P. 519-524.
14. Несмеянов А.Н. Давление пара химических элементов / А.Н. Несмеянов. – М.: Изд-во АН СССР, 1961.
15. Аскеров Б.М. Электронные явления переноса в полупроводниках / Б.М. Аскеров. – М.: Наука, 1985.
16. Karazhanov S.Zh. Ab initio studies of band parameters of $A^{III}B^V$ and $A^{II}B^{VI}$ zinc-blende semiconductors / S.Zh. Karazhanov, L.C. Lew Yan Voon // ФТП. – 2005. – Т. 39. – №2. – С. 177-188.
17. Su-Hua Wei. Electronic structure of II-VI compounds and their alloys – role of cation d bands / Su-Hua Wei, A. Zunger // Journal of Crystal Growth. – 1988. – V. 86. – P. 1-7.
18. Refractive index of CdTe: Spectral and temperature dependence / P. Hlodek, J. Bok, J. Franc, R. Grill // Journal of applied physics. – 2001. – V. 90. – №. 3. – P. 1672-1674.

19. Berding M.A. Native defects in CdTe / M.A. Berding // *Phys. Rev.* – 1999. – V. 60. – № 12. – P. 8943-8950.
20. Параметры энергетического спектра электронов и дырок кубических халькогенидов кадмия и цинка / Г.П. Алиев, О.С. Кошуг, А.И. Несвижский, Р.С. Сейсян, Т.В. Язева // *ФТТ.* – 1992. – Т. 34. – № 8. – С. 3293-3299.
21. High temperature mobility of CdTe / J. Franc, R. Grill, L. Turjanska, H. Hoschl, E. Belas, P. Moravec // *Journal of Applied Physics.* – 2001. – V.89. – № 1. – P. 786-788.
22. Лугуева Н.В. Исследование влияния дефектов структуры на теплопроводность поликристаллических образцов ZnS, ZnSe, CdTe / Н.В. Лугуева, С.М. Лугуев // *Химия и компьютерное моделирование. Бутлеровские сообщения.* – 2002. – Приложение к спецвыпуску № 10. – С. 200-203.
23. High-temperature defect structure of Cd- and Te-rich CdTe / R. Grill, J. Franc, P. Höschl, I. Turkevych, E. Belas, P. Moravec, M. Fiederle, K.W. Benz // *IEEE Transactions on Nuclear Science.* – 2002. – V. 49. – №3. – P. 1270-1274.
24. Li Yujie. Point defects in CdTe / Li Yujie, Ma Guoli, Jie Wanqi // *Journal of Crystal Growth.* – 2003. – V. 256. – P. 266-275.
25. Segall B. Electrical properties of n-type CdTe / B. Segall, M.R. Lorenz, R.E. Halsted // *Phys. Rev.* – 1963. – V. 129. – № 6. – P. 2471-2481.
26. High-temperature electron and hole mobility in CdTe / I. Turkevych, R. Grill, J. Franc, E. Belas, P. Hoschl, P. Moravec // *Semicond. Sci. Technol.* – 2002. – V. 17. – P. 1064-1066.
27. Телурид кадмію і домішково-дефектні стани та детекторні властивості / Д.В. Корбутяк, С.В. Мельничук, С.В. Корбут, М.М. Борисик. – К.: Іван Федоров, 2000. – 198 с.
28. Особливості фотолюмінесценції компенсованих монокристалів CdTe:Cl (огляд) / Д.В. Корбутяк, С.Г. Крилюк, Ю.В. Крюченко, І.Д. Вапняк // *Оптоэлектроника и полупроводниковая техника.* – 2002. – Т. 37. – С. 23-40.
29. Characterization of CdTe crystals grown by the Vertical Bridgman method / M. Fiederle, A. Fauler, V. Babentsov, J. Franc, J. Konrath, M. Webel, J. Ludwig, K.W. Benz // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A.* – 2003. – V. 509. – P. 70-75.
30. Rudolph P. Fundamental studies of Bridgman growth of CdTe / P. Rudolph // *Prog. Crystal Growth and Charact.* – 1994. – V.29. – P. 275-381.
31. Cadmium zinc telluride and its use as a nuclear radiation detector material / T.E. Schlesinger, J.E. Toneyb, H. Yoonc, E.Y. Leed, B.A. Brunett, L. Franks, R.B. James / *Materials Science and Engineering.* – 2001. – V. 32. – P. 103-189.
32. Attempts to growth of undoped CdTe single crystals with high electrical resistivity / P. Rudolph, S. Kawasaki, S. Yamashita, S. Yamamoto, Y. Usuki, Y. Konagaya, S. Matada, T. Fukuda // *Journal of Crystal Growth.* – 1996. – V. 161 – P. 28-33.
33. Rudolph P. Systematic steps towards exactly stoichiometric and uncompensated CdTe Bridgman crystals / P. Rudolph, U. Rinas, K. Jacobs // *Journal of Crystal Growth.* – 1994. – V. 138. – P. 249-254.
34. Rudolph P. Non-stoichiometry related defects at the melt growth of semiconductor compound crystals – a review / P. Rudolph // *Cryst. Res. Technol.* – 2003. – V. 38. – № 7-8. – P. 542-554.
35. Rudolph P. Basic problems of vertical Bridgman growth of CdTe / P. Rudolph, M. Mtihlberg // *Materials Science and Engineering.* – 1993. – V.16/ – P. 8-16.
36. Casting of undoped CdTe crystals with high electrical resistivity / P. Rudolph, S. Kawasaki, S. Yamashita, Y. Usuki, Y. Konagaya, S. Matada, S. Yamamoto, T. Fukuda // *Journal of Crystal Growth.* – 1995. – V.149. – P. 201-206.
37. Halsted R.E. Band edge emission properties of CdTe / R.E. Halsted, N.It. Lobenz, B. Segall B. // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1961. – V.22. – P. 109-116.
38. Deep energy levels in CdTe and CdZnTe / A. Castaldini, A. Cavallini, B. Fraboni, P. Fernandez, J. Piqueras // *Journal of Applied Physics.* – 1998. – V.83. – № 4. – P. 2121-2126.
39. Compensation and deep levels in II-VI compounds / A. Castaldini, A. Cavallini, B. Frabonia, L. Polentaa, P. Fernandezb, J. Piquerasb // *Materials Science and Engineering.* – 1996. – V. B42. – P. 302-305.
40. Smith F.T. Electrically active point defects in cadmium telluride / F.T. Smith // *Metal. Trans.* – 1970. – V.1. – № 3. – P. 617-621.
41. Zanio K.R. Characterization of foreign atoms and native defects in single crystals of cadmium telluride by high-temperature conductivity measurements / K.R. Zanio // *Applied physics letters.* – 1969. – V.15. – №8. – P. 260-262.
42. Chern S.S. The defect structure of CdTe: Hall data / S.S. Chern, H.R. Vydyanath, F.A. Kroger // *J. Phys. Chem. Solids.* – 1975. – V.14. – №1. – P. 33-43.
43. Фочук П.М. Природа домінуючих точкових дефектів у кристалах CdTe: Область насичення Cd / П.М. Фочук, О.Е. Панчук, Л.П. Щербак // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2004. – Т.5. – № 1. – С. 136-141.
44. Фочук П.М. Розрахунок констант впровадження легуючих елементів в CdTe / П.М. Фочук, О.О. Коров'янка, О.Е. Панчук // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2001. – Т.2. – №3. – С. 475-480.
45. Фреїк Д.М. Атомні дефекти та їх компенсація у чистому і легованому телуриді кадмію / Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, У.М. Писклинець // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2004. – Т.4. – № 3. – С. 547-555.
46. Фреїк Д.М. Термодинамічний n-p перехід у кристалах телуриду кадмію / Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, У.М. Писклинець // *Фізика і хімія твердого тіла.* – 2002. – Т.3. – №1. – С. 58-61.

47. Semi-Insulating CdTe with a minimized deep-level doping / R. Grill, J. Franc, I. Turkevych, P. Höschl, E. Belas, P. Moravec // *Journal of Electronic Materials*. – 2005. – V.34. – №6. – P. 939-943.
48. Preparatin semi-insulating CdTe by post growth annealing / R. Grill, J. Franc, I. Turkevych, P. Höschl, E. Belas, P. Moravec // *Proc. of SPIE*. – 2002. – V. 4784. – P. 84–92.
49. Semi-insulating CdTe with a minimum deep level doping / R. Grill, J. Franc, I. Turkevych, P. Höschl, E. Belas, P. Moravec // *Phys. Stat. Sol. (c)*. – 2005. – V.2. – №5. – P. 1489-1494.
50. Semi-Insulating Te-Saturated CdTe / R. Grill, J. Franc, I. Turkevych, P. Höschl, E. Belas, P. Moravec // *IEEE transactions on nuclear science*. – 2005. – V.52. – №5. – P. 1925-1931.
51. Galvanomagnetic Properties of CdTe Below and Above the Melting Point / R. Grill, J. Franc, I. Turkevych, P. Höschl, E. Belas, P. Moravec // *Journal of Electronic Materials*. – 2001. – V.30. – № 6. – P. 595-602.
52. Косяк В.В. Ансамбль точкових дефектів у монокристалах CdTe у випадку повної рівноваги та закалювання / В.В. Косяк, А.С. Опанасюк // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2005. – Т.6. – № 3. – С. 461-470.
53. Kosyak V.V. Calculation of Fermi level location and point defects ensemble in CdTe single crystals and thin films / V.V. Kosyak, A.S. Opanasyuk // *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*. – 2007. – V.10. – № 3. – P. 95-102.
54. Kosyak V.V. Point defects ensemble in CdTe single crystals and films in the case of full equilibrium and quenching / V.V. Kosyak, A.S. Opanasyuk, I.Yu. Protsenko // *Funkts. Mat.* – 2005. – V.12. – №4. – P. 797-806.
55. Крегер Ф. Химия несовершенных кристаллов / Ф. Крегер. – М.: Мир, 1969. – 656 с.
56. Fochuk P. The nature of point defects in CdTe / P. Fochuk, R. Grill, O. Panchuk // *J. Electron. Mater.* – 2006. – V.35. – №6. – P.1354-1359.
57. Опис процесів дефектоутворення у бездомішкових кристалах кадмій телуриду методом термодинамічних потенціалів / В.В. Прокопів, П.М. Фочук, І.В. Горічок, Є.В. Вержак // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2007. – Т.8. – № 2. – С. 380-387.
58. Вплив відхилення від стехіометрії на дефектну підсистему кристалів CdTe: Cd / Д.М. Фреїк, В.В. Прокопів, І.В. Горічок, У.М. Писклинець // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2008. – Т. 9. – № 2. – С. 270-273.
59. Mandel G. Self-Compensation-Limited Conductivity in Binary Semiconductors. I. Theory. / G. Mandel // *Phys. Rev.* – 1964. – V. 134. – № 4A. – P. A1073-A1079.
60. Mandel G. Self-Compensation-Limited Conductivity in Binary Semiconductors. III. Expected Correlation With Fundamental Parameters / G. Mandel // *Phys. Rev.* – 1964. – V. 136, №3A. – P. A826–A823.
61. Сакалас А. Точечные дефекты в полупроводниковых соединениях / А. Сакалас, З. Янушкявичюс. – Мокслас: Вильнюс, 1988. – 153 с.
62. Defect engineering in CdTe, based on the total energies of elementary defects / V. Babentsov, V. Corregidor, K. Benz, M. Fiederle, T. Feltgen,

- E. Dieguez // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*. – 2001. – V. A458. – P. 85-89.
63. Su-Huai Wei. Chemical trends of defect formation and doping limit in II-VI semiconductors: The case of CdTe / Su-Huai Wei, S.B. Zhang // *Phys. Rev.* – 2002. – V. B66. – P. 1552111–15521110.
64. Su-Huai Wei. First-Principles Study of Doping Limits of CdTe / Su-Huai Wei, S.B. Zhang // *Phys. stat. sol.* – 2002. – V. B229. – № 1. – P. 305-310.
65. Berding M.A. Electronic quasichemical formalism: Application to arsenic deactivation in silicon / M.A. Berding, A. Sher // *Phys. Rev.* – 1998. – V. B58. – №7. – P. 3853-3864.
66. Berding M.A. First-principles calculation of native defect in $Hg_{0.8}Cd_{0.2}Te$ / M.A. Berding, M. Schilfgaard, A. Sher // *Phys. Rev.* – 1994. – V. B50. – № 3. – P. 1519-1534.
67. Berding M. A. Annealing conditions for intrinsic CdTe / M.A. Berding // *Applied Physics Letters*. – 1999. – V. 74, №. 4. – P. 552–554.
68. Berding M.A. Lithium, Sodium, and Copper in $Hg_{0.78}Cd_{0.22}Te$ and CdTe-Based Substrates / M.A. Berding, A. Sher, M. Schilfgaard // *Journal of Electronic Materials*. – 1998. – V. 27. – № 6. – P. 573-578.
69. Berding M.A. Defect Modeling Studies in HgCdTe and CdTe / M.A. Berding, A. Sher, M. Schilfgaard // *Journal of Electronic Materials*. – 1995. – V. 24. – № 9. – P. 1127-1135.
70. Berding M.A. Vacancy formation energie in II-VI semiconductors / M.A. Berding, A. Sher // *J. Vac. Sci. Technol.* – 1987. – V. A5. – P.3009-3013.
71. Defects in ZnTe, CdTe and HgTe: total energie calculation / M.A. Berding, M. Schilfgaard, A.T. Paxon, A. Sher / *J. Vac. Sci. Technol.* – 1990. – V. A8. – P.1103-1107.
72. Прокопів В.В. Ентальпія утворення моновакансій у сполуках $A^{III}B^{VI}$ / В.В. Прокопів, І.В. Горічок // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2006. – Т.7. – №4. – С. 717-719.
73. Ганина Н.В. Квантово-химический метод определения энтальпии образования моновакансий в полупроводниках / Н.В. Ганина, В.А. Шмугуров, В.И. Фистуль // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2004. – Т. 5. – № 3. – С. 430-435.
74. Ганина Н.В. Квантово-химическое определения энтальпии образования моновакансий в полупроводниковых соединений $A^{III}B^V$ / Н.В. Ганина, В.А. Шмугуров, В.И. Фистуль // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2004. – Т. 6, № 1. С. 94–95.
75. Ганина Н.В. Энтальпия образования антиструктурного дефекта в соединениях $A^{III}B^V$ / Н.В. Ганина, В.А. Шмугуров, В.И. Фистуль // *Фізика і хімія твердого тіла*. – 2006. – Т. 7, № 2. – С. 271–273.
76. Vacancies in CdTe: experiment and theory / S. Lany, V. Ostheimer, H. Wolf, Th. Wichert // *Physica B*. – 2001. – V. 308-310. – P. 958-962.
77. Lany S. Density functional theory calculations establish the experimental evidence of the DX center atomic structure in CdTe / S. Lany, H. Wolf, Th. Wichert // *Phys. Rev. letters*. – 2004. – V.92. – №22. – P. 2255041–2255044.

78. Kobayashi A. Chemical trends for defect energy levels in HgCdTe / A. Kobayashi, O.F. Sankey, J.D. Dow // Phys. Rev. B. – 1982. – V.25. – №10. – P. 6367-6379.
79. Photoluminescence study of II–VI semiconductors by using radioactive ^{71}As dopants / S. Lany, J. Hamann, V. Ostheimer, H. Wolf, Th. Wichert // Physica B. – 2001. – V.302–303. – P. 114-122.
80. Kobayashi A. Deep energie levels of defects in thr wurtzite semiconductors AlN, CdS, CdSe, ZnS and ZnO / A. Kobayashi, O.F. Sankey, J.D. Dow // Phys. Rev. B. – 1983. – V.28. – №2. – P. 946-956.
81. Иванов В.С. Дифференциальная спектроскопия локальных центров в CdTe / В.С. Иванов, В.Б. Стопачинський, В.А. Чапнін // ФТП. – 1971. – Т.5. – №1. – С. 101-105.
82. Георгобиани А.Н. Физика соединений $\text{A}^{\text{II}}\text{B}^{\text{VI}}$ / А.Н. Георгобиани, М.К. Шейкман. – М.: Наука, 1986.
83. Исследование глубоких электронных состояний в текстурированных поликристаллах р-CdTe стехиометрического состава методом DLTS / Е.А. Боброва, Ю.В. Клевков, С.А. Медведев, А.Ф. Плотников // ФТП. – 2002. – Т. 36. – № 12. – С. 1426-1431.
84. Meyer B.K. F center in CdTe / B.K. Meyer // Phys. Rev. B. – 1992. – V. 46. – P. 15135-15138.
85. Meyer B.K. Native defect identification in II-VI materials / B.K. Meyer, W. Stadler // Journal of Crystal Growth. – 1996. – V.161. – P. 119-127.
86. Optical investigation of defects in CdZnTe / W. Stadler, D.M. Hofmann, H.C. Alt, T. Muschik, B.K. Meyer // Phys. Rev. B. – 1995. – V. 51. – № 16. – P. 10619-10630.
87. Compensation of CdTe by Doping With Gallium / V. Babentsov, V. Corregidor, J.L. Castaño, M. Fiederle, T. Feltgen // Cryst. Res. Technol. – 2001. – V.36. – №6. – P. 535-542.
88. Modified compensation model of CdTe / M. Fiederle, C. Eiche, M. Schwarz, K.W. Benz // J. Appl. Phys. – 1998. – V.84. – №12. – P. 6689-6692.
89. Tellurium antisites in CdZnTe / M. Chu, S. Terterian, D. Ting, C. Wang, H. Gurgenian, S. Mesropian // J. Appl. Phys. – 2001. – V.79. – №17. – P. 2728-2780.
90. Максимовский С.Н. О доминирующих точечных дефектах в CdTe / С.Н. Максимовский, С.П. Коблева // Неорганические материалы. – 1986. – V.22. – №6. – С. 922-925.
91. Defect engineering in CdTe, based on the tjtal energies of elementary defects / V. Babentsov, V. Corregidor, K. Benz, M. Fiederle, T. Feltgen, E. Dieguez // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, A. – 2001. – V.458. – P. 85-89.
92. Особенности краевой фотолюминесценции кристаллов CdTe-Cl / Н.В. Агринская, О.А. Матвеев, А.В. Никитин, В.А. Сладкова // ФТП. – 1987. – Т.21. – № 4. – С. 676-679.
93. Равновесные характеристики и низкотемпературная фотолюминесценция монокристаллов CdTe-Pb / А.В. Савицкий, О.А. Парфенюк, М.И. Илащук, А.И. Савчук // ФТП. – 2004. – Т.38. – № 5. – С. 516-521.

94. Фізичні властивості напівізолюючих монокристалів CdTe-Cl, вирошчених з газової фази / В.Д. Попович, Г.М. Григорович, Р.М. Пелещак, П.М. Ткачук // Журнал фізичних досліджень. – 2002. – Т.6. – №1. – С. 86-90.
95. Электрофизические свойства и низкотемпературная фотолюминесценция монокристаллов CdTe, легированных Si / О.А. Парфенюк, М.И. Илащук, К.С. Уляницкий, П.М. Фочук та ін.// ФТП. – 2006. – Т.40. – №2. – С. 148-152.
96. Electrical compensation in CdTe and $\text{Cd}_{0.9}\text{Zn}_{0.1}\text{Te}$ by intrinsic defects / N. Krsmanovic, K.G. Lynn, M.H. Weber, R. Tjossem // Physical review B. – 2000. – V. 62, № 24. –P. 279-282.
97. Scholz K. Investigations on the effect of contacts on p-type CdTe DLTS-measurements / K. Scholz, H. Stiens, G. Muller-Vogt // Journal of Crystal Growth. – 1999. – V.197. – P. 586.
98. Matfaing Y. Self-compensation in II-VI compounds / Y. Matfaing // Prog. Crystals Growth Charact. – 1981. – V.4. – P. 317-343.
99. Mathew X. Photo-induced current transient spectroscopic study of the traps in CdTe / X. Mathew // Solar Energy Materials & Solar Cells. – 2003. – V.76. – P. 225242.
100. Горічок І.В. Антиструктурні дефекти у кристалах CdTe:Te / І.В. Горічок // Фізика і хімія твердого тіла. – 2009. – Т.10. – №1. – С. 129-133.

Стаття поступила в редакційну колегію 28.09.2009 р.

Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Рувінським М.А.

THERMODYNAMICS OF POINT DEFECTS AND THEIR INFLUENCE ON PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF CRYSTALS CADMIUM TELLURIDE (REVIEW)

D. M. Freic, I. V. Gorichoc.

Precarpathian National University named by Vasil Stefanic;

76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57;

tel. +380 (342) 59-60-82, e-mail: goritchok@rambler.ru

The analysis of basic types own defects points is resulted in the cadmium telluride crystals and their power parameters – created energy, ionization energy, frequency change atoms vibrations in surroundings defects. It is set that difference between experimental and theoretical data is the main reason of existent vagueness during interpretation physical and chemical properties of cadmium telluride.

Key words: physical and chemical properties of telluride cadmium, crystal, point defects, energy of education, energy of ionization.

РОЛЬ ПОВЕРХНЕВИХ СТАНІВ У ПРОЦЕСАХ УТВОРЕННЯ ГРАНИЧНИХ ШАРІВ АНТИФРИКЦІЙНИХ РІДИН

П. І. Мельник¹, В. М. Крамар², І. В. Цідило³

¹Івано-Франківський університет права ім. Короля Данила Галицького; 76000, м. Івано-Франківськ, вул. Коновальця, 35;

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича; 58000, м. Чернівці, вул. Коцюбинського, 12;

³Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу; 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15

На основі уявлень про існування поверхневих станів у кристалах дається інтерпретація механізму формування граничного шару в мастильних рідинах, які використовуються для усунення сухого тертя між поверхнями деталей механізмів.

Ключові слова: рідинне тертя, граничний шар, поверхневі стани.

Роль явища електризації у процесах тертя і пов'язаного з ним зношування поверхонь пар тертя відома давно і становить предмет дослідження напрямку “трибоелектрика” [1], що активно розвивається і у даний час. Зокрема, особливий інтерес викликає вивчення ролі цього явища в умовах тертя між поверхнями деталей, наприклад, двигунів внутрішнього згорання, до вузлів яких під тиском подається мастило.

Загальною властивістю таких процесів є те, що внаслідок прокачування під тиском мастильної рідини у зазор між валом і втулкою (останній під час обертання “спливає” у втулці і навколо нього) формується захисна плівка. Її поява зменшує тертя, що пояснюється переходами від ювенільного до гідродинамічного (через проміжну фазу граничного) тертя [2]. Саме у цій фазі утворюються тонкі адсорбційні шари вуглеводневих молекул, які мають назву граничних шарів і обумовлюють різноманітні фізико-технічні ефекти на поверхнях пар тертя.

Найбільш широкий огляд властивостей граничних шарів на поверхні металів, розкриття їх впливу на процеси тертя, систематизація спостережуваних фактів та спроба їх послідовного пояснення наведені у монографії Ахматова [2]. При цьому утворення захисного граничного шару на поверхні металу пов'язується з присутністю у мастилі полярних молекул жирних кислот і пояснюється взаємодією їх карбоксильних груп з регулярно розподіленими поверхневими мікрополлями протилежних знаків (схема Герцфельда) та існуванням дисперсійних сил притягання між $C-H$ – зв'язками сусідніх паралельно розташованих ниткоподібних молекул. Існування ефективного квазікристалічного упорядкування, орієнтованих перпендикулярно до поверхні полярних молекул мастильної речовини, забезпечує експериментально спостережувані властивості граничного шару. Зокрема, це – висока опірність відносно

стискування, наявність легкого тангенціального ковзання вздовж площини розділу метиленових закінчень молекулярних шарів, утворених на кожній з поверхонь пари тертя. Наявність саме цих властивостей обумовлює істотне зменшення тертя, а тому і визначає цінність мастила як антифрикційного засобу.

Проте, як відмічалось і авторами праці [2], ряд положень такого розгляду потребує уточнень, а деякі з них виявляються зовсім непридатними. Зокрема, викликає сумнів здатність слабких дисперсійних сил вишикувати довгі молекули у паралельні ряди, створюючи квазікристалічний граничний шар із високими несучими властивостями. Крім того, непоясненим залишається факт існування залежності коефіцієнта тертя від швидкості відносного руху поверхонь, якщо ковзання граничних шарів відбувається вздовж незаряджених площин їх метиленових закінчень. Поза розглядом залишено також механізми втрати мастилом з часом своїх несучих і змащуючих властивостей.

На наш погляд, це викликано труднощами, що виникли внаслідок об'єктивного на час проведення висвітлених досліджень [2] недостатнього розуміння механізму утворення граничного шару з молекул мастильної речовини. В даний час це можна зробити на основі досліджень фізичних процесів на поверхні твердого тіла, а саме на основі концепції утворення поверхневих станів.

Порушення періодичності кристалічного потенціалу поверхнею призводить до утворення додаткових енергетичних рівнів у зонному спектрі кристалу [3, 4, 5]. В напівпровідниках і діелектриках такі рівні перебувають у забороненій зоні, отже їм відповідають локалізовані (таммівські) стани. Показано, що носії струму, перебуваючи у цих станах, виявляються локалізованими на поверхні кристалу, а тому поблизу поверхні створюється надлишкова їх концентрація, що викликає появу поверхневого електричного заряду певного знаку. Із середини кристалу поле цього заряду компенсується виникненням шару об'ємного заряду протилежного знаку; із-зовні воно залишається некомпенсованим. Таким чином, поверхня кристалу виявляється місцем розташування зв'язаних зарядів, концентрація яких визначається концентрацією поверхневих атомів, тобто становить $\approx 10^{15} \text{ см}^{-2}$. До такого ж висновку приводить і модель Шоклі, де поява поверхневих станів пов'язується з наявністю некомпенсованих зв'язків атомів поверхневого шару [3].

Аналогічною є поведінка електронної системи кристалу у приповерхневому шарі металу. Для вивчення цього питання слід знайти розв'язок стаціонарного рівняння Шредінгера, яке у одноелектронному наближенні має вигляд:

$$\left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + u_{\text{eff}}(\vec{r})\right)\varphi_i(\vec{r}) = \varepsilon_i\varphi_i(\vec{r}), \quad (1)$$

Потенціальну енергію електрона у наближенні ефективного поля можна подати у вигляді суми

$$u_{\text{eff}}(\vec{r}) = u(\vec{r}) + \int d^3r' \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 |\vec{r} - \vec{r}'|} n(\vec{r}') + u_{\text{xc}}(\vec{r}) \quad (n(\vec{r}) = \sum_i |\varphi_i(\vec{r})|^2), \quad (2)$$

члени якої враховують взаємодії електрона, що знаходиться у стані $\varphi_i(\vec{r})$, відповідно, з іонами ґратки та кулонівську і обмінну, – з рештою електронів кристалу.

Аналіз поведінки u_{eff} , як функції відстані Z від поверхні металу, показує, що електрони можуть тунелювати з об'єму кристалу назовні. Внаслідок цього при поверхні виникає подвійний електричний шар із густиною заряду

$$\rho(z) = e[n(z) - \bar{n}(z)\theta(-z)] = en_D(z), \quad (3)$$

значення якої визначається щільностями електронів n і позитивних іонів \bar{n} (тут $\theta(z)$ – функція Хевісайда). Потенціал такого шару

$$V_D(z) = \frac{e^2}{\epsilon_0} \left\{ z \int_z^\infty dz' n_D(z') - \int_z^\infty dz' z' n_D(z') \right\}, \quad (4)$$

визначений у дипольному наближенні, перешкоджає подальшій емісії електронів. Висота D потенціального бар'єру визначається величиною потенціалу дипольного шару. За умови $V_D(\infty) = 0$,

$$D \equiv V_D(\infty) - V_D(-\infty) = \frac{e^2}{\epsilon_0} \int_{-\infty}^\infty dz' z' n_D(z'). \quad (5)$$

Обмінно-кореляційний потенціал $u_{\text{xc}}(\vec{r})$ у наближенні локальної густини приводиться до вигляду:

$$u_{\text{xc}}(n(\vec{r})) = \frac{d}{dn} (n\epsilon_{\text{xc}}(n)), \quad (6)$$

де, $\epsilon_{\text{xc}}(n)$ – кореляційна енергія електронного газу. Тоді $u_{\text{eff}}(\vec{r}) = V_D(\vec{r}) + u_{\text{xc}}(\vec{r})$ також стає функцією n . Зважаючи на те, що $u_{\text{xc}}(\vec{r}) \sim -\sqrt[3]{n(\vec{r})}$ над поверхнею кристалу ($z > 0$) рівний нулю, а поблизу поверхні ($z \leq 0$) стрибком змінюється до деякого скінченного негативного значення, розв'язок рівняння (1) можна шукати відносно n . Показано [6], що у випадку простих металів щільність електронів поблизу поверхні змінюється приблизно так:

$$n(z) = \frac{\bar{n}}{2} e^{-\beta z} \theta(z) + \bar{n} \left(1 - \frac{1}{2} e^{\beta z}\right) \theta(-z), \quad (7)$$

а відповідно і

$$V_D = -\frac{e^2 \bar{n}}{\epsilon_0 \beta^2} \left[\frac{1}{2} e^{-\beta z} \theta(z) + \bar{n} \left(1 - \frac{1}{2} e^{\beta z}\right) \theta(-z) \right], \quad D = \frac{e^2 \bar{n}}{\epsilon_0 \beta^2} \quad (8)$$

(β – параметр затухання електронної щільності). Схематичні залежності цих величин від Z подано на рис. 1.

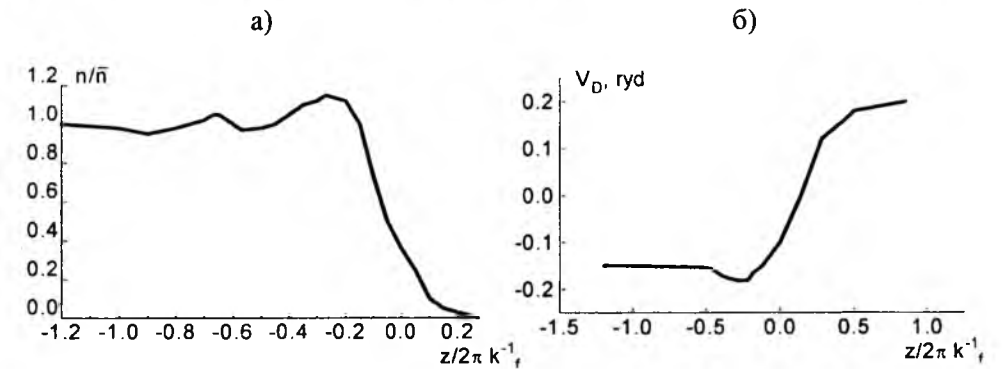


Рис. 1. Розподіл а) відношення концентрацій n/\bar{n} носіїв та б) потенціалу дипольного шару V_D у напрямку нормалі до поверхні (за даними [7,8])

Самоузгоджений розрахунок [7] величини $n(z)$ з використанням інтерполяційної формули

$$\epsilon_{\text{xc}}(n) = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 a_0} \left[-\frac{0,458}{r_s} - \frac{0,44}{r_s + 7,8} \right] \quad (9)$$

дав змогу обчислити величини електростатичного $V_D(z)$ і загального $u_{\text{eff}}(z)$ потенціалів (рис. 2), а також висоту D потенціального бар'єру: при зміні r_s від 2 до 5. Ця величина становить 7...0,5 еВ, що узгоджується з результатом напівемпіричного розрахунку [8] – 1...3 еВ при $r_s = 2...3$.

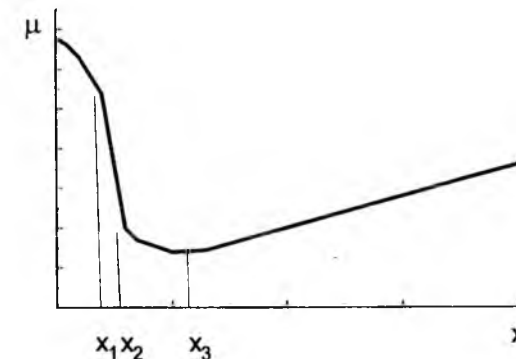


Рис. 2. Схематичний хід залежності коефіцієнта тертя μ від приведеної швидкості $x = \eta v / \rho$ (η – в'язкість, ρ – густина) [2]

Обмеження простими металами не має принципового характеру з точки зору питання, що розглядається. Воно пов'язане виключно з складностями пошуку розв'язків рівняння (1) для перехідних металів, зокрема, з непридатністю наближення локальної густини. Проте якісно поведінка електронної системи у приповерхневих шарах залишається такою ж, як і у простих металах. Підставою для такого висновку можуть бути результати, одержані у моделі ренормованого псевдоатома [9], де запропоновано альтернативний метод розрахунку електронної щільності n , придатний для будь-яких, у тому числі і для перехідних, металів.

Зокрема, для 3d- і 4d-металів розраховано величини дипольних бар'єрів, значення яких у випадку групи заліза змінюються у межах 2,5...6 eВ, що збігається з даними напівемпіричних розрахунків [9].

Аналіз поведінки електронної системи у приповерхневих шарах дає підстави стверджувати, що відповідальним за утворення граничних молекулярних шарів мастильної рідини є електричне поле, яке утворюється поверхневими станами. Негативно заряджена до потенціалу у декілька вольт поверхня на відстанях порядку розмірів молекули створює сильне електричне поле, здатне притягувати навіть електронейтральні неполярні молекули, поляризуючи їх. Внаслідок цього поверхня металу завжди вкрита шаром адсорбованих молекул, хімічно активні з яких вступають у реакцію, наприклад, окислюючи її. У цьому шарі відбувається падіння потенціалу, так що над ним поле відсутнє. Товщина шару визначається значенням його діелектричної проникності.

Оскільки молекули органічних кислот, що входять до складу технічних мастил, володіють власним дипольним моментом $\sim 1...2 D$ [2], то вони зазнають орієнтуючого впливу нескомпенсованого поля кристалічної поверхні. Якщо молекули речовини володіють дипольним моментом \vec{p} , то величина вектора поляризації \vec{P} , що визначає її діелектричні властивості, залежить від напруженості орієнтуючого поля \vec{E} за законом

$$P = NpL \left(\frac{pE}{kT} \right), \quad (10)$$

де N – кількість молекул, $L(x) = \text{cth}(x) - 1/x$ – функція Ланжевена.

У початковий період взаємодії пари тертя їх поверхні вкриті плівками оксидів, товщина і антифрикційні властивості яких надзвичайно малі. Мастильна рідина, яка не змочує окислені поверхні, не розділяє, а тому і не захищає їх при малих швидкостях відносного руху. Відбувається майже сухе тертя, яке руйнує поверхню, у тому числі і оксидну плівку. Поява ювенільних частин металічної поверхні супроводжується зростанням напруженості нескомпенсованого електричного поля \vec{E} , що спричиняє адсорбцію молекул мастильної рідини, тобто появу захисного шару, який “розводить” поверхні. Поки дія поля на полярні молекули недостатня для їх орієнтування (за малих x $L(x) \approx x/3$), адсорбують, створюючи захисну плівку, переважно неполярні молекули з наведеними дипольними моментами, оскільки для них витрати енергії на переорієнтацію не потрібні. Утворення таких плівок, що характеризуються наявністю легкого тангенціального ковзання вздовж площини розділу, полегшує відносний рух поверхонь пар тертя. Проте, внаслідок слабких несучих властивостей їх товщина, а, отже, і антифрикційна здатність, мала. Руйнуванню таких плівок сприяє процес окислення поверхні, що протікає паралельно з їх утворенням. При зростанні швидкості відносного руху пар тертя його вплив зменшується, оскільки істотно зростає площа ювенільної поверхні за рахунок, наприклад, механічного руйнування або випаровування оксидних плівок. При цьому збільшується то-

вщина захисного шару, утвореного молекулами мастила, внаслідок зростання нескомпенсованого поля \vec{E} , що призводить до подальшого зменшення тертя (ділянка $0...x_1$, рис. 2.).

Одночасно інтенсифікуються процеси створення граничних шарів з участю полярних молекул, оскільки подальше збільшення швидкості спричиняє посилення поляризації \vec{P} мастила за рахунок переважаючого орієнтування полярних молекул вздовж зростаючого поля \vec{E} . Оскільки граничні шари володіють високими антифрикційними властивостями, це пояснює подальше зменшення тертя на ділянці $x_1...x_2$ (рис. 2). У точці x_2 досягається або повне падіння поверхневого потенціалу у граничному шарі, або насичення орієнтаційної поляризації (за великих x $L(x) = 1$), яка тепер визначається тільки концентрацією N полярних молекул та величиною їх дипольного моменту \vec{p} :

$$P = Np. \quad (11)$$

У першому випадку подальше збільшення швидкості супроводжується виразним гідродинамічним (за законом Ньютона) зростанням тертя (ділянка правіше точки x_3).

У другому випадку подальше збільшення швидкості може мати (як результат зростання нескомпенсованого поля \vec{E}) один із двох наслідків: 1) адсорбцію на поверхні граничного шару неполярних молекул, 2) руйнування сильним полем зв'язків карбоксильних груп молекул типу карбонової чи метиленових груп молекул типу масляної кислоти.

Перше значно покращить змащувальні властивості покриття, оскільки плівка з неполярних молекул характеризується малим коефіцієнтом тертя ковзання (спадна ділянка правіше x_2) з подальшим зростанням ролі гідродинамічного тертя. У другому варіанті деструкція карбоксильних чи метиленових ланцюгів органічних молекул з подальшим насиченням розірваних зв'язків розчиненим у мастилі киснем призводить до появи молекул менших розмірів, які можуть мати власний дипольний момент \vec{p} , більший, ніж у материнської молекули. Наприклад, для молекул масляної ($C_4H_8O_2$) і оцтової ($C_2H_4O_2$) кислот ці величини становлять відповідно 0,93 і 1,73 D . У цьому випадку згідно (10) ступінь орієнтаційної поляризації, здатної повністю компенсувати поле \vec{E} , досягається за меншої кількості молекул, що еквівалентне зменшенню товщини граничного шару, тобто спричинить погіршення антифрикційних властивостей мастила. Очевидно, тривалість терміну експлуатації технічних мастил лімітуються інтенсивністю незворотних процесів саме такого типу, про що свідчать дані про наявність кореляції між величиною граничного тертя і вмістом атомів вуглецю у молекулах мастила [2].

Література

1. Постников С.Н. Электрические явления при резании и трении / С.Н. Постников. – Горький: Волго-Вятское кн. издательство, 1975. – 280 с.
2. Ахматов А.С. Молекулярная физика граничного трения / А.С. Ахматов. – М.: Физматгиз, 1963. – 472 с.
3. Электронные явления на поверхности полупроводников / под ред. В.И. Ляшенко. – К.: Наук. думка, 1968. – 400 с.
4. Киселев В.Ф. Поверхностные явления в полупроводниках и диэлектриках / В.Ф. Киселев. – М.: Наука, 1970. – 399 с.
5. Дэвисон С. Поверхностные (гаммовские) состояния / С. Дэвисон, Дж. Левин. – М.: Мир, 1973. – 231 с.
6. Lang N.D. Theory of Metal Surfaces: Charge Density and Surface Energy / N.D. Lang, W. Kohn // Phys. Rev. – 1970. – №1(12). – P. 4555-4568.
7. Lang N.D. Theory of Metal Surfaces: Work Function / N.D. Lang, W. Kohn // Phys. Rev. – 1971. – №3(4). – P. 1215-1223.
8. Heine V. Theory of the surface dipole on nontransition metals / V. Heine, C.H. Hodges // J. Phys. C: Solid State Phys. – 1972. – №5(2). – P. 2845-2852.
9. Taut M. Surface Dipole Barrier of Metals / M. Taut, H. Eschrig, M. Schubert, // Phys. Stat. Sol. – 1980. – №100(1). – P. 243-250.

*Стаття поступила в редакційну колегію 12.10.2009 р.
Рекомендовано до друку д.х.н., професором Фреїком Д.М.*

ROLE OF THE SUPERFICIAL CONSISTING OF PROCESSES OF FORMATION OF MAXIMUM LAYERS OF ANTIFRICTSIYNIH LIQUIDS

P. I. Melnyc¹, V. M. Cramar², I. V. Tsidylo³

¹*Ivano-Frankivsk university of law named by King Danylo Galitsky;
76000, Ivano-Frankivsk, Conovalets' street, 35;*

²*Chernivtsy national university named by George Fedcovich;
58000, Chernivtsy, Cotsyobinsky street, 12;*

³*Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka street, 15*

On the basis of performances about existence of surface states in chips is given interpretation of the gear of formation of a limiting seam in lubricating liquids, which one will be used for elimination of dry friction between surfaces of parts of gears.

Key words: *liquid friction, maximum layer, superficial being.*

МОДЕРНІЗАЦІЯ МЕТОДІВ РАСТРОВОЇ ЕЛЕКТРОННОЇ МІКРОСКОПІЇ ДЛЯ ЕЛЕКТРОФІЗИЧНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ТА ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ПОГОННИХ ОПОРІВ, ІНДУКТИВНОСТЕЙ І ЄМНОСТЕЙ БАГАТОРІВНЕВОЇ РОЗВОДКИ СУБМІКРОННИХ СТРУКТУР ВЕЛИКИХ ІНТЕГРАЛЬНИХ СХЕМ

Р. Б. Атаманюк

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
76000, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57;
e-mail: roman_atamanjuk@mail.ru*

Основна тенденція сучасної мікроелектроніки – зменшення розмірів елементів структур ВІС до субмікронних топологічних розмірів, тобто перехід до наноелектроніки – до структур та елементів з розмірами нанометрів. Растрова електронна мікроскопія залишається основним діагностичним методом, який використовується на всіх етапах розробки і виготовлення субмікронних структур. РЕМ дозволяє вимірювати поверхневі структури з високою роздільною здатністю 2·10⁻³-2·10⁻² мкм, спостерігати топографічні та композиційні неоднорідності з просторовою роздільною здатністю 5·10⁻² мкм, визначати характеристики і дефекти субмікронних р-п- переходів з локальністю 5·10⁻² мкм на глибині, меншій за 1 мкм. Величина контактів метал / напівпровідник залежить від різних параметрів самої системи: робіт випадку, поверхневої концентрації легуючої домішки, типу провідності Si-підкладок, чистоти поверхні Si-пластин перед осадженням металу.

Для субмікронної технології пропонуються як нові матеріали і технології, так і нові контактні структури, які успішно розв'язують проблему зниження контактної опору, а також проблему мінімізації утворення хілоків, які практично визначають корозійну стійкість металізації.

Ключові слова: *мікроелектроніка, субмікронні структури великих інтегральних схем, субмікронні технології, погонний опір, індуктивність, ємність.*

1. Модернізація методів РЕМ

Дослідження структури твердого тіла в РЕМ проводиться в трьох режимах: у відбитих електронах, у вторинних електронах, в режимі наведеного струму. Енергія пружно відбитих електронів є близькою до енергії первинних електронів. Вже за енергії 20 кеВ глибина виходу відбитих електронів складає 200-2000 нм залежно від матеріалу взірця. Тобто, пружно відбиті електрони характеризують найглибші шари.

Енергія вторинних електронів, зазвичай, не перевищує 50 еВ. Тому глибина таких електронів невелика і дорівнює 2-5 нм. Тому зображення

технологічного шару у вторинних електронах дає інформацію про стан при поверхневого шару. Тут необхідно зауважити одну різницю в зображеннях, одержаних у вторинних і пружно відбитих електронах. У режимі вторинних електронів нерівності на поверхні взірця не дають тіні і зображення спостерігається в напрямі первинного пучка. А в режимі відбитих електронів поверхня взірця освітлюється джерелом, розміщеним на місці колектора електронів, тому на зображенні спостерігаються тіні.

У режимі наведеного струму електронний промінь створює в об'ємі твердого тіла (структури) електронно-діркові пари, які розділюються полем в області просторового заряду (ОПЗ), що веде до появи електричного струму. Тому спостереження в режимі наведеного струму дають змогу виявляти структурні неоднорідності та розподіл електронного потенціалу в області контакту.

Із розвитком субмікронної технології ВІС зростає значення нових методів, що дає змогу відновлювати тримірний розподіл з високим просторовим розділенням, особливо зростає роль цих методів на етапі розробки субмікронних структур та їх електрофізичного діагностування. Для створення моделі формування сигналів електронного пучка під час його взаємодії із структурою важливо одержати кількісну інформацію про глибину залягання функціональних шарів та мікронеоднорідностей, а також інформацію про розсіювання електронів пучка при різних прискорюючих напругах на модельних взірцях, структура яких відома. Тут же необхідно розв'язати обернену задачу: як за контрастом зображення методами томографії відновити переріз такої об'ємної структури.

Розглянемо спочатку непружне розсіювання електронів. За виключенням відбивання електронів всі інші явища, що виникають під час взаємодії пучка електронів з твердою мішенню викликаються непружним розсіюванням. Якщо непружне розсіювання проходить при взаємодії електронів з ядрами атомів, то проникаючи в матеріал структури електрони втрачають енергію в кулонівському полі ядра і генерують тормозне випромінювання, яке називають неперервним рентгенівським випромінюванням. Якщо мають місце непружні співударі між слабкозв'язаними зовнішніми електронами і електронами падаючого пучка, то електрони пучка втрачають свою енергію, а слабкозв'язані зовнішні електрони емітуються. Їх ще називають вторинними, бо вони володіють енергією, меншою за 50 еВ. Якщо вторинні електрони виникають поблизу поверхні, то їх енергія буде більшою за енергію поверхневого бар'єру, яка дорівнює 2-6 еВ. Тому з'являється велика ймовірність того, що вторинні електрони покинуть поверхню. Проте вторинні електрони сильно поглинаються, і якщо вони виникають на глибині, більшій за 100 ангстрем від поверхні взірця, то ймовірність їх виходу із взірця стає дуже малою (нульовою). Якщо вторинні електрони рекомбінують з дірками, які утворюються в деяких матеріалах в процесі розсіювання електронів, то виникають фотони з довжиною хвилі, яка лежить у видимій та інфрачервоній областях спектра. Інколи услід за випусканням електронів процес деіонізації може викликати випускання другого електрона, який називається

вається Оже-електроном, вже без емісії рентгенівського кванта енергії.

Багатократне розсіювання може призводити до значної зміни траєкторії падаючого пучка. Електрони пучка можуть змінювати декілька разів напрям руху, повертаючись до поверхні, та покидати структуру. Такий процес називається відбиванням електронів. Відбиті електрони покидають мішень-структуру з енергією, яка є вже меншою за енергію первинних електронів внаслідок непружних процесів. На деякій глибині мішені первинний напрям електронного пучка втрачається і електрони дифузійно поширюються в мішені випадковим чином. Для взірців з низьким атомним номером більшість електронів встигає проникнути глибоко в мішень, перш ніж напрям зміниться на кут, більший за 90 градусів, і тому поглинається взірцем. Але у взірці з великим атомним номером спостерігається значне розсіювання поблизу поверхні, і більша частина падаючих електронів відбивається.

Відбиті електрони виникають під час актів однократного пружного розсіювання під великими кутами (більше 90 градусів) і актів багатократного малокутового пружного розсіювання.

Повний розподіл вторинних електронів за енергією утворює три групи електронів. Першу групу складають пружно відбиті електрони з енергією близькою до енергії первинного пучка. Друга група включає в себе електрони, які мали багатократне розсіювання і були відбиті, коли пройшли крізь товстий шар мішені. Третя група електронів володіє енергією меншою за 50 еВ з максимумом в декілька електронвольт. Такі вторинні електрони з найнижчою енергією використовуються в РЕМ для одержання зображення топографії поверхні мішені. Контраст зображення у вторинних електронах одержується внаслідок зміни кількості вторинних електронів і їх траєкторій при переході від однієї точки поверхні до іншої в залежності від структури поверхні мішені.

Енергія рентгенівських квантів, що утворюються за рахунок непружного розсіювання падаючих електронів на ядрах атомів, може набувати різних значень – аж до значень енергії падаючого пучка E_0 .

Розглянемо механізм утворення Оже-електронів. Коли електрон або рентгенівські промені бомбують взірць-структуру та іонізують атом, то у внутрішніх електронних оболонках утворюються вакансії. Збуджений атом перебудовується і переходить в незбуджений стан шляхом заповнення вакансії електроном оболонки з меншою енергією зв'язку, і в результаті такого переходу виділяється енергія. Проте не вся ця енергія реалізується у вигляді рентгенівських квантів. Деяка частина енергії виділяється за рахунок емісії електрона з певною енергією згідно ефекту Оже. Енергія рентгенівського кванта або Оже-електрона є характеристичною для елемента, що його випускає.

Оскільки Оже-електронний аналіз проводиться на глибині структури меншій за 10 ангстрем, то він дуже чутливий до поверхневих дефектів і домішок. Отже для забезпечення високочутливої Оже-спектроскопії її проводять у вакуумі під тиском. Даний метод надзвичайно ефективний для контролю плазмо-хімічних процесів травлення суб-

мікронних структур.

В РЕМ не існує жодних променів, які спрямовані від об'єкта до зображення. Зображення в РЕМ є абстрактним, це просто результат відображення. Таке зображення є моделлю об'єкта, віртуальним образом.

Для дослідження процесу формування контрасту зображення, розглянемо обробку сигналів детекторами. Найбільш широко в РЕМ використовується детектор типу сцинтилятор-фотопомножувач, який називають детектором Еверхарта-Торілі. Він є зручною системою для вивчення структур як у вторинних, так і відбитих електронах.

Розглянемо формування контрасту зображення у РЕМ. Контраст визначається такими чинниками:

1) **Контраст залежить від атомного номера елементів.** Коефіцієнт відбиття електронів збільшується із збільшенням атомного номера елементів, тому на зображенні багатофазного об'єкта, сформованого у відбитих електронах, ми вже побачимо області з великим сигналом, що відповідають найбільшому атомному номеру, і області з малим сигналом, що відповідають найменшому атомному номеру. Області з проміжними значеннями атомних номерів створюють сигнали проміжних рівнів. Під час реєстрації сигналу на екрані ЕПТ ми підбираємо підсилення таким чином, щоб елемент з найвищим атомним номером виглядав на екрані білим, а з найнижчим атомним номером – чорним. Відповідно, проміжні значення дадуть різний градієнт сірого кольору. Тобто ми використовуємо у цьому випадку весь динамічний діапазон кольору ЕПТ.

2) **Топографічний контраст** одержуємо за рахунок впливу топографії як на відбиті, так і на вторинні електрони. Встановлено, що якщо плаский взірець нахилиється в бік нормального положення до падаючого пучка, то коефіцієнт його відбиття різко зростає. Це і зумовлює топографічний контраст у відбитих електронах. Його можна одержати також і у вторинних електронах за рахунок спрямування детектора (наприклад Е-Т), який забезпечує збір електронів, які спрямовуються до детектора і дають вклад в сигнал.

Дослідженнями встановлено, що коефіцієнт вторинної емісії суттєво зростає із збільшенням кута нахилу.

3) **Вольтовий контраст.** Траєкторія вторинних електронів, що володіють енергією $0 < E < 50$ еВ, свідчить, що вони є чутливими до впливу поверхневого потенціалу і градієнтів електричного поля поблизу поверхні взірця. Це поле певним чином впливає на вторинну емісію електронів. Наприклад, на структурі інтегральної схеми, де деякі області знаходяться під більш від'ємним потенціалом, ніж решта, ми побачимо від'ємно заряджені області в світлому контрасті порівняно з областями, які знаходяться під позитивним потенціалом, оскільки більша частина вторинних елементів потрапить на детектор саме з від'ємно заряджених областей. Тому такий контраст називають ще вольтовим (потенціальним) контрастом.

4) **Контраст наведеного струму.** Якщо р-п – перехід структури ВІС розміщений в безпосередній близькості від сфокусованого електро-

нного пучка, то падаючі електрони створюють надлишкові електронно-діркові пари або носії зарядів. Поле р-п - переходу збирає ці носії заряду в процесі їх дифузії у взірці. Таким чином, наведений струм може створюватись у зовнішньому полі, в яке входить р-п – перехід. Сигнал цього струму можна використати для створення відеосигналу в РЕМ. Оскільки дифузія домішок р- або п – типу в Si призводить до появи сильної пластичної деформації ґратки, то поблизу р-п – переходів виникають дислокації. Саме метод наведеного струму може бути використаний для одержання зображень таких дислокацій, а контраст такого зображення зв'язаний з рівнем рекомбінації надлишкових носіїв, створених електронним пучком. Цей метод несе інформацію про дифузійні довжини і час життя згенерованих електронним пучком, носіїв заряду.

Розглянемо методи РЕМ в діагностуванні структур ВІС. У режимі відбитих електронів (ВЕ) можна одержати зображення глибинних шарів з латеральним розділенням порядку 0,25 мкм. Під час відновлення об'ємної мікроструктури доцільно враховувати і детектувати тільки ті обернено розсіяні електрони, які втратили під час руху всередині структури малу частину своєї енергії. Це дає підвищений контраст зображення (майже в 2-2,5 рази). Це пояснюється тим, що найбільш суттєва різниця енергетичного розподілу ВЕ характерна для елементів з різними атомними номерами Z і саме припадає на енергії 0,9-0,95Е (E_0 – енергія первинних електронів).

У зв'язку з розвитком виробництва ВІС особливої актуальності набуває тестування цих структур за допомогою РЕМ в режимі вольтового контрасту. При цьому для оперативності вимірювань до систем детектування потенціального контрасту накладаються підвищені вимоги на швидкодію і якість контрасту.

Потенційно високими можливостями для вирішення питання візуалізації теплових мікронеоднорідностей та їх електрофізичної діагностики має метод растрової електронно-акустичної мікроскопії (РЕАМ). Розглянемо фізичні основи даного методу. Скануючий взірець сфокусований електронний пучок модулюється за інтенсивністю в широкому спектрі частот 0,01-100 мГц. Періодично нагрівання локальної області р-п-переходу чи всієї області виникає внаслідок поглинання енергії електронів, і є джерелом теплових хвиль, які поширюються в глибину і експоненційно затухають на довжині дифузії тепла. Теплові хвилі можуть відбиватися і розсіюватися на теплових неоднорідностях та дефектах, створюючи умови для їх візуалізації. В наближенні одновимірної теплової моделі визначає ефективний розмір області, де відбувається розсіювання теплових хвиль, та роздільну здатність самого методу. Реєстрація теплових хвиль може бути реалізована шляхом вимірювання температури різними існуючими методами. Інший спосіб полягає в детектуванні теплових хвиль, використовуючи термоакустичний сигнал, який виникає завжди в матеріалі з ненульовим коефіцієнтом теплового розширення за допомогою п'єзоелектричного перетворювача.

Модуляція інтенсивності електронного пучка здійснюється за допомогою ємнісного модулятора. Як детектор термоакустичних хвиль використовується п'єзоелектричний сенсор із термочутливого матеріалу, і закріплений на зворотній стороні структури-взірця. Приймання та підсилення електричного сигналу від детектора здійснюється селективним підсилювачем або двоканальним синхронним детектором.

РЕМ у режимі наведеного струму може бути також використаний для електрофізичного діагностування розподілу напруженості електричного поля у високовольтних транзисторах або потужних вихідних каскадах ІС (КР1021ХАВ), які можуть працювати в режимі лавинного розмноження.

Наведений струм, що збуджується електронним пучком в заданій точці структури, є пропорційним швидкості генерації електронно-діркових пар і пов'язаний з розподілом електричного поля на шляху прольоту електронів і дірок. У сильних електричних полях, в режимі лавинного помноження наведений струм суттєво залежить від просторової неоднорідності електричного поля в області дрейфу. Тобто вимірювання АС вздовж площини р-п-переходу або в перпендикулярному напрямі, дає змогу в режимі передлавинного помноження носіїв контролювати однорідність розподілу електричного поля в локальних областях потужної структури ВІС.

Висока чутливість методів відбитої електронної мікроскопії до структури приповерхневих шарів призводить до того, що контраст від реальної поверхні визначається плівкою поверхневого природного оксиду та різних поверхневих забруднень. Для вивчення кристалічної структури поверхні необхідно її одержати та зберігати атомарно чистою в процесі спостереження чи дослідження. В методі ВЕМ такі умови забезпечуються шляхом створення надвисокого вакууму поблизу поверхні взірця-структури за допомогою пристрою диференціальної криогенного відкачування, вмонтованого в колону електронного мікроскопа з безперервною і безмасляною системою відкачування мікроскопа адсорбційним насосом. Даний пристрій дає змогу нагрівати взірець шляхом пропускання електричного струму крізь кристал; забезпечує обертання кристалу в брегівській та азимутальній площинах і його шлюзування без порушення вакууму в колоні; забезпечує напилення різних речовин на досліджуваній зразок; вимірювання інтенсивності дифракційних пучків за допомогою детектора електронів; аналіз газового середовища у вакуумній камері за допомогою мас-спектрометра.

За допомогою методу Оже-спектроскопії проведено дослідження процесів взаємодії основних конструктивних матеріалів структур ВІС (моно- і полікристалічного кремнію, діоксиду, нітриду кремнію та силіциду кремнію) з плазмою найбільш використовуваних фреонів: хладону-14, хладону-218 і хладону-23. Всі експериментальні роботи проводилися на установках плазмохімічного травлення 08 ПХО-100 Т-004,005,006. Аналіз елементного складу поверхні пластин чи функціонального шару проводився на Оже-спектрометрі 09ОКС-10-005.

Розглянемо метод РЕМ для еліонної літографії під час формування субмікронних структур ВІС. Для створення субмікронних розмірів елементів, менших за 0,25 мкм, необхідно переходити до інших методів експонування резистів, використовуючи коротші хвилі опромінення (менші 250 нм), наприклад, електронні пучки, або рентгенівські кванти. Ці методи об'єднуються під загальною назвою еліонної літографії. Еліонна літографія дає змогу розширити межі фотолітографічного процесу за рахунок високої роздільної здатності. Експонування при електронно-променевої літографії здійснюється електронно-променевою установкою. До її складу входять електронно-оптична колона, система управління променем, пристрої вводу та обробки даних, інтерфейс.

Топологія структури ВІС, зазвичай, складається із прямокутників, тому такий рисунок легше сформуванати електронним променем з квадратним перерізом. Квадратна апаратура для цього вмонтована в першу лінзу.

Переміщення променя здійснюється системою растрового сканування за допомогою магнітного та електричного полів. Електронний промінь фокусується на поверхні взірця двома або більше лінзами, тому його розмір можна регулювати зміною фокусних відстаней електронних лінз. Як еміттер електронів у джерелі використовується катод із гексабориду лантану, який забезпечує густину потоку 300 А/см² в тілесному куті 10⁻² рад. Відхиляюча система здійснює електромагнітне відхилення електронного пучка з кроком 0,025, 0,125 або 0,25 мкм при максимальному розмірі сканування 5x5 мм або 10x10 мм. Технологічний процес ЕПЛ є аналогічним звичайній проєкційній літографії. Тільки експонування ультрафіолетовим світлом замінюється на електронний промінь. Особливість ЕПЛ полягає в техніці експонування, природі електронного резиста, та методах травлення. Тому існує певне співвідношення між часом викреслювання рисунка структури та необхідною чутливістю резиста.

Висновки до п. 1

Перевага модернізованих методів електрофізичного діагностування полягає в наступному:

1. Електронно-зондова система і поточковий принцип формування зображення є більш гнучкими в технологічному плані, ніж традиційна оптична система звичайного електронного мікроскопа. Відсутність відображуючої оптики за об'єктом і наявність детекторів різних сигналів дає змогу одержати важливу інформацію на діагностичному рівні про структуру ВІС ще на стадії їх формування з високою точністю та чутливістю. Унікальність такого електрофізичного діагностування полягає в растровому режимі електронного мікроскопа.

2. У режимі вторинної електронної емісії, що найбільш широко використовується в РЕМ, реалізується велика глибина фокуса, що на два-три порядки вища, ніж в оптичного мікроскопа. Оригінальним в цьому плані є вольтів контраст, який дозволяє розглянути топологію структури ВІС в динамічному режимі та виявити слабкі топологічні розв'язки.

3. РЕМ дає змогу спостерігати контраст магнітних, електричних та теплових полів. Вивчення розподілу потенціалів та їх локальне вимірю-

вання є дуже важливим під час оцінювання надійності розробленої топології. Особливо актуальним в даному випадку є електрофізичне діагностування перегріву р-п-переходів в структурах ВІС та можливість через виявлені теплові поля визначати та прогнозувати тепловий опір структури кристалів.

4. РЕМ став головним фізичним інструментом як в електрофізичному діагностуванні функціональних шарів структур ВІС, так і в електронній еліонній літографії для розпізнавання і відтворення субмікронних та наномікронних топологічних розмірів.

2. Шляхи зниження погонних опорів, індуктивностей і ємностей

Наведені результати комплексних досліджень, які дозволяють створення оптимальних технологічних методів і способів одержання високочистих плівок для формування багаторівневої розводки в структурах субмікронних розмірів, а також реагентів (матеріалів) та сплавів і мішеней для виконання низькорезистивних міжз'єднань, електродів, затворів та низькоомних контактів елементів ВІС. Визначені фізико-хімічні умови формування поліцидних (силіцидних) та металевих шарів з електрофізичними параметрами, що задовольняють вимоги субмікронних структур ВІС. Визначені умови формування поліцидів тугоплавких металів для багаторівневих міжз'єднань. Показано, що параметри отриманих шарів відповідають вимогам, які висуваються до конструкцій, елементів мікроелектроніки субмікронних топологічних розмірів за питомим контактним опором та струмом втрат і заряду в затворній системі [6, 7, 8].

Спершу визначимо основні вимоги до металізації першого рівня:

- а) забезпечення низькоомного перехідного опору до п- і р- Si;
- б) відсутність чинників, що спричинюють дефектність міжшарової ізоляції.
- в) відсутність взаємодії з підзатворним діелектриком.
- г) малий питомий та погонний опір і погонна ємність, які визначають швидкодію.
- д) забезпечення висококонтрастної літографії.

До другого і наступних рівнів розводки ці вимоги такі:

- забезпечення надійного омичного контакту з металізацією першого рівня в контактних вікнах малого розміру і площі;
- відсутність взаємодії із міжшаровим діелектриком;
- малі значення погонних опорів та ємності.

Як доповнення до алюмінію та легovanого полікремнію при формуванні структур ВІС широко використовують тугоплавкі метали та їх силіциди (поліциди) [10, 11, 12].

Чистий алюміній використовувався для одержання контактів до кремнію і для формування розводки структур ВІС з топологічними розмірами більшими за 2 мкм. Такі алюмінієві плівки осаджувалися шляхом напилення у вакуумі. Після формування топологічного рисунка фотолітографією з високою роздільною здатністю і відпалу Si-підкладок, металізованих алюмінієм, за температури в межах 450-500°C протягом

15-30 хвилин в азотній атмосфері, опір алюмінієвих плівок був на 5-10 % більшим, ніж його об'ємний опір (2,7 мкОм·см). Опір конкретного контакту R_c , який визначається як обернена величина похідної густини струму у відповідності з напругою, зазвичай набував значень порядку $(1-10)^{-6}$ Ом·см².

Величина контактів метал/напівпровідник залежить від різних параметрів самої системи: робіт випадку, поверхневої концентрації легуючої домішки, типу провідності Si-підкладок, чистоти поверхні Si-пластин перед осадженням металу. Для рівнів легування понад 10^{18} см⁻³ ширина бар'єру Шоттки збільшується, і ефекти тунелювання стають також значимими. У цьому випадку перенесення заряду стає домінуючим за рахунок тунелювання, а опір конкретного контакту R_c швидко зростає з ростом ступеня легування, більшого за 10^{19} см⁻³. Омичні контакти алюмінію до сильно легованих Si-підкладок для р-типів і п-типів можна дещо покращити, використовуючи реакцію алюмінію на розчеплення діоксиду кремнію.

У процесі металізації субмікронних схем, алюмінієві плівки мають ряд обмежень, які визначаються як властивостями металу, так і методом його осадження. Під час впалювання контактів невелика кількість кремнію, яка поступає із Si-підкладки, розчиняється в алюмінії, створюючи при цьому пірамідальні ямки розчинення. Розчинність кремнію в алюмінії за температури впалювання 450°C складає 2,6-1%. Кількість розчиненого кремнію залежить як від температури впалювання, так і від об'єму алюмінію, який необхідно наситити кремнієм. Наприклад, за $T = 500^\circ\text{C}$ протягом 30 хв. товщина спожитого кремнію дорівнює 0,3 мкм для контактної площадки площею 16 мкм² та алюмінієвої доріжки з перерізом 1x2 мкм², які одержані в результаті проплавлення р-п-переходів глибиною 0,3 мкм. Кремнієва ерозія не проходить рівномірно в контактах, а відбувається локально, змінюючи реакцію алюмінію на межі розділу Si-SiO₂. Розчинений Si може частково випасти в процесі охолодження Si-пластин. Такі Al-виступи (хіллони) або Si-ямки можуть мати висоту і глибину до 1 мкм. В кремнієвих підкладках з орієнтацією (111) такі Al-виступи рухаються вздовж поверхні і мають нижню пласку частину, тоді як в Si-підкладках орієнтації (100) вони рухаються перпендикулярно до поверхні і зв'язані з площинами (111). Утворення таких хіллонів відбувається переважно в місцях знаходження локальних областей SiO₂, де напруження, які виникають в Si, вже призводять до підсилення розчинення Si в алюмінії протягом процесу впалювання контактів.

Ерозія або Si-ямка рухається горизонтально і після видалення алюмінію вже можна побачити Si-ямки на поверхні контактів, які мають трикутну або шестикутну форми на поверхні Si з орієнтацією (111) та прямокутну форму на Si-підкладках з орієнтацією (100). Такі Si-ямки збільшуються в міру зменшення розмірів контактної вікна і тим самим визначають жорсткі обмеження на співвідношення глибини залягання р-п-переходу та розміру контактної вікна, а саме $X_j \gg 4,7d^{0,8}$ (X_j -глибина р-п-переходу, d – розмір контактної вікна).

Для того, щоб зменшити розчинення Si в Al-плівках використовують алюмінієві сплави, наприклад АК-1, додаючи їх в алюміній кремнію 1%. Зміна опору таких легованих кремнієм алюмінієвих плівок є незначною: на кожний % доданого кремнію об'ємний опір плівки збільшується на 0,7 мкОм·см. Використання Al-Si-сплавів пропонується як альтернатива для зменшення Al-хіллонів, які призводять до проколів р-п-переходів.

Введення 1% Si в Al-плівку знижує швидкість росту хіллонів, але при охолодженні Si-пластин після впалювання контактів кремній осаджується в контактних вікнах, спричиняючи ріст перехідного контактного опору [5], особливо для $\frac{Al}{n} + Si$ -контактів.

Для інтегральних схем з контактними вікнами більшими за 2×2 мкм, і глибиною р-п-переходів більшою за 0,35 мкм структура АК-1/Si контакт не вносить технологічних ускладнень, оскільки за концентрацій легуючої домішки в контакті 10^{19} - 10^{20} см⁻² питомий опір контакту дорівнює 10^{-6} Ом/см², а величина перехідного контактного опору не перевищує 10 Ом. Проте із ростом ступеня інтеграції, зокрема, при переході в субмікронний топологічний діапазон розмірів, коли розміри контактних вікон стають меншими за 1×1 мкм, то перехідний контактний опір збільшується до 100 Ом.

Для придушення ефекту росту хіллоків в алюмінієву металізацію як легуючу добавку вводять титан. Титан дає добрий омичний контакт до сильно легованих областей кремнію р- та n-типів і як бар'єрний шар забезпечує відсутність дрібних р-п-переходів до температури впалювання $T \leq 475^\circ\text{C}$. Крім того, титан мало взаємодіє з міжшаровим діелектриком ФСС чи SiO₂ і виключає міжрівневі закорочування.

На рис. 1 (а і б) для порівняння представлені електронно-мікроскопічні рельєфи поверхні плівки чистого Al після його впалювання за $T = 475^\circ\text{C}$ і поверхні плівки Al, легованої Ti з концентрацією (2 %) після такого ж впалювання (20000 кратне збільшення). Із поданих мікрорельєфів видно, що висота таких хіллоків зменшується від 0,6-0,7 мкм до величини, меншої за 0,1 мкм. Крім того, структура самої легованої титаном алюмінієвої плівки стає дрібнозернистою, що уможливило забезпечення кроку металізації на рівні 2,5-3 мкм.

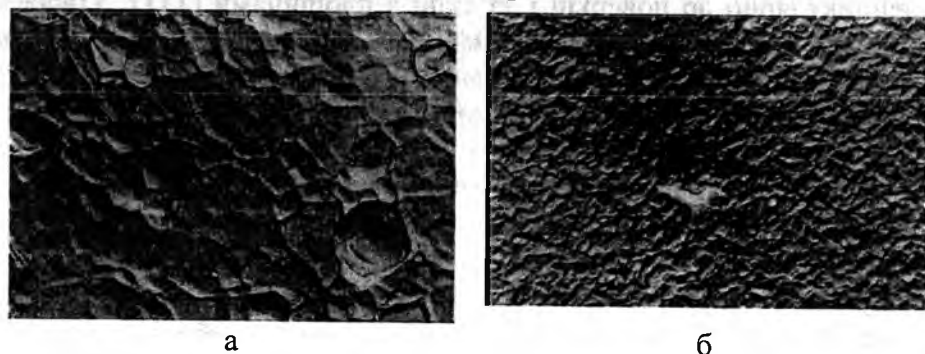


Рис.1. Електронно-мікроскопічні рельєфи поверхні плівки чистого алюмінію

Інші обмеження відносно щодо Al-плівок в ролі контактної металізації для субмікронних структур ВІС обумовлюються також з методів їх осадження. Металеві плівки, одержані методом електронно-променевого розпилення (наприклад, на "Ораторії-9") проявляють дуже слабе конформне покриття на сходинках функціональних шарів. Стоншення плівок над сходинками країв контактних вікон з тріщинами в кутах контактів може також сприяти підвищенню опору між'єднань за температурного впливу, який прискорює електроміграцію. Для усунення такого від'ємного ефекту нами розроблено цілий ряд методів формування конформного осадження відносно ступеневого покриття. Для цього в процесі осадження плівки Si-підкладки нагрівають до температури 200-300°C, збільшуючи при цьому рухливість атомів Al на поверхні структури до контактних вікон. Це підвищує конформність осадження плівки від 67 до 83 %. При електро-променевому методі формування Al-плівки параметрами, що визначають якість покриття є: тиск і склад залишкових газів, швидкість конденсації, температура попереднього прогрівання Si-підкладок із структурами і коефіцієнт енергетичної активації.

Швидкість конденсації і температура прогрівання Si-підкладок мають фізичні обмеження, які пов'язані з потужністю випарника, властивостями матеріалу і Si-підкладки. Виходячи із вітчизняного і зарубіжного досвіду в технології металізації, розглянуто можливість використання для металізації структур ІС методу термоіонного осадження, для якого суттєво збільшується коефіцієнт енергетичної активації процесу осадження. Вплив тиску і складу залишкових газів особливо позначається на властивостях покриттів в іонних процесах, що вимагає розробки обладнання з безмасляними системами відкачування.

Для експериментальних досліджень автори скористались установкою з іонізацією потоку у ВЧ-розряді. Для генерації робочої плазми використовується ВЧ-генератор ВЧД-2,5 з частотою 13,65 МГц, який створює ВЧ-поле в індукторі. Формування інтенсивного електронного потоку здійснювалось за допомогою довгофокусної пушки Пірса з аксіально-симетричним пучком потужністю 15 кВт. З метою збільшення енергії іонів, що бомбували підкладку і конденсат в процесі осадження плівки, підкладкотримач ізолювався від корпусу установки, і на нього подавалися постійна або високочастотна напруга зміщення $U_{зм}$. Як робоча речовина використовувався чистий алюміній (Al), кремній, титан. ВЧ-іонізатор може формувати як аргонну, так і азотну плазми залежно від типу осаджуваного конденсату: чистого Al, сплаву АК-1, TiN. Останній шар є особливо привабливим як підшар до алюмінію для зниження перехідного контактного опору. Слід зауважити, що іонізація парів як Al, так і Ti сильно підвищує адгезію та щільність плівок, в яких по суті питомий опір наближається до величини питомого опору масивного матеріалу. Це і забезпечує зростання стійкості Al-металізації як мінімум на порядок.

Проведеними експериментами встановлено, що іонізація шарів титану зростає з ростом індукції електричного поля іонізатора. Швидкість

осадження плівки Al чи Ti лінійно залежала від потужності електронно-променевого випарника.

Дослідження рівномірності розподілу іонного струму на поверхні підкладкотримача дало змогу визначити геометрію внутрішнього камерного пристрою та взаємного розподілу джерел, які дозволили за напруги зміщення $U_{зм} = 500-900$ В і густини струму $J = (0,2-0,5)$ мА/см² одержати рівномірно опромінюючу іонами площу діаметром до 160 мм.

Аналіз залежностей густини струму іонів свідчить, що густина іонного струму збільшується з ростом потужності електронного пучка і потужності іонізатора w_e , w_i і в області підкладкотримача може досягти значення порядку 1 мА/см². Плаваючий потенціал ізольованої Si-підкладки збільшується з ростом потужності електронного пучка w_e . Це відповідно дозволяє проводити термоіонне осадження шарів алюмінію, полікремнію чи титану, що забезпечує бомбування конденсованої плівки з енергією на рівні 100 еВ без подачі зміщення на підкладку.

Коефіцієнт іонізації, що визначався при $U_{зм} = -500$ В збільшується з ростом w_i та зменшенням w_e . Для кремнію коефіцієнт іонізації при $w_e = 1,8$ кВт та $w_i / w_e = 2,1$ кВт не залежить від w_e , хоча швидкість осадження зростає майже удвічі. При термоіонному осадженні швидкість росту плівки в порівнянні з електронно-променевим осадженням зростає в 1,5-2,2 рази. ВЧ-іонізатор дає змогу формувати плівки з високою рівномірністю на площі до 300 мм².

З метою створення внутрішньокамерних пристроїв установки ТІО та оптимізації їх геометричних розмірів була розроблена математична модель, яка описує розподіл товщини плівки на підкладкотримачі.

Під час створення математичної моделі приймали низку припущень:

- джерело напилення вважалось точковим;
- діаграма спрямованості джерела – була осесиметрична, а її головна вісь – вертикальна;
- всі частинки напилюваної речовини, які досягаючи поверхні Si-пластин конденсуються там з коефіцієнтом присипання $\alpha = 1$, а їх міграція на поверхні відсутня;
- швидкість осадження плівки – постійна;
- іонізована частина витягується із плазми під дією електричного поля і рухається рівномірно;
- електромагнітне поле діє на іонізовану частинку ізотропно;
- маса іонізуючої речовини прямо пропорційна масі речовини, що потрапила в іонізатор; $m_i = \xi \cdot m_0$, де ξ – степінь іонізації.

У ході експерименту також встановлено, що при обертанні підкладкотримача із швидкістю $\omega = 50-60$ об/хв товщина плівки усереднюється в будь-якій точці на його поверхні і визначається як середнє значення інтегралу симетричної функції $t = t(\varphi)$.

Результати розрахунків свідчать, що для низькоенергетичного ТІО ($U_{зм}$) вплив ступеня іонізації потоку осаджуваної плівки алюмінію на рівномірність не перевищує 5%.

Ця модель конденсації плівок за допомогою термоіонного оса-

дження лягла в основу установки УВН ЕНП 1714-001. Для даної установки спеціально був розроблений кріонасос 010 ВК-2000-011, який забезпечував продуктивність за азотом 5000 л/с, за аргеном – 4000 л/с, а залишковий тиск був меншим за $5 \cdot 10^{-6}$ Па.

Порівняльний аналіз алюмінієвих плівок, нанесених термоіонним методом розпилення по відношенню до плівок, сформованих ЕПВ, показав, що даний процес є унікальним, бо забезпечує:

- зростання адгезії плівок в 3-5 разів і наближає плівки до гальванічних покриттів,
- мікротвердість шарів збільшується в 1,6 разів за рахунок збільшення щільності,
- мікрозернистість зменшується в 2,5-3 рази,
- корозійна стійкість зростає майже на порядок.

Проведені експериментальні дослідження технологічного процесу термоіонного осадження алюмінію як металізації на біполярних ІС серій К140УД1, К140УД6, К140УД-7, К140УД-20, МНОН (1601РР-1) та n-канальних схем пам'яті з ультрафіолетовим стиранням К573РФ-5 показали дуже високі технологічні результати. Даний процес може формувати субмікронну металізацію із кроком 2 мкм і забезпечує конформність покриття сходинки на рівні 95%.

Проте електронно-променеве напилення Al-плівок, як і реактивне іонне травлення та електронно-променева літографія, під час формування структур ВІС може індукувати радіаційні руйнування підзатворної системи або оксидних діелектриків. Такі радіаційні руйнування можна усунути тільки за допомогою термовідпалу за $T = 500^\circ\text{C}$. Але ця температура вже приводить до деградації контактних систем.

Тому для субмікронної технології пропонуються як нові матеріали і технології, так і нові контактні структури, які успішно розв'язують проблему зниження контактного опору, а також проблему мінімізації утворення хілоків, які практично визначають корозійну стійкість металізації. Дуже близьким до термоіонного процесу формування металізації є метод іонно-плазмового (магнітного) розпилення. Магнетронний розпилювальний пристрій з магнітним блоком, що обертається та містить АКТо, зображений на рис. 2 (а, б).

За умови виконання закону косинуса для потоку розпилювальної речовини швидкість осадження, а, відповідно і рівномірність товщини плівки, буде різною як в центрі, так і на периферії Si-підкладки. Машинний розрахунок засвідчив, що рівномірність товщини плівок визначається кутом конусності β та відношення H_m/R_m і у виколі оптимального їх відношення нерівномірність менша за 2%, а конформність покриття більша за 96,5%. Оригінальність даного методу полягає в тому, що, вводячи в підковпачний пристрій ВЧ-індуктор, можна в плазмі азоту формувати нітридні плівки TiN, Si₂O₄N₂.

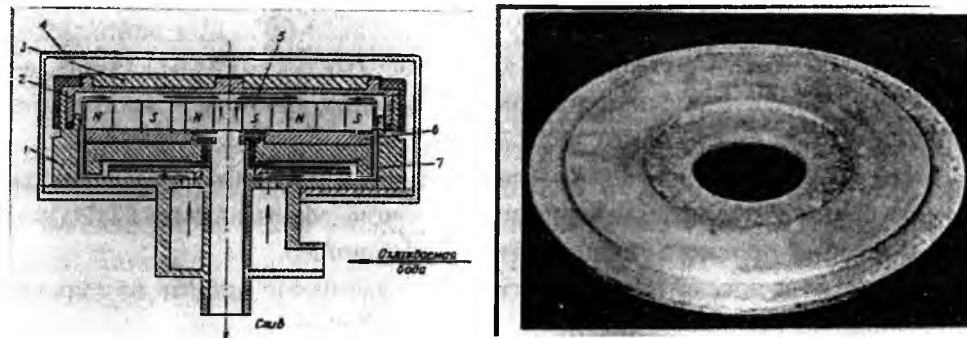


Рис. 2. а) Схематичне зображення пристрою ПІО з ВЧ-іонізацією парів: 1 – електронний прожектор Пірса, 2 – тигель, 3 – крапля матеріалу (Al), що випаровується, 4 – індуктор ВЧ, 5 – засувка, 6 – підкладкотримач; (б) Мішені зі сплаву для магнетронної металізації

За умови виконання закону косинуса для потоку розпилювальної речовини швидкість осадження, а, відповідно і рівномірність товщини плівки, буде різною як в центрі, так і на периферії Si-підкладки. Машинний розрахунок засвідчив, що рівномірність товщини плівок визначається кутом конусності β та відношення H_m/R_m і у виколі оптимального їх відношення нерівномірність менша за 2%, а конформність покриття більша за 96,5%. Оригінальність даного методу полягає в тому, що, вводючи в підковпачний пристрій ВЧ-індуктор, можна в плазмі азоту формувати нітридні плівки TiN, Si₂O₄N₂.

Таким чином, використання мішені із алюмінієвого сплаву забезпечує як високу корозійну стійкість металізації структур ВІС, так і крок металізації на рівні 2 мкм [6, 10]. Для підвищення конформності покриття сходинок в контактних вікнах додатково проводиться з використанням субмікронної літографії та плазмохімічного травлення профілювання контактних вікон під заданий кут 45-65 градусів. Такий технологічний прийом профілювання зміною анізотропності травлення забезпечує конформність покриття сходинок на рівні 98% і повністю виключає обриви і приховані неконтакти.

Нами розроблені нові контактні структури, які дозволяють в субмікронній технології виключити проблему контактного опору та хіллоутворення в контактах. Субмікронна технологія вимагає зменшення контактного опору менше, ніж 10 Ом/м. Тому для таких контактних систем використовують силіцидні (поліцидні) плівки з дифузійними бар'єрами. Інший, дифузійний бар'єр вводиться в контактні вікна між розміщеним зверху металом (Me₁) і контактним бар'єром NiSi₂ з метою повного виключення дифузійних процесів. Таким дифузійним бар'єром є нітрид титану, який можна формувати або височастотним магнетронним розпиленням титанової мішені в плазмі азоту, або газофазною реакцією розкладу TiCl₄ і NH₃ в реакторі зниженого тиску за T = 550-650°C.

Силіциди благородних металів (Pt, Pd, Ni) та тугоплавких металів

(Ti, Mo, W) використовуються для утворення контактів з сильно легованими n⁺ - і p⁻-областями кремнію. Величини висот бар'єрів Шоттки Фв із силіцидів тугоплавких металів є майже ідентичними для кремнію n- і p-типу. З іншого боку, PtSi, Pd₂Si, Ni₂Si, які мають відносно високі величини Фв на кремнії n-типу (від 0,66 до 0,84 eV), можуть бути лише частково ефективними для омичних контактів на кремнії p-типу.

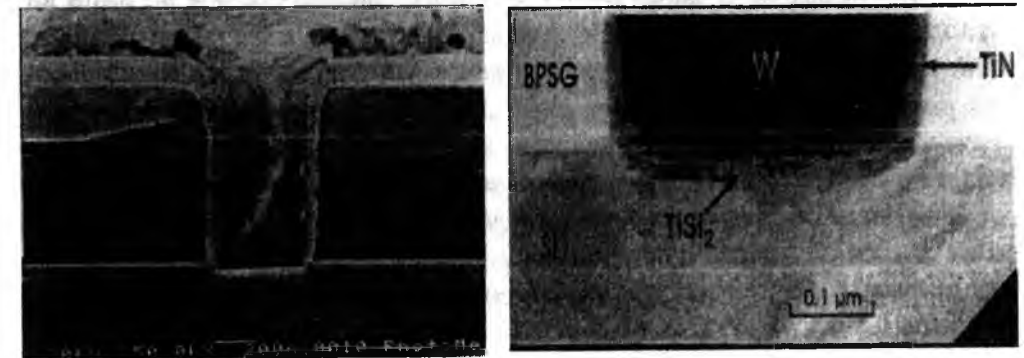


Рис. 3. Контактно-металізовані системи: нітрид титану нанесений височастотним магнетронним розпиленням титанової мішені в плазмі азоту

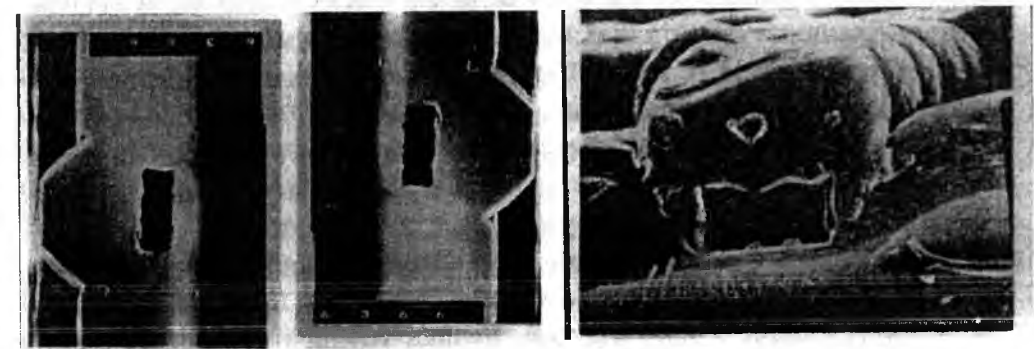


Рис. 4. Вплив спейсерної технології на планаризацію рельєфу структури інтегральної схеми. Така спейсерна технологія повністю усуває обриви багаторівневої розводки на сходинках

Електроди затвору одержують шляхом реактивного іонного чи плазмохімічного травлення полікремнієвих плівок, сильно легованих фосфором, товщина яких дорівнює близько 450 нм, а розширені стік-витоківі n⁺-області формують іонною імплантацією миш'яку As⁺, використовуючи електроди затвору в ролі маски для іонного легування. Таке розширення стік-витоківі областей є необхідним для зведення до мінімуму гарячих електронів з довжиною затвору << 1 мкм. По-друге, оксидний спейсерний шар осаджують за низької температури меншої 450°C в реакторі зниженого тиску піролізом моносилану і анізотропно протравлюють його до дифузійних зон, щоб залишились прокладки бокових стінок (спейсерів) вздовж полі-Si затвору для їх використання в ролі імплантаційної маски. Відтак осаджують шар титану товщиною

40 нм, а силіцид одержують шляхом його відпалу за $T = 600-720^\circ\text{C}$. Для впалювання контактів використовують швидкий термічний відпал (або фотонний) за $T \leq 700^\circ\text{C}$ протягом 1-5 хв з одночасним утворенням силіциду.

Швидкий термічний відпал зводить до мінімуму дифузійні процеси та забезпечує високоякісне формування низькоомних контактів. Опір шару, заміряний на p^+ -дифузійних областях, зменшується в 40 разів на контактах TiSi_2 , а струм втрат p^+ -діодів – до рівня $7 \cdot 10^{-9} \text{ А/см}^2$. Більше того, зменшення в порівнянні із струмом втрат для структур без силіциду з рівнем $9 \cdot 10^{-8} \text{ н/м}^3$ такі контактні опори до стік-витоків областей призводить до значного збільшення допустимого струмового навантаження на TiSi_2 (майже удвічі). Це очевидно, бо істотне зменшення опорів стік-витоків областей призводить до збільшення (майже удвічі) допустимого навантаження по струму МОН-транзисторів із силіцидним (поліцидним) затвором в порівнянні з несиліцидованими МОН-транзисторами.

У зв'язку з тим, що робота виходу із монокремнію наближається до роботи виходу з полікремнію, то технологія силіцидного (поліцидного) затвору значно зменшує порогові напруги n - і p -каналних МОН-транзисторів із рівня $U_T = 2,4 \pm 0,3 \text{ В}$ до $U_T = 0,55 \pm 0,15 \text{ В}$, та суттєво покращує температурну стабільність затворної системи із рівня $\Delta U_T = 3-5 \text{ В}$ до $\Delta U_T = 0,3-0,35 \text{ В}$ за $T = 150^\circ\text{C}$. При цьому значно підвищується теплостійкість затворної системи від 425 до 560°C .

Деградація контактних опорів в МОН-транзисторах відбувається внаслідок дифузійних процесів за високих температур. Тому для виключення цього ефекту в контактено-металізованих системах використовують так звані дифузійні бар'єри. Саме нітриди, карбіди і бориди перехідних металів представляють особливий інтерес як провідні матеріали для їх застосування в ролі бар'єрів. Велика температурна стабільність даних бар'єрних шарів встановлюється завдяки дуже низькому коефіцієнту дифузії домішкових атомів через дані матеріали, наприклад, енергія активації для дифузії міді в TiN – тонкі шари складає 4,4 еВ, в той час, як звичайна величина для її дифузії в метали – 0,9-1,9 еВ.

Нітриди і карбіди матеріалів дуже легко одержати методом реактивного розпилення у високочастотній магнетронній системі розпилення. Саме нітрид титану є найкращою сполукою, бо його об'ємний опір має один з найменших контактних опорів ($< 25 \text{ мкОм/см}$). Контактено-металізовані структури при цьому підвищують свою теплостійкість до 600°C .

Плівки карбіду титану з різним композитним складом одержували в результаті реактивного розпилення в плазмі $\text{CH}_4 + \text{Ar}$, що давала структуру Ti_xC ($x = 3,1$). Якщо в плазмі замінити CH_4 на диборан B_2H_6 , то в результаті реактивного високочастотного магнетронного розпилення одержували плівку бориду титану TiB_2 з опором від 20 до 80 мкОм/см . Теплостійкість боридних плівок є ще вищою і складає $625-635^\circ\text{C}$.

Структура $\text{Al/TiN/TiSi}_2/\text{Si}$ виділяється надзвичайно високою тем-

пературною стабільністю, бо цілісність p - n -переходів зберігається до температури $T = 600-615^\circ\text{C}$ протягом 30-хвилинного відпалу. Ці системи збільшують свою теплостійкість, якщо замість чистого Al використати алюмінієвий сплав Al-Si-H_0-1-1 . Теплостійкість таких контактено-металізованих систем підвищується на 25 - 45°C .

При виборі якісних контактено-металізованих систем слід врахувати, що матеріали з роботою виходу, близькою до середини забороненої зони кремнію (тобто 0,6 еВ) і малим коефіцієнтом дифузії діють, з одного боку, як якісні контактні шари, а з іншого боку – як дифузійні бар'єри. Це підтверджують майже всі тугоплавкі метали. Але серед них слід вибрати ті, що мають мінімальний опір та високу теплостійкість і високотехнологічний спосіб формування таких плівок. Якщо як дифузійні бар'єри вибрати тільки Ti і W , то вони дають високу термічну стабільність і низький контактний опір. Дослідження цих плівок за допомогою RBS-аналізу (оберненого розсіювання Резерфорда) дали підсумовуючі результати. Можна виділити дві групи контактено-металізованих структур. Перша група – в якій W -шари розміщуються між алюмінієм і титаном. До другої групи належать структури, в якій W -шари розміщуються між алюмінієм та кремнієм.

Введення W -шару між алюмінієм і титаном незначно покращує контактну стабільність. Саме псевдосплав TiW (10:90) введено в контактну структуру Au/TiW/PtSi . Цей псевдосплав діє як крайовий дифузійний бар'єр. Його термостійкість значно покращується, якщо псевдосплав формувати високочастотним магнетронним розпиленням в плазмі азоту, бо тоді утворюється структура TiNW , яка піднімає температуру стійкості до 550°C , а струми втрат переходу знижуються.

У другій групі контактено-металізованих систем чисті титанові плівки або плівки TiW розміщуються між Al та Si і виступають одночасно як контактними, так і дифузійними бар'єрами. Утворення інтерметалевих сполук TiAl_3 проходить в Al/Ti/Si -структурах. Однак, дуже низькі густини струмів втрат були одержані вже за температури $T = 450^\circ/30\text{хв}$. Тому введення W між плівками алюмінію і титану значно покращує термічну стабільність даних контактено-металізованих систем майже на $100-150^\circ\text{C}$. З іншого боку, питомий опір відповідного контакту системи Al/W/Ti -металізованого шару до p^+ - Si є досить низьким. Системи Al/TiW/Si та Al/TiW/PtSi/Si проявляють аналогічну термостабільність, правда з дещо вищим рівнем струмів втрат. Тому для таких контактено-металізованих систем технологія формування контактено-дифузійних шарів відіграє домінуючу роль.

Розглянемо особливості формування шарів вольфраму. Давно відомі переваги осадження W -плівок як матеріалу для розводки ІС. Саме вольфрам використовувався для контактних шарів, дифузійних бар'єрів, електродів підзатворного діелектрика та струмопровідних домішок в субмікронній технології ВІС. Їх перевага полягає у високій провідності, здатності протистояти високим температурам нейтрального середовища, а коефіцієнт теплового розширення W співпадає з коефіцієнтом

розширення Si. Для селективного осадження W в контактні вікна монокремнію вибрано процес газофазового осадження в атмосфері водню із фториду вольфраму WF₆ в реакторах зниженого тиску типу “Ізотрон” за T = 300-320°C. Швидкість осадження вольфраму W не залежить від тиску WF₆, але пропорційна кореню квадратному із парціального тиску водню.

Питомий опір таких піролізних плівок вольфраму дорівнює 10-17 мкОм/см і зменшується в міру товщини шару та температури осадження до 400°C. Термічна стабільність W/Si структур досліджувалась методами рентгено-електронної спектроскопії на мас-спектрометрі. Як показали дослідження, W не взаємодіє з кремнієм в процесі відпалу до T = 600°C протягом 1 год. Тетрагональна форма WSi₂ вже з’являється за T = 625°C протягом двох годин. Контактний опір Al/W/Si-структур вимірювався як функція концентрації легуючої домішки в (Si AsBP). Контактний опір W до n⁺-Si в 20 разів менший за контактний опір Al до n⁺-Si. Крім того, W осаджується локально в контактні вікна і додатково планаризує поверхню структури. Контактний опір W до p⁺-Si менший або дорівнює контактному опорі Al до p⁺-Si.

Наведемо два основних застосування селективного осадження W-шарів в субмікронній технології ВІС:

1. Даний процес є самосуміщеним, і тому його можна використовувати як контактну-дифузійний бар’єр між Al та Si (або іншими металевими з’єднаннями), так і для металізації затворної системи і стіквитокових областей МОН-транзисторів. При цьому товщину плівок W вибирають в межах 50-150 нм.

2. Такий процес забезпечує дуже велику планаризацію субмікронних структур і повністю виключає обриви на сходинках. Конформність покриття при цьому зростає з 65 до 97%.

Висновки до п. 2

1. Досліджено механізми корозійних руйнувань металізації структур ВІС із алюмінію та його сплавів. Показано, що введення в сплав алюмінію тугоплавких та рідкісноземельних металів пригнічує хіллокоутворення, що є причиною корозійних та електрокорозійних руйнувань.

2. Розроблено математичні моделі термоіонного та реактивного іонно-плазмового розпилення матеріалів верхнього рівня розводки субмікронних структур ВІС. Відповідно розроблено алюмінієві сплави, леговані РЗМ, та на їх основі – мішені для магнетронного розпилення на установках типу “Ораторія-5”.

3. Зменшення контактного опорі та високої конформності покриття сходинок досягається плазмохімічним профілюванням контактних вікон та спейсерною технологією. Досліджено оптимальні умови, за яких досягається максимальна конформність (95-97%).

4. Досліджено багатошарові контактні структури з використанням нітридних, карбідних, боридних та силіцидних плівок. Вибрано відповідно контактні системи, які створюють дифузійні бар’єри та зменшують на 1-2 порядки контактні опори структур ВІС та збільшено теплостійкість багаторівневої розводки до 600°C шляхом введення вольфраму

між Al (алюмінієвим сплавом) та кремнієм.

5. Визначено оптимальні багатошарові структури з дифузійними бар’єрами для субмікронної топології ВІС з мінімальним кроком металізації, меншим за 2,5 мкм.

6. Створення структур МОН ВІС із самосуміщеними затворами стало можливим при використанні електродів затворів одночасно в ролі масок для дифузії домішок та в ролі провідних елементів електричної схеми за рахунок локального осадження плівок вольфраму.

7. Реалізація такого напрямку можлива завдяки унікальності технології сумісності плівок тугоплавких металів (зокрема вольфраму) з тонкими силіцидними плівками титану, які дають змогу проводити високо-температурні обробки без деградації характеристик приладних структур. Зменшення контактного опорі, опорі розводки та кроку металізації дає можливість зменшити площу структури кристалу ВІС мінімум на 25-30%, а це, в свою чергу, збільшує його швидкодію ВІС як мінімум, на порядок.

Зниження величини контактного опорі, опорі доріжок та площі багаторівневої розводки за рахунок багатоконтактних контактних – металізованих систем забезпечує значне зниження (понад 25-30%) погонних опорі, індуктивності та ємності розводки субмікронних структур ВІС.

Література

1. Новосядлий С.П. Електрофізичне діагностування надійності структур ВІС / С.П. Новосядлий // Вісник ДУ “Львівська політехніка”. Радіоелектроніка та телекомунікації. – 1999. – №367. – С. 187-197.
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. Аналітичні фізико-хімічні методи аналізу і контролю в системній технології ВІС / С.П. Новосядлий // Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. – 1999. – №1(3). – С. 30-38.
4. Спенс Д.Ж. Экспериментальная электронная микроскопия высокого разрешения: пер.с англ. / Д.Ж. Спенс. – М.: Наука, 1986. – 410 с.
5. Растровая электронная микроскопия и рентгеновский микроанализ / Д.Ж. Гоулдстейн и др. – М.: Мир, 1984. – Кн.1-2. – 568 с.
6. Новосядлий С.П. Механізми формування плівок дисиліциду титану в реакторі зниженого тиску на основі аморфного кремнію / С.П. Новосядлий // Металофізика і новітні технології. – 2001. – №23(5). – С. 597-608.
7. Новосядлий С.П. Активация домішок в субмікронній технології формування структур ВІС / С.П. Новосядлий // Металофізика і новітні технології. – 2002. – №24(6). – С. 777-791.
8. Вербицький В.Г. Ионные нанотехнологии в электронике / В.Г. Вербицкий. – Киев, 2002. – 369 с. (2002).

9. Новосядлий С.П. Фізико-технологічні основи субмікронної технології великих інтегральних схем / С.П. Новосядлий. – Івано-Франківськ: Сімик, 2003. – 350 с.
10. Новосядлий С.П. Субмікронна технологія високовольтних біполярних і VI-K-MON VIS / С.П. Новосядлий // Вісник Прикарпатського національного університету ім.В.Стефаника. Математика і фізика. – 2000. – Вип.1. – С. 125-129.
11. Новосядлий С.П. Полікремнієва спейсерна технологія формування субмікронних контактів VIS / С.П. Новосядлий // Труды II Международной научно-практической конф. "Современные информационные и электронные технологии". – Одесса, 2001. – С. 263-264.
12. Авт.св.СССР №1771333 от 22.06.1992/С.П. Новосядлий, И.Т. Когут, В.Н. Худин. Способ изготовления МДП-структур, ДСП-2с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 12.10.2009 р.
Рекомендовано до друку д.х.н., професором Фреїком Д.М.*

PHYSICAL DIAGNOSTICS AND WAYS OF DECLINE OF LINEAR RESISTANCES, INDUCTANCES AND CAPACITIES OF BAGATORIVNEVOI ROZVODCI OF SUBMICRON STRUCTURES OF LARGE-SCALE ARRAYS

R. B. Atamanyuc

*Precarpathian National University named by Vasil Stefania;
76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57;
e-mail: roman_atamanyuk@mail.ru*

The basic tendency of modern microelectronics is reduction of sizes of elements of structures of VIS to the submicron topology sizes, that is transition to nanoelectronic - to the structures and elements with the sizes of nanometres. A raster electronic microscopy remains a basic diagnostic method which is used on all design times and making of submicron structures. REM allows to measure surface structures with high settling ability $2 \cdot 10^{-3} - 2 \cdot 10^{-2}$ mcm, to look after topographical and composition heterogeneities with spatial settling ability $5 \cdot 10^{-2}$ mcm, to determine descriptions and defects of submicron p-n- transitions with locality $5 \cdot 10^{-2}$ mcm on a depth less after 1 mcm. The size of contacts metal/semiconductor depends on different parameters of the system: works of lunge, superficial concentration of alloying admixture, type of conductivity of Si-pidcladoc, cleanness of surface of Si-plates before besieging of metal.

For submicron technology both new materials and technologies and new contact structures, which successfully decide the problem of decline of contact resistance, and also problem of minimization of formation of hillocks are offered, which practically determine corrosive firmness of metallization.

Key words: *microelectronics, submicron structures of large-scale arrays, submicron technologies, linear resistance, inductance, capacity.*

УДК 669.621.315.592

РОЗМІРНИЙ ЕФЕКТ ТА МЕХАНІЗМИ ПЕРЕНЕСЕННЯ НОСІЇВ СТРУМУ У ТОНКИХ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ПЛІВКАХ ХАЛЬКОГЕНІДІВ СВИНЦЮ (ОГЛЯД)

Д. М. Фреїк, Б. С. Дзундза, Ю. В. Кланічка

*Прикарпатський національний університет імені Василя Стефаника;
79000, Івано-Франківськ, вул. Шевченка, 57; e-mail: freik@pu.if.ua*

Зроблено короткий огляд робіт, присвячених дослідженню класичного розмірного ефекту у плівках халькогенідів свинцю із різною структурною завершеностю. Розглянуто вплив міжфазних та міжзеренних меж, а також дислокацій невідповідності на механізми перенесення та рухливість носіїв заряду в рамках характеристичних довжин, дифузного розсіювання і моделі Петріца.

Ключові слова: *тонкі плівки, халькогеніди свинцю, транспортні явища, механізми розсіювання.*

Вступ

- I. Структурна модель тонких плівок і розсіювання носіїв на міжзеренних межах.
- II. Неоднорідності електричних параметрів тонких плівок.
 - 2.1. Модель Петріца і електричні властивості приповерхневих шарів.
 - 2.2. Профілі електричних параметрів.
- III. Механізми розсіювання носіїв заряду у тонких плівках.
 - 3.1. Елементи теорії.
 - 3.2. Дзеркальне розсіювання носіїв заряду. Монокристалічні плівки.
 - 3.3. Дифузне розсіювання носіїв заряду.
 - 3.4. Залежність механізмів розсіювання від температури.
- IV. Розсіювання носіїв заряду на дислокаціях невідповідності. Гетероструктури.
 - Висновки.
 - Література

Вступ. Плівки халькогенідів свинцю – перспективні матеріали для детекторів і джерел інфрачервоного діапазону оптичного спектру випромінювання [1, 3]. При реалізації тонкоплівкових активних елементів важливим параметром, що впливає на їх характеристики, є класичні та квантові розмірні ефекти. Відомо [3-5], що в області малих товщин механізми розсіювання в плівках суттєво відрізняються від таких у масивних зразках. Тут, зокрема, необхідно враховувати розсіювання на межах зерен, поверхні, дислокаціях невідповідності та дефектах росту [5-11]. У зв'язку із цим важливою проблемою є оцінка цих додаткових механізмів розсіювання у тонких плівках.

У роботі проведено аналіз результатів дослідження механізмів розсіювання носіїв заряду у плівках халькогенідів свинцю різної товщини та структурної завершеності виконаних, переважно, у Фізико-хімічному

інституті та кафедрі фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника [2, 12-17, 19, 21, 23-28].

І. Структурна модель тонких плівок і розсіювання носіїв на міжзеренних межах

Загалом тонку плівку, осаджену на підкладку різними методами [2], можна уявити як складну багатофазну систему до якої входять міжфазні межі ("плівка-підкладка" або "плівка-вакуум (повітря, газ)") та міжзеренні межі (рис. 1.)[4]. Зауважимо, що важливими технологічними факторами при вирощуванні плівок методом осадження із парової фази, який знайшов широке застосування для халькогенідів свинцю, є температура випаровування наважки і осадження (підкладки), вид самої підкладки (монокристал, полікристал, аморфна), стан її поверхні, склад залишкових газів у вакуумній системі при осадженні, а також товщина (d) плівки та багато інших [2].

Якщо для міжфазних меж важливим параметром плівок є їх товщина, то для міжзеренних меж – розмір кристалітів D. Так, зокрема, якщо $D \gg d$, тоді вплив міжзеренних меж незначний, а при $D \gg d$ суттєвої ролі не відіграє поверхня плівок.



Рис. 1. Схема міжфазних і міжзеренних меж в тонкоплівковій структурі [4]

За умови, що всі кристаліти мають однакові лінійні розміри D, см, концентрація домішок N, см^{-3} тільки одного типу, а ширина міжзеренних меж h, см із концентрацією пасток Q_1 , см^{-2} і те, що всі вільні носії заряду поблизу межі $D/2 - 1$ захоплюються пастками, утворюється збіднена область із характерним розподілом електричного заряду Q (рис. 2, в) і відповідними енергетичними рівнями E_l у забороненій зоні для матеріалу p-типу (рис.2, г) [18].

Для випадку $DN < Q_1$, що відповідає умові, коли кристаліти повністю збіднені на носії, а пастки тільки частково заповненні, висота потенціального бар'єру V_b лінійно збільшується із ростом концентрації N у погодженні з виразом [18, 19]

$$V_b = \frac{eD^2 N}{8\epsilon} \quad (1)$$

Рівень Фермі E_F у цьому випадку визначається співвідношенням

$$E_F = E_c - kT \ln \left[\frac{1}{2} \left(\frac{Q_1}{DN} - 1 \right) \right] \quad (2)$$

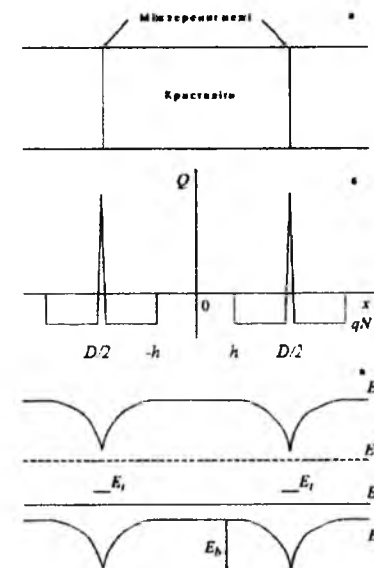


Рис. 2. Модель міжзеренної межі в полікристалах p-типу провідності: а – структура полікристала; б – розподіл заряду Q в зерні і на межі; в – зонна діаграма, E_c – край зони провідності, E_v – край валентної зони, E_l – рівень пасток, E_{Fi} – рівень Фермі у власному напівпровіднику, E_b – висота енергетичного бар'єру [18]

При $DN > Q_1$ тільки частина кристалітів збіднена, а величина потенціального бар'єру чисельно рівна

$$V_b = \frac{eQ_1^2}{8\epsilon N} \quad (3)$$

де ϵ – діелектрична стала.

Сумарний струм через полікристал визначається як провідністю кристалітів, так і механізмом переходу носіїв з одного кристаліта в інший, тобто провідністю межзеренних меж. Як правило, провідність кристалітів істотно перевищує провідність меж, тому, під час вивчення транспортних властивостей полікристалів слід розглядати провідності межзеренних областей.

Розглядають два найважливіших процеси, що визначають струм через межі: тунельні процеси і електронна емісія. Тунельні струми істотні у разі наявності дуже вузьких бар'єрів, наприклад в сильно легованих полікристалах. У помірно легованих полікристалах тунельні струми малі порівняно із струмами електронної емісії і ними можна знехтувати.

Густина струму електронної емісії при прикладенні до бар'єру напруги U рівна [19]

$$j = \frac{e^2 n}{\sqrt{2\pi m^* kT}} U e^{-\frac{eV_b}{kT}} \quad (4)$$

Із формули (4) провідність полікристалу буде визначатися як

$$\sigma = \frac{De^2 n}{\sqrt{2\pi m^* kT}} e^{-\frac{eV_b}{kT}} \quad (5)$$

Враховуючи, що

$$\sigma = e\mu p, \quad (6)$$

ефективне значення рухливості при цьому буде

$$\mu = \frac{De}{\sqrt{2\pi m^* kT}} e^{\frac{E_b}{kT}}. \quad (7)$$

За умови, що $eV_b = E_b$, V_b – потенціал бар'єру маємо [3]:

$$\sigma \propto \exp\left[-\left(E_g/2 - E_f\right)/kT\right] \text{ і } \delta \propto ND < Q_1, \quad (8)$$

$$\sigma \propto T^{-1/2} \exp\left[-\left(E_g/kT\right)\right] \text{ і } \delta \propto ND > Q_1. \quad (9)$$

Тут n – концентрація дірок, m^* – ефективна маса.

Теоретичні підходи перевірені на полікристалічних плівках, одержаних осадженням пари на скляні підкладки згідно [18,19]. Зменшуючи товщину плівки до 0,05 мкм і знижуючи температуру підкладки до температури рідкого азоту можна одержати плівки з розміром зерен $\sim 2 \cdot 10^{-7}$ см.

На рис. 3 наведено експериментальні результати для полікристалічних плівок р-PbTe з різним розміром кристалітів. Розраховані значення енергій активації виявилися рівними 0,06 і 0,1 еВ. При цьому вона зростає із зменшенням розмірів кристалітів від 10^{-6} см до $2 \cdot 10^{-7}$ см. Отримані значення енергії активації приводять до наступних висновків. По-перше, їх не можна пов'язати із захопленням дірок – основних носіїв у плівках – у разі зменшення температури акцепторними рівнями ($E_v+0,06$) еВ та ($E_v+0,1$) еВ, оскільки для розглядуваного інтервалу температур всі акцепторні рівні іонізовані [20] і тому не можуть зробити жодного внеску у зміну концентрації носіїв. Отже, можна стверджувати, що визначені енергії активації пов'язані із потенціальними бар'єрами на межах зерен, які і призводять до зменшення рухливості дірок у разі зменшення температури (рис. 3). Зауважимо, що експериментальні результати добре співпадають із розрахунками, проведеними за виразом (7), що вказує на правомірність вибору фізичної моделі для полікристалічного матеріалу.

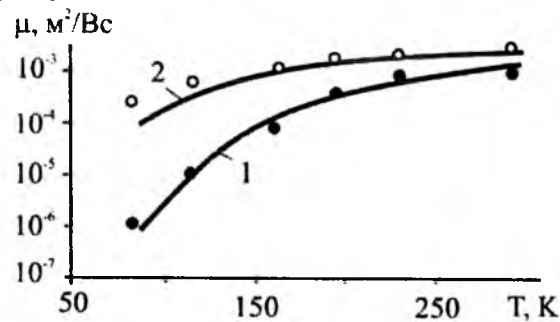


Рис. 3. Залежність рухливості носіїв струму від температури для полікристалічних плівок р-PbTe із різними значеннями величини кристалітів, $D \cdot 10^{-6}$, см: (1) – 1,0; (2) – 0,2 (точки – експеримент, суцільна лінія розрахунок (7)) [19]

Збільшення енергії активації міжзеренних потенціальних бар'єрів із зменшенням розмірів кристалітів може бути пояснено реалізацією умови $DN > Q_1$, для якої V_b згідно з (3) зростає зі збільшенням поверхневої густини пасток Q_1 . Дійсно, зменшення розмірів кристалітів у нашому випадку веде до зростання площі поверхні їх міжзеренних меж, що, без-

умовно, призводить і до зростання концентрації Q_1 , а, отже, і величини бар'єру, що і підтверджується експериментом

II. Неоднорідності електричних параметрів тонких плівок

2.1. Модель Петріца і електричні властивості приповерхневих шарів. Модель Петріца визначає поверхневі провідність σ_s , коефіцієнт Холла R_s і товщину приповерхневого шару d_s плівки, розглядаючи область поверхневого заряду і об'єм як відокремлені фізичні області, які з'єднані паралельно тільки біля контактів (рис. 4) [22]. Об'ємним параметрам приписано індекс b.

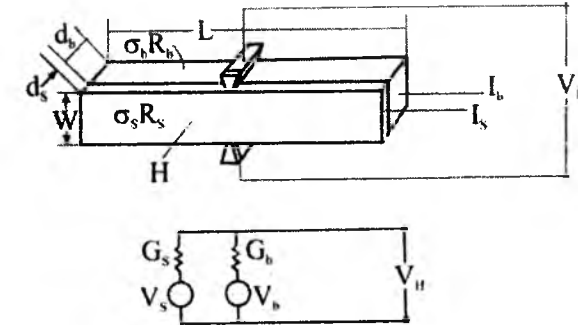


Рис. 4. Двошарова модель Петріца та її електричний аналог [22]

При цьому вважається, що $d = d_s + d_b$. Зв'язок між поверхневими (s) і об'ємними (b) параметрами плівки, а також вимірними значеннями на експерименті (σ , R_H , μ_H , d), як видно із електричної схеми (рис. 4), визначається співвідношеннями

$$R_H = \frac{V_H d}{IH} = \frac{(\sigma_s^2 d_s R_s + \sigma_b^2 d_b R_b) d}{(\sigma_s d_s + \sigma_b d_b)^2},$$

$$\sigma = \frac{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}{d}, \quad (10)$$

$$\mu_H = \sigma R_H = \frac{\sigma_s^2 d_s R_s + \sigma_b^2 d_b R_b}{\sigma_s d_s + \sigma_b d_b}.$$

Значення поверхневих (σ_s , R_s , d_s) і об'ємних (σ_b , R_b , d_b) величин підбираються таким чином, щоб одержати найкраще співпадання розрахованих значень (σ , R_H , μ_H) із експериментом. За допомогою рівнянь (10) можна визначити надлишок поверхневих зарядів

$$\Delta Q = \frac{d_s}{eR_s}. \quad (11)$$

Модель Петріца досить наближено визначає параметри поверхневого шару, який, у нашому випадку, формується за рахунок міжфазних меж.

Результати залежностей експериментальних, а також розрахованих за моделлю Петріца, питомої електропровідності (σ), сталої Холла (R_H) і холлівської рухливості (μ_H) від товщини (d) для плівок n- і p-типу $Pb_{0,91}Sn_{0,09}Se$ подані на рис. 5 [14]. У таблиці наведено також значення використаних під час розрахунків параметрів поверхневого шару (s) і об'єму (b) плівок. Як видно із рис. 5, має місце добре співпадання хол-

лівської рухливості μ_n із розрахунками за моделлю Петріца. Добре узгодження із експериментальними розрахунками дає і дифузний механізм розсіювання носіїв (рис. 5), який підтверджується незначною величиною відношення поверхневої до об'ємної рухливостей $\frac{\mu_s}{\mu_b} = \frac{\sigma_s R_s}{\sigma_b R_b}$ (табл.).

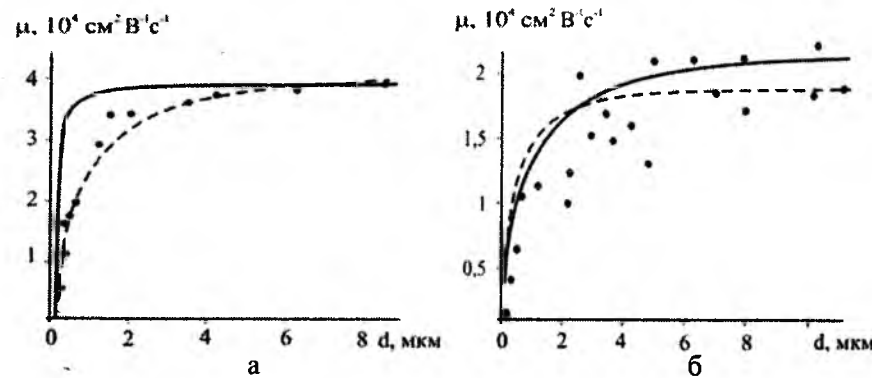


Рис. 5. Залежність холлівської рухливості (μ_H) плівок n – Pb_{0,91}Sn_{0,09}Se (а), р – Pb_{0,91}Sn_{0,09}Se (б) від товщини: • – експеримент; — — — розрахунок за моделлю Петріца; — — — розрахунок для дифузного розсіювання [14]

Табл. Значення параметрів поверхневого шару (s) і об'єму (b) плівки n- і р-Pb_{0,91}Sn_{0,09}Se, використаних під час розрахунків моделі Петріца і дифузного розсіювання [14]

Електричні параметри	n - тип	p - тип
$\sigma_s, \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	700	2500
$R_s, \text{ см}^3 \text{ Кл}^{-1}$	1,5	1,5
$d_s, \text{ мкм}$	0,12	0,1
$\sigma_b, \text{ Ом}^{-1} \text{ см}^{-1}$	3000	300
$R_b, \text{ см}^3 \text{ Кл}^{-1}$	13	75
$\Delta Q, \text{ см}^{-2}$	$0,5 \cdot 10^{14}$	$0,4 \cdot 10^{14}$
$l_p, \text{ мкм}$	0,68	0,18
$\mu, \text{ см}^2 \text{ В}^{-1} \text{ с}^{-1}$	$4,3 \cdot 10^4$	$1,9 \cdot 10^4$
$n, \text{ см}^{-3}$	10^{18}	10^{18}

Густина поверхневих зарядів за оцінкою згідно (11) складає $\Delta Q = (0,4-0,5) \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ (таблиця).

2.2. Профілі електричних параметрів

2.2.1. Елементи теорії. Виміряні ефективні кінетичні параметри є деякими інтегральними величинами і залежать від профілю розподілу концентрації носіїв заряду і питомої електропровідності, тобто локальних значень. Ефективні електричні параметри плівок пов'язані з відповідними дійсними значеннями співвідношеннями [23]:

$$\sigma(d) = \int_0^d \sigma(z) dz / d; \quad (12)$$

$$R_H(d) = \frac{\int_0^d R_H(z) \sigma^2(z) dz}{d \sigma^2(d)}; \quad (13)$$

$$\mu(d) = R_H(d) \sigma(d). \quad (14)$$

Тут $\sigma(z)$, $R_H(z)$, $\mu(z)$ – дійсні значення питомої електропровідності, коефіцієнту Холла і холлівської рухливості на товщині z , а, отже, є функціями розподілу відповідних параметрів за товщиною плівки; z – координата в напрямку нормалі до поверхні плівки ($z = 0$ відповідає границі розділу); d – товщина плівки. Елементарні шари dz плівки, як видно з формули (13), вносять вклад в інтегральне значення R_H , пропорційний їх коефіцієнту Холла і питомій електропровідності, причому вклад може бути протилежним в залежності від знаку $R_H(z)$.

Якщо $d_i \pm \Delta d/2$ – товщини плівок, які відрізняються внеском наступного елементарного шару; z – координата цього шару то на основі (12-14), припускаючи, що локальні кінетичні параметри елементарних шарів товщиною Δd є в них рівнозмітними по z , отримаємо [24]:

$$\int_0^d \sigma(z) dz = \sigma(d) d;$$

$$\int_0^{d+\frac{\Delta d}{2}} \sigma(z) dz = \sigma \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right).$$

Інтегруючи в точках елементарного шару $d + \frac{\Delta d}{2}$ і $d - \frac{\Delta d}{2}$ отримаємо

$$\sigma(z) = \frac{\left[\sigma \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) - \sigma \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \right]}{\Delta d}. \quad (15)$$

Аналогічно $\int_0^d R_H(z) \sigma^2(z) dz = R_H(d) \sigma^2(d) d$;

$$R_H(z) \sigma^2(z) = \frac{R_H \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) - R_H \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right)}{\Delta d}.$$

Підставивши $\sigma(z)$ одержимо

$$R_H(z) = \frac{\left[R_H \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) - R_H \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \sigma^2 \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \right] \cdot \Delta d}{\left[\sigma \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d + \frac{\Delta d}{2} \right) - \sigma \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \cdot \left(d - \frac{\Delta d}{2} \right) \right]^2}; \quad (16)$$

$$\mu(z) = R_H(z) \sigma(z); \quad (17)$$

$$p, n(z) = \frac{1}{R_H(z) \cdot e}. \quad (18)$$

2.2.2. Результати експерименту і розрахунків. Досліджували епітаксійні плівки n- і р-PbTe, n- PbSe, n-PbS з концентрацією носіїв заряду $10^{17}-10^{20} \text{ см}^{-3}$, які вирощували на підкладках із кристалів фтористого барію орієнтації (111) із парової фази, а також плівки р-PbSe з концентрацією носіїв заряду 10^{17} см^{-3} , вирощені на слюді. Вирощування плівок

здійснювали за постійних температурі підкладок і швидкості конденсації, а також сталій для кожного технологічного процесу інтенсивності випаровування джерела халькогену. Післяростове охолодження зразків проводили в регульованому потоці пари халькогену. Якість плівок оцінювали методами рентгенівської дифрактометрії і топографії, холлівських вимірювань. Товщину плівок задавали часом осадження пари, поширене травлення плівок здійснювали хімічними методами.

Зразки для вимірювання ефекту Холла і електропровідності мали чотири холлівських і два струмових зонди. Виміри проводили на постійному струмі у постійному магнітному полі. Виключення впливу побічних гальвано- і термомагнітних ефектів при цьому забезпечували усередненням результатів вимірів при різних напрямках струму і магнітного поля. Струм, який протікав через зразок, складав ~ 1 мА, а магнітне поле 2,0 Тл. Похибка вимірів не перевищувала 5%.

Плівки на сколах BaF_2 були монокристалічними із паралельною орієнтацією відносно поверхні підкладок. На слюді вони являли собою мозаїчні структури із орієнтацією площинами $\{111\}$ і напрямками $\langle 1\bar{1}0 \rangle$ паралельно до площини (001) і напрямків $\langle 100 \rangle$ та $\langle 010 \rangle$ слюди. Розміри кристалітів складали 0,1-0,5 мкм із кутом азимутальної розорієнтації до 5° .

Визначили залежності питомої електропровідності σ , сталої Холла R_H і рухливості носіїв μ від товщини осаджених плівок. Результати проведених експериментальних досліджень наведено на рис. 6.

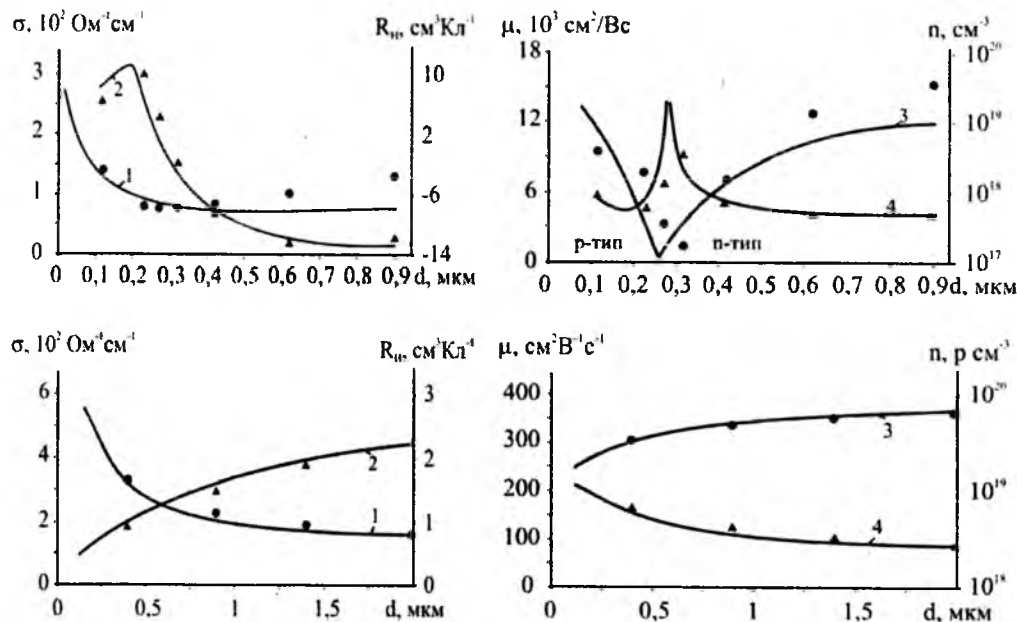


Рис. 6. Розподіл ефективних значень електричних параметрів (σ – 1, R_H – 2, μ – 3, n – 4) плівок PbTe за товщиною: n-тип (а); p-тип (б). ●, ▲ – експеримент; суцільні лінії – розрахунок за моделлю Петріца [22]

Видно (рис. 6), що у плівках існує розмірний ефект для досліджуваних електричних параметрів. Так, зокрема, із зменшенням товщини d плівок питома електропровідність зростає, особливо різко в області $d < 2$ мкм (рис. 6, крива 1). При цьому, якщо плівки PbTe осаджені на сколах (111) монокристалів BaF_2 за товщин менших за $d \sim 0,3$ мкм мають діркову провідність, то при більших значеннях товщини $d = 0,3$ -14 мкм переважає тільки електронна провідність (рис. 6, в, крива 2). Характерною ознакою для плівок PbTe, PbSe, PbS є зростання за абсолютною величиною постійної Холла R із збільшенням їх товщини d . Останнє вказує на зменшення концентрації основних носіїв згідно $R = \frac{1}{en}$

ростом товщини плівок, що і визначає зменшення питомої електропровідності σ і зростання рухливості носіїв μ (рис. 6). Відзначені ефекти, пов'язані із інтенсивним збагаченням пари на халькогени як більш леткі компоненти у сполуках на початкових етапах випаровування наважки. Це і обумовлює формування конденсату в області гомогенності на межі збагаченій на халькоген.

На рис. 7, враховуючи експериментальні результати і отримані вирази (15)–(18), наведено профілі вже локальних значень кінетичних коефіцієнтів для досліджуваних плівок. З (12) видно, що елементарні шари dz плівки вносять вклад в інтегральне значення R_H , пропорційний їхньому коефіцієнту Холла і питомій електропровідності, причому знак цього внеску може бути різним у залежності від знаку $R_H(z)$. При поширенні n-шару в глибину плівки його внесок росте, а внесок p-шару зменшується. При деякому положенні межі шарів R_H перетворюється в нуль (рис. 7, а, крива 2), а n прямує до нескінченності (рис. 7, а, крива 4).

З рис. 7 бачимо, що для вирощених описаним методом плівок мають місце суттєві неоднорідності електричних параметрів по товщині. Так, зокрема, для плівок PbTe, n-типу ефективні (рис. 6, а) і локальні (рис. 7, а) значення електричних параметрів виявляють біля підкладки область із дірковою провідністю. Зауважимо, що товщина p-шару визначається складом наважки, а також температурами випаровування та осадження. Встановлено, що підвищення температури підкладки, при збереженні сталими перших двох факторів, обумовлює зменшення товщини шару із дірковою провідністю.

Характерною особливістю співвідношень між ефективними та локальними значеннями електричних параметрів плівок є те, що в області реалізації p-n-переходу вони ведуть себе порізно. Ефективні значення концентрації носіїв заряду мають максимальні значення (рис. 6, а, крива 4), а їх локальні величини – мінімальні (рис. 7, а, крива 4). В той час як зміна холлівських рухливостей відбувається у протилежному напрямку: ефективні значення зменшуються (рис. 6, а, крива 3), а локальні – зростають (рис. 7, а, крива 3).

Іншою особливістю профілів електричних параметрів плівок n-типу є те, що з наближенням до поверхні локальні значення концентрації електронів зростають (рис. 7, а, крива 4).

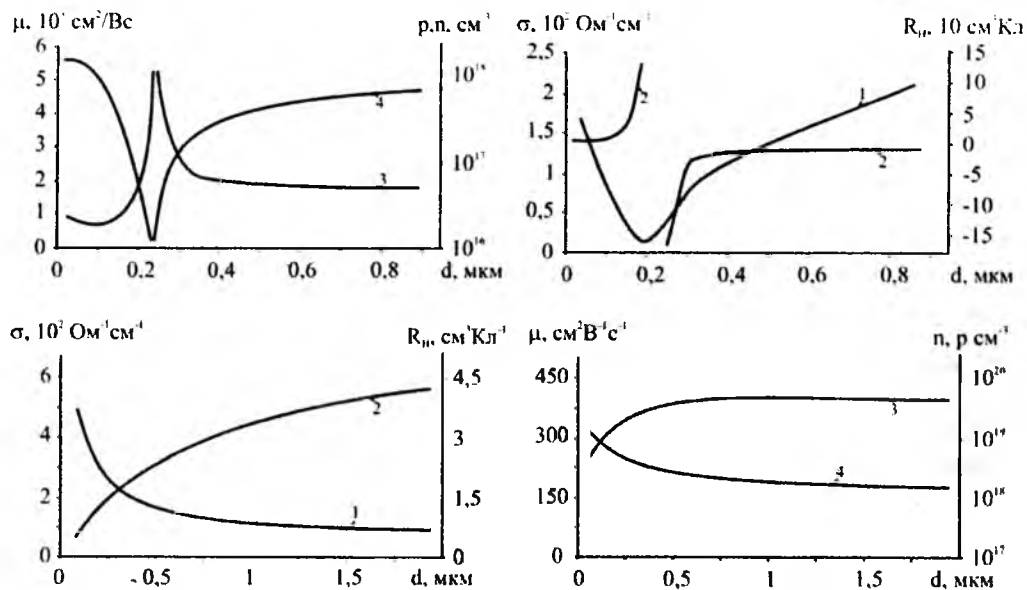


Рис. 7. Профілі розподілу локальних значень електричних параметрів (σ – 1, R_H – 2, μ – 3, n – 4) плівок PbTe: n-тип (а); p-тип (б). $z=0$ відповідає межі розділу плівка-підкладка

Ефективні і локальні електричні параметри плівок р-типу провідності подані на рис. 6, б і рис. 7, б відповідно. Для цих плівок має місце зменшення ефективних значень питомої електропровідності (рис. 6, б, криві 1), концентрації носіїв струму (рис. 6, б, криві 4) і зростання холлівської рухливості (рис. 6, б, криві 3) із збільшенням товщини плівок. Локальні електричні параметри плівок р-PbTe із віддаленням від підкладки, поведуться так само (рис. 7, б).

Відомо, що тип провідності у халькогенідах свинцю визначається, у першу чергу, власними точковими дефектами, пов'язаними із відхиленнями від стехіометричного складу. Встановлено, що для нелегованого матеріалу надлишок свинцю обумовлює вакансії у підгратці халькогену, які є донорами і визначають концентрацію електронів n-провідності, а надлишок телуру – відповідно, вакансії у катіонній підгратці які є акцепторами і визначають концентрацію дірок.

Експериментальні і розрахункові результати досліджень профілів концентрації носіїв струму у плівках як n-, так і р-типу провідності беззаперечно вказують на реалізацію таки того ж фізико-хімічного процесу. Він пов'язаний із збідненням конденсату на більш леткий компонент – халькоген у напрямку від підкладки до поверхні плівки. Це обумовлено тим, що вакансії халькогену у халькогенідах свинцю є донорами і їх збільшення призводить до зростання концентрації носіїв струму у електронному матеріалі і їх зменшення – у дірковому, що і спостерігається на експерименті (рис. 6, а, криві 4) і (рис. 6, б, криві 4) відповідно. Такий спрямований характер зміни дефектної підсистеми у тонкоплівковому матеріалі може бути зумовлений декількома чинниками. Одним із найбільш важливих є фракціонування складу наважки під час випарову-

вання і її збіднення на халькоген у процесі росту плівки. Інший чинник може бути пов'язаний із зміною складу вже вирощеної плівки у процесі повільного післяростового охолодження у вакуумі при закритій заслінці – ревіпаровування халькогену із вільної поверхні.

У будь-якому випадку неоднорідність плівок варто враховувати під час інтерпретації експериментальних результатів. Внаслідок неоднорідності провідності матеріалу по товщині, визначені з вимірювань ефекту Холла і електропровідності, концентрація і рухливість носіїв струму є деякими усередненими величинами, що залежать від профілю розподілу власних нестехіометричних дефектів. Більше того, навіть тип провідності в деяких випадках може бути усередненою величиною. Такий стан має місце, коли в плівці спостерігається р-n-перехід (рис. 6, а, криві 4).

III. Механізми розсіювання носіїв заряду у тонких плівках

3.1. Елементи теорії. Поверхня у тонких плівок завжди більша, ніж у масивних кристалах, тому крім розсіювання на фононах (акустичних і оптичних), кулонівському потенціалі, іонізованих дефектах, міжелектронному, які можна розрахувати у наближенні часу релаксації або варіаційним методом [20, 25], необхідно враховувати міжфазне та міжзернене розсіювання.

Вплив поверхні (міжфазне розсіювання) можна розділити за характеристичними довжинами [4]:

– рекомбінаційна довжина (λ_r), пов'язана із рекомбінацією надлишкових носіїв, що генеруються шляхом інжекції чи оптичного збудження. Вона важлива у процесах фотопровідності. Рекомбінаційна довжина визначається за формулою

$$\lambda_r = \sqrt{\frac{kT}{e} \mu \tau_r}, \quad (19)$$

тут μ , τ_r – відповідно рухливість і час релаксації фотопровідності, k – стала Боцмана, T – абсолютна температура, e – елементарний заряд. Для тонких плівок $\lambda_r \sim 50$ мкм, що суттєво перевищує їх товщину. Тому процеси поверхневої рекомбінації не відіграють важливої ролі у механізмах розсіювання;

λ_D – дебаєвська довжина, або довжина екранування визначає область просторового заряду і, як правило, вона значно менша за d . Для спрощення її впливу під час аналізу поверхневих ефектів у напівпровідникових матеріалах необхідно реалізувати умову $d \geq 5\lambda_D$;

λ_{D-B} – де-бройлівська довжина носіїв може сильно проявлятися у дуже тонких плівках ($d < 0,1$ мкм) за високих концентрацій носіїв ($n \geq 10^{18}$ см⁻³). За цих умов де-бройлівська довжина може бути співмірною із дебаєвською довжиною і товщиною плівки ($\lambda_{D-B} \approx \lambda_D \approx d$). При цьому слід очікувати сильного спотворення області просторового заряду, пов'язаного із ефектами квантування;

λ – середня довжина вільного пробігу носіїв, визначає роль процесів розсіювання у механізмах транспортних явищ. За умови, що середня довжина вільного пробігу стає співмірною із дебаєвською довжиною

($\lambda \approx \lambda_D$), має місце суміщення об'ємних і поверхневих процесів розсіювання. При $\lambda \approx d$ або $\lambda \approx D$ домінуючими механізмами можуть стати розсіювання на міжфазних межах або межах зерен відповідно. Оцінювання довжини вільного пробігу можна здійснити так:

$$\lambda = \frac{\mu h}{2e} \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{1/3}, \quad (20)$$

де n – концентрація носіїв, h – стала Планка.

Зауважимо, що для халькогенідів свинцю через значну концентрацію носіїв ($\sim 10^{18} \text{ см}^{-3}$) надзвичайно важко, або взагалі неможливо спостерігати поверхневі явища.

За умови, що механізми розсіювання є незалежними, а концентрація носіїв і їх ефективна маса малі у всіх областях конденсату, результуюча рухливість буде визначатися правилом Маттісена [4, 7]:

$$\frac{1}{\mu_{\text{exp}}} = \frac{1}{\mu_{\text{П}}} + \frac{1}{\mu_{\text{с}}} + \frac{1}{\mu_{\text{v}}}, \quad (21)$$

де μ_{exp} – експериментальне значення рухливості, $\mu_{\text{с}}$ – залишкова рухливість,

$$\mu_{\text{П}} = \frac{\mu_{\text{v}}}{(1 + \lambda/d)} - \text{поверхнева рухливість}, \quad (22)$$

μ_{v} – об'ємне значення рухливості.

У свою чергу, залишкова рухливість $\mu_{\text{с}}$ у нашому випадку визначається рухливістю на міжзеренних межах $\mu_{\text{с}}$ та рухливістю, пов'язаною із розсіюванням на дислокаціях невідповідності μ_{d} для епітаксійних структур на межі “підкладка (монокристал) – плівка”. Ці рухливості можна розрахувати із таких виразів [4, 9]:

$$\mu_{\text{h}} = \frac{2q}{h} D \left(\frac{3n}{\pi} \right)^{-1/3}, \quad (23)$$

$$\mu_{\text{d}} = \mu_{\text{v}} \left(1 - \frac{\pi R^2}{d} \sqrt{N_s} \right), \quad (24)$$

де N_s – щільність дислокацій, R – радіус просторового заряду, створеного дислокацією.

3.2. Дзеркальне розсіювання носіїв заряду. Монокристалічні плівки. Зазвичай припускається, що електрон провідності, досягаючи поверхні кристалу, зазнає хаотичного розсіювання при відбиванні із втратою дрейфового імпульсу. Такий підхід пов'язаний із тим, що поверхню, як правило, розглядають як область, що містить значні недосконалості і забруднення [26]. Проте, існуючі методи одержання досконалої поверхні до певної міри піддають сумніву такі судження [2]. Це зокрема стосується епітаксійних тонкопліткових структур, у яких атоми на поверхні розміщені так само, як і у паралельних кристалографічних площинах об'ємного кристалу. У такому випадку слід очікувати когерентного відбивання падаючої хвилі Блоха, тобто дзеркального відбивання. Ці припущення підтверджуються експериментально для епітаксійних плівок PbSe на основі дослідження впливу концентрації надлишкових носіїв на μ [27]. Додаткове підтвердження цього було отримано із температурної

залежності рухливості [4]. Так, зокрема, екстраполяція рухливості до 0 К дає значення $\mu \approx 5000 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$, а середня довжина вільного пробігу при концентрації дірок $n \approx 1,23 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-3}$ складає $\lambda \approx 0,1 \text{ мкм}$, що співпадає із товщиною плівок. За умови, якщо б поверхневе розсіювання відіграло б важливу роль, тоді середня довжина вільного пробігу починала б виявлятися вже за товщини $\sim d/2$, а рухливість знизилася до $2500 \text{ см}^2/\text{В}\cdot\text{с}$. Доведенням дзеркального механізму розсіювання в епітаксійних плівках PbSe є також експериментально спостережуване зростання величини рухливості носіїв струму для області малих товщин ($d < 1 \text{ мкм}$) (рис. 8).

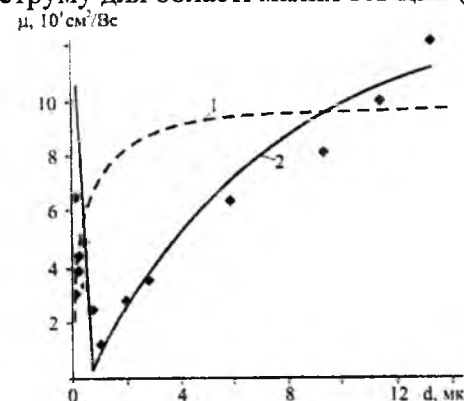


Рис. 8. Залежність холлівської рухливості носіїв (μ) від товщини (d) для монокристалічних плівок n -PbSe: 1 – розрахунок для дифузного розсіювання на поверхні; 2 – розрахунок за моделлю Петріца; ● – експеримент [27]

3.3. Дифузне розсіювання носіїв заряду. Якщо дзеркальне розсіювання зводиться тільки до зміни знаку нормальної до поверхні компоненти швидкості носіїв заряду, то у випадку повністю дифузного розсіювання змінюється і тангенціальна компонента швидкості [26]. При цьому сама швидкість набуває будь-якого напрямку у межах півкулі, описаної на поверхні напівпровідника. Стає зрозумілим, що за умови відсутності захоплення носіїв заряду на поверхні, повністю дифузне розсіювання описує максимально можливий вплив поверхні на їх рухливість. У ширшому наближенні поверхнева рухливість для повністю дифузного розсіювання описується співвідношенням (22).

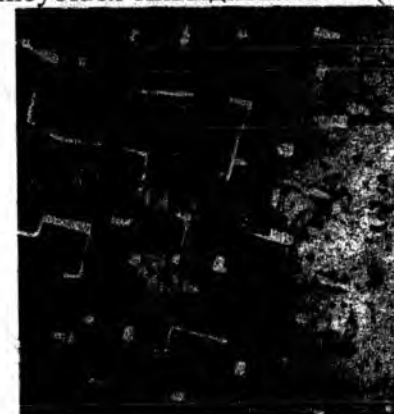


Рис. 9. Мікроструктура плівок PbSe на сколах (100) KCl [2]

У мозаїчних плівках (рис.9) слід враховувати розсіювання носіїв як на міжфазних, так і на міжзеренних межах, а також різних структурних дефектах. Всі описані чинники щодо масивних монокристалів (μ_v) визначають так звану залишкову провідність (μ_3).

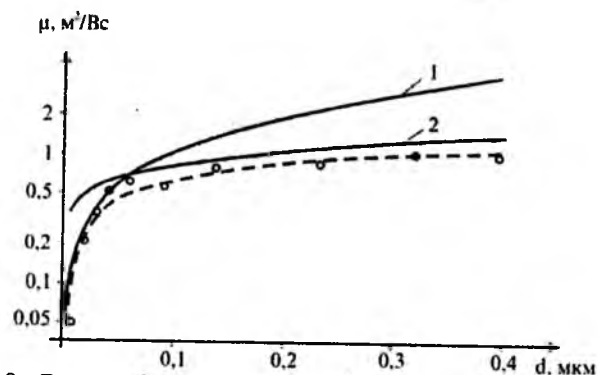


Рис. 10. Залежність рухливості носіїв струму (μ) плівок PbTe від товщини (d): \circ – експеримент; 1, 2 – розраховані значення поверхневої (μ_n – 1) і міжзеренної (μ_3 – 2) рухливостей [15]

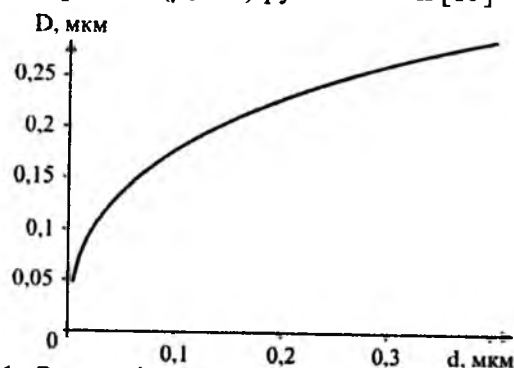


Рис. 11. Залежність лінійних розмірів кристалітів (D) плівок PbTe від їх товщини (d) [15]

На рис 10 зображено розділені поверхневу і залишкову рухливості для мозаїчних плівок PbTe від товщини [4]. Зауважимо, що для $d < 0,1$ мкм розрахована поверхнева рухливість μ_n добре корелює з результатами експерименту (рис. 10, крива 1). За умови реалізації розсіювання носіїв заряду на міжзеренних межах за товщини плівок, більших за 0,1 мкм (рис. 10, крива 2) розраховано залежність середніх лінійних розмірів зерен D у плівках від товщини d (рис. 11). Встановлено, що їх значення зростають із товщиною плівок за законом $D = 3,8 \cdot 10^{-5} d^{1/3}$, що узгоджується з результатами експерименту.

Беручи до уваги, що $\mu_v \sim T^{-5/2}$ (домінує розсіювання на довгохвильових акустичних фонах із врахуванням температурної залежності ефективної маси [20]) для мозаїчних плівок PbTe згідно (21) отримаємо постійне значення μ_3 (рис. 12). Вважаючи, що основну роль у розсіюванні носіїв струму для мозаїчних плівок відіграють міжзеренні межі, підставивши у вираз (23) знайдене значення $\mu_c \approx \mu_3$ (рис. 12) і концентрацію носіїв n, отримаємо, що розмір зерен D складає ~ 250 Å. Ця вели-

чина узгоджується із середніми відстанями між пустотами у плівці (рис. 9).

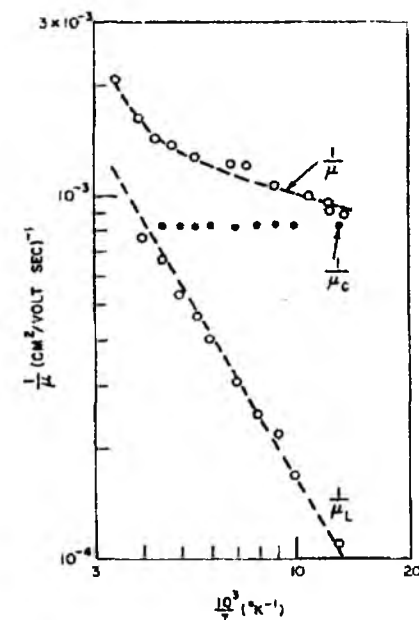


Рис. 12. Температурна залежність оберненої рухливості для плівок PbSe [4]

3.4. Залежність механізмів розсіювання від температури. З метою детального аналізу механізмів розсіювання у мозаїчних плівках у роботах [7,12] досліджено залежність холлівської рухливості носіїв заряду плівок халькогенідів свинцю від товщини для різних температур (рис. 13 – рис. 15).

Видно, що для всіх досліджуваних температур 77-300 K із зменшенням товщини плівок їх рухливість зменшується. При цьому особливо значна зміна величини рухливості характерна для області низьких температур 77-145 K. За товщини плівок, більших за 6 мкм характерна тенденція до насичення. Так само, як і для масивних зразків [8] підвищення температури призводить до зменшення абсолютного значення рухливості (рис. 13, а).

Зауважимо, що суттєвий вплив поверхневого розсіювання на значення рухливості носіїв заряду характерне для товщин менших за 1 мкм, що зумовлює їх значне зменшення (рис. 13, б). При цьому підвищення температури призводить до зсуву цієї межі на бік менших товщин.

Залишкову рухливість розраховано зі співвідношення (21) за відомими значеннями μ_{exp} , μ_n , μ_v зображено на рис. 13, в. Видно, що із збільшенням товщини плівки у зазначеному інтервалі, вона зростає на три порядки величини. Її зростання особливо помітне в області товщин, більших за 1 мкм за низьких температур.

З метою визначення домінуючого механізму розсіювання носіїв заряду для товщин плівки більших за 1 мкм проаналізовано температурну залежність залишкової рухливості $\mu_3(T)$ (рис. 14). Відомо [7], що температурну залежність рухливості для плівок товщиною d можна представити у вигляді

$$\mu_3 = \mu_0(d) \cdot T^{-n(d)}, \quad (25)$$

де $\mu_0(d)$ – стала величина, яка визначається параметрами матеріалу і залежить від товщини плівок; $n(d)$ – показник, який визначається переважанням конкретного механізму розсіювання у плівках для заданої товщини. Для достатньо досконалих плівок (монокристалів) хвалькогенідів свинцю $n \approx 2,5$. При поверхневому розсіюванні $n \approx 0,5$. Із розсіюванням на дефектах росту пов'язують значення параметра $n = 0,8$, а із розсіюванням на дислокаціях – $1,5 \leq n < 2,0$ [9].

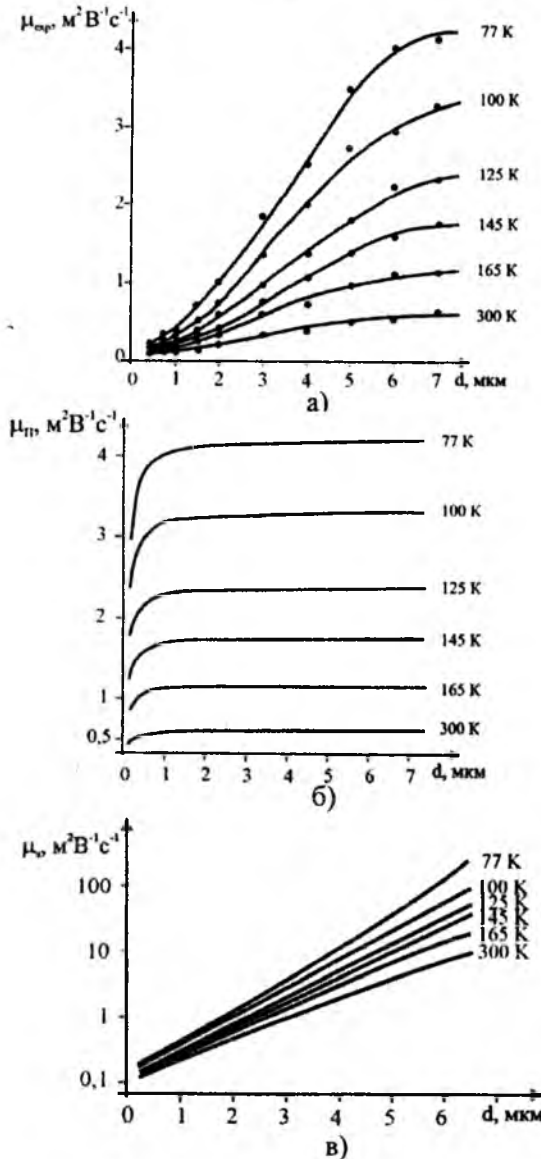


Рис. 13. Залежність ефективної $\mu_{\text{эф}}$ (а), поверхневої $\mu_{\text{п}}$ (б) та залишкової $\mu_{\text{з}}$ (в) рухливості плівок n-PbS від товщини d для різних температур [12]

Визначені показники n для плівок різної товщини наведено на рис. 15. Виявилось, що залежність $n(d)$ можна апроксимувати прямою лінією з аналітичним виразом

$$n(d) = 0,52 + 0,23d. \quad (26)$$

ям на дислокаціях – $1,5 \leq n < 2,0$ [9].

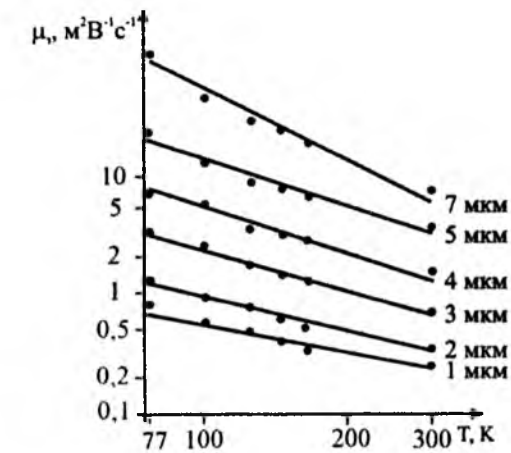


Рис. 14. Залежність залишкової рухливості $\mu_{\text{з}}$ від температури T для плівок n-PbS різної товщини [12]

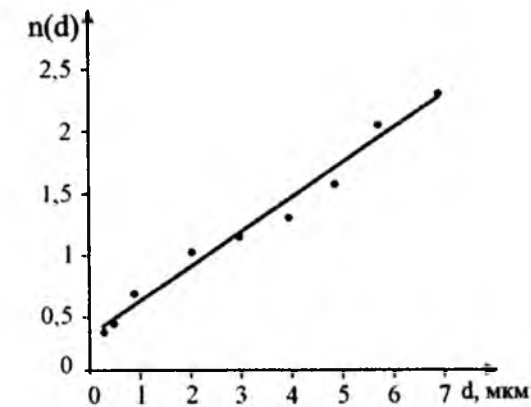


Рис. 15. Залежність показника n температурної залежності рухливості від товщини d (25) для плівок n-PbS [12]

Таким чином, для товщин плівок менших за 1 мкм $n \approx 0,5$, що підтверджує домінування розсіювання носіїв заряду на поверхні. Для більших товщин ($1 \text{ мкм} \leq d \leq 7 \text{ мкм}$) показник n зростає в межах $0,7 < n < 2,1$.

IV. Розсіювання носіїв заряду на дислокаціях невідповідності.

Гетероструктури

У епітаксійних гетероструктурах одним із важливих механізмів є розсіювання носіїв заряду на дислокаціях невідповідності (ДН). Як відомо [28], дислокації невідповідності утворюються на міжфазній межі “плівка-плівка” чи “плівка-підкладка” за рахунок різних значень параметра ґраток. Експериментальне підтвердження дислокацій невідповідності, які виникають на гетеромежі двошарової структури PbTe/PbSe показано на рис. 16 а, б.

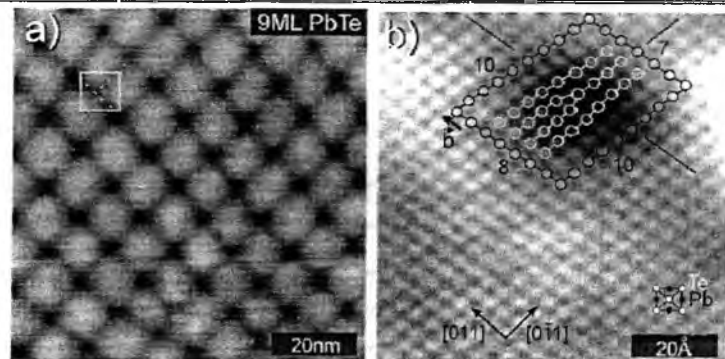


Рис. 16. Дислокації невідповідності, отримані за допомогою скануючого тунельного мікроскопа для гетероструктури PbTe/PbSe з орієнтацією кристалічних площин у напрямку (100): а – дислокації невідповідності на гетеро межі плівок; б – опис дислокації невідповідності за допомогою вектора Бюргерса рівного $\vec{b} = a/2 \langle 011 \rangle$, дислокації сформовані в напрямку $\langle 0\bar{1}1 \rangle$ [28]

Межі у двофазних епітаксійних структурах можна розглядати як заряджені включення – деякі мікрообласті електростатичного поля, які призводять до зменшення рухливості носіїв заряду. Так, зосереджена дислокація у кристалі n-типу є не що інше як лінійний негативний заряд, навколо якого скупчений позитивний і вже від’ємний заряд. Носій заряду – електрон, який рухається у електростатичному полі дислокації зазнає розсіювання [29]. Якщо носії заряду рухаються паралельно до дислокацій, то вони будуть захоплюватися акцепторними рівнями і провідність цих носіїв здійснюється через об’єм дислокацій. У випадку руху носіїв перпендикулярно до лінійних дефектів, вони будуть розсіюватися циліндрами просторового заряду. Тому необхідно врахувати їхній вплив на транспорт носіїв. За умови, що дислокації невідповідності формують двовимірну мережу циліндрів (рис. 17, а,б) а також, що провідність носіїв заряду вздовж ліній дислокацій рівна провідності, яка перпендикулярна до циліндра просторового заряду і присутній випадковий розподіл дислокацій невідповідності, рухливість носіїв буде визначатись густиною дислокацій, відношенням концентрації носіїв в об’ємі структури до концентрації всередині циліндра просторового заряду [29]. За умови, що кількісну характеристику густини дислокацій описує величина

$$\gamma \equiv l_1/l_0,$$

відношення площі поверхні дислокацій до площі поверхні гетерограниці буде визначатись $\varepsilon = (1+\gamma)^2$ (рис. 17).

Якщо n_t , μ_t , і σ_t – значення в об’ємі дислокаційних циліндрів; n_0 , μ_0 , і σ_0 – в об’ємі плівки; \bar{n} , $\bar{\mu}$, $\bar{\sigma}$ – середні значення по цілому зразку, тоді відносна рухливість, що визначає вплив дислокацій, буде

$$\beta \equiv \mu_t/\mu_0,$$

де μ – рухливість носіїв, n – концентрація носіїв, σ – питома електропровідність відповідно.



Рис. 17. Геометрична модель дислокацій невідповідності: а – для малої площі зарядженого просторового циліндра дислокацій; б – площа дислокацій є великою. l_1 – ширина області просторового заряду дислокацій, l_0 – міждислокаційна відстань [29]

Якщо $\gamma \ll 1$ відносна рухливість за малих значень γ визначиться як

$$\frac{\bar{\mu}}{\mu_0} = \left[\frac{1}{\beta(n_t/n_0) + \gamma} + \frac{\gamma}{1 + \gamma} \right] \left[\frac{(1 + \gamma)^2 \beta}{(n_0/n_t) + \gamma(2 + \gamma)} \right]. \quad (27)$$

Для великої густини дислокацій невідповідності ($\gamma > 1$) буде:

$$\frac{\bar{\mu}}{\mu_0} = \beta \left\{ 1 - \varepsilon \left[\frac{\beta - (n_0/n_t)}{\beta + (\beta + (n_0/n_t))} \right] \right\}^{-1} \left[1 - \varepsilon \left(1 - \frac{n_0}{n_t} \right) \right]^{-1}. \quad (28)$$

Аналіз співвідношень (27) і (28), а також їх просторових діаграм (рис. 18) однозначно вказують на зменшення величини рухливості носіїв заряду із збільшенням густини дислокацій: $\bar{\mu}/\mu_0$ спадає із зростанням γ . Останнє обумовлено збільшенням внеску розсіювання на дислокаціях невідповідності. При $\gamma = 0$ рухливість в об’ємі плівок і на гетеро межі співпадають ($\bar{\mu}/\mu_0 = 1$, рис. 18), що відповідає відсутності дислокацій невідповідності.

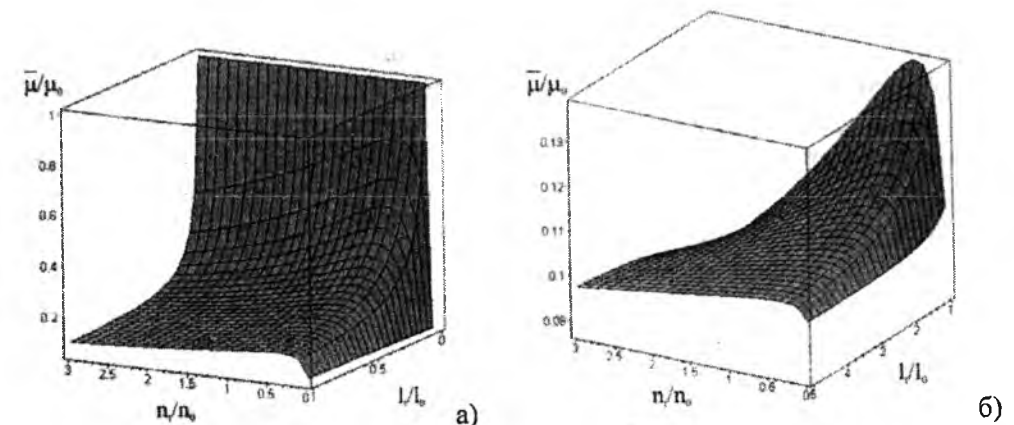


Рис. 18. Залежність відносної рухливості $\bar{\mu}/\mu_0$ плівок гетероструктури PbTe/PbSe від значень відносних концентрацій n_0/n_t та густини дислокацій γ : а – мала густина ($0 < \gamma < 1$), б – велика густина дислокацій ($1 < \gamma < 5$) [28]

Зауважимо, що це можливо тільки при ідеальному співпаданні значень параметрів ґраток гетероепітаксійних структур. Рухливість носіїв із зростанням концентрації вільних носіїв (n_0/n_i – зростає) зменшується (рис. 18), що є характерним для напівпровідників взагалі [20]. У нашому випадку за рахунок обмеженої провідності непровідної дислокаційної області, вільні носії переважно будуть знаходитись в об'ємі гетероструктури. Це і обумовлює зростання розсіювання носіїв між собою і, відповідно, зменшення спостережуваної рухливості.

Встановлені вище загальні закономірності мають деякі відхилення для області малих ($n_0/n_i < 0,5$) і великих ($n_0/n_i > 2$) значення відносної концентрації вільних носіїв (рис. 18). У першому випадку $\bar{\mu}/\mu_0$ при подальшому зменшенні концентрації вільних носіїв в об'ємі (n_0) починає спадати (рис. 18, а). Це обумовлено переважанням провідності на заряджених дислокаційних циліндрах, по відношенню до об'ємної, що є причиною зменшення величини рухливості і більш ефективного впливу дислокацій невідповідності на механізми розсіювання. При великих ж концентраціях носіїв їх рухливість стає не чутливою до густини дислокацій і тому рухливість має тенденцію до насичення (рис. 18, б) внаслідок переважання об'ємної провідності.

Висновки

1. Запропоновано модель тонкоплівкової структури із міжфазними і міжзеренними межами.
2. Розраховано внесок розсіювання носіїв заряду на міжзерених межах у мозаїчних і полікристалічних плівках у залишкову рухливість.
3. У рамках двошарової моделі Петріца визначено роль поверхні у формуванні електричних властивостей тонких плівок.
4. Проаналізовано особливості явищ перенесення за умови реалізації дзеркального і дифузного розсіювання носіїв заряду поверхнями плівок.
5. Розглянуто вплив дислокацій невідповідності у епітаксійних гетероструктурах на розсіювання носіїв заряду та їх рухливість.

Література

1. Holloway H. Thin Films IV-VI semiconductor photodiodes / H. Holloway // Physics thin films. – New York, 1980. – №11. – P. 105-203.
2. Фреїк Д.М. Фізика и технология полупроводниковых пленок / Д.М. Фреїк, М.А. Галушак, Л.И. Межиловская. – Львов, Вища школа, 1988. – 152 с.
3. Zemel J.N. Recent developments in epitaxial IV-VI films / J.N. Zemel // J. Luminescence. – 1973. – №7. – P. 524-541.
4. Поверхностные свойства твердых тел / под. ред. М. Грина. – М.: Мир. – 1972. – 432 с.
5. Jensen J.D. Surface charge transport in PbS_xSe_{1-x} and $Pb_{1-y}Sn_ySe$ epitaxial films / J.D. Jensen, R.B. Schoolar // J. Vac. Sci. Technol. – 1976. – №13, 4. – P. 920-925.

6. Бойков Ю.А. Влияние приграничных слоев на свойства тонких пленок теллурида свинца / Ю.А. Бойков, В.А. Кутасов // Физика твердого тела. – 1983. – №25, 10. – С. 2984-2987.
7. Thickness Dependence of Hall Mobility of HWE Grown PbTe Films / P.R. Vaya, J. Majht, B.S.V. Gopalam, C. Dattatrepan // Phys. Stat. Sol. (a). – 1985. – №87, 341. – P. 341-350.
8. Размерные эффекты в поликристаллических пленках PbTe / Ю.А. Браташевский, В.Д. Окунев, Н.Н. Пафомов, З.А. Самойленко // Физика твердого тела. – 1985. – №27, 3. – С. 723-729.
9. Подвижность носителей заряда в двухслойных структурах PbTe/PbS / О.А. Александрова, Р.Ц. Бондоков, Н.В. Саунин, Ю.М. Таиров // Физика и техника полупроводников. – 1998. – №32, 9. – С. 1064-1068.
10. Направленные неоднородности концентрации носителей заряда в эпитаксиальных пленках сульфида свинца / В.И. Левченко, Л.И. Постнова, В.В. Дикарева, Т.Л. Черная, И.В. Пуляева // Неорганические материалы. – 1993. – №29, 11. – С. 1470-1472.
11. Бондаренко В.В. Электрон-фононное взаимодействие и подвижность электронов в квантово-размерных структурах II типа PbTe/PbS / В.В. Бондаренко, В.В. Забудський, Ф.Ф. Сизов // Физика и техника полупроводников. – 1992. – №32, 6. – С. 739-742.
12. Рухливість носіїв заряду і механізми їх розсіювання в плівках сульфідів свинцю / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, І.В. Калитчук, В.М. Кланічка // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – №5, 2. – С. 302-306.
13. Особливості розсіювання носіїв заряду в епітаксійних структурах на основі халькогенідів свинцю / Д.М. Фреїк, В.Ф. Пасічник, О.Л. Соколов, Б.С. Дзундза // Фізика і хімія твердого тіла. – 2004. – №5, 3. – С. 401-403.
14. Електричні властивості епітаксійних плівок PbSnSe у моделях Петріца і дифузного розсіювання / Д.М. Фреїк, О.Л. Соколов, Г.Д. Матеїк, Б.С. Дзундза, В.Ф. Пасічник // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – №6, 1. – С. 354-357.
15. Фреїк Д.М. Вплив поверхні і міжзерених меж на рухливість носіїв у тонких плівках телуриду свинцю / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Г.Д. Матеїк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2005. – №6, 2. – С. 251-253.
16. Розсіяння носіїв заряду в епітаксійних плівках PbTe / Д.М. Фреїк, В.Ф. Пасічник, О.Л. Соколов, Б.С. Дзундза // Український фізичний журнал. – 2005. – №50, 11. – С. 1250-1252.
17. Фреїк Д.М. Моделі процесів відпалу полікристалічних плівок телуриду свинцю / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Я.П. Салій // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – №7, 1. – С. 45-49.
18. Колосов С.А. Электрические свойства мелкозернистых поликристаллов CdTe / С.А. Колосов, Ю.В. Клевков, А.Ф. Плотников // Физика и техника полупроводников. – 2004. – №38, 4. – С. 473-478.
19. Перенесення носіїв струму у дрібнодисперсних плівках кадмій і плюмбум телуридів / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза, Г.Д. Матеїк, Ю.В. Кланічка // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – №7, 2. – С. 245-247.
20. 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.
21. Фреїк Д.М. Вплив поверхні і міжкристалічних меж на електричні властивості тонких плівок телуриду свинцю / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза // Фізика і хімія твердого тіла. – 2006. – №7, 4. – С. 673-676.

22. Petritz R.L. Theory of an Experiment for Measuring the Mobility and Density of Carriers in the Space-Charge Region of a Semiconductor Surface / R.L. Petritz // Phys. Rev. – 1958. – №110, 6. – P. 1254-1262.
23. Фреїк Д.М. Ефективні і локальні значення електричних параметрів у полікристалічних плівках телуриду свинцю / Д.М. Фреїк, Я.П. Салій, О.Я. Довгий // Фізика і хімія твердого тіла. – 2001. – Т. 2. – № 4. – С. 711–718.
24. Довгий О.Я. Напрявлені неоднорідності в епітаксійних плівках телуриду свинцю при вакуумному відпалі / О.Я. Довгий // Фізика і хімія твердого тіла. – 2002. – Т. 3. – № 4. – С. 161-168.
25. Метод часу релаксації і варіаційний підхід у аналізі явищ переносу в напівпровідникових кристалах $A^{IV}B^{VI}$ / Д.М. Фреїк, Л.І. Никируй, О.І. Ільків, О.М. Возняк // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – №8, 3. – С. 451-456.
26. Ржанов А.В. Электронные процессы на поверхности полупроводников / А.В. Ржанов. – М.: Наука, 1971. – 490 с
27. Фреїк Д.М. Вплив структурної завершеності плівок селеніду свинцю на механізми розсіювання носіїв струму / Д.М. Фреїк, Б.С. Дзундза // Фізика і хімія твердого тіла. – 2007. – №8, 1. – С. 71-74.
28. Фреїк Д.М. Вплив дислокацій невідповідності на рухливість носіїв заряду в двошарових епітаксійних структурах на основі сполук $A^{IV}B^{VI}$ / Д. М. Фреїк, О. Л. Соколов, Ю. В. Кланічка // Вісник Прикарпатського університету. Математика. Фізика. – 2007. – В.3. – С. 65-71.
29. Neumark G.F. Theory of the Influence of Misfit Dislocations on Interfacial Mobility and Hall Effect / G.F. Neumark // Phys. Rev. (b). – 1970. – №1, 6. – P. 2613-2622.

*Стаття поступила в редакційну колегію 12.10.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Мельником П.І.*

FEATURES OF TRANSPORT PHENOMENA IN LEAD CHALCOGENIDE THIN SEMICONDUCTOR FILMS (review)

D. M. Freik, B. S. Dzundza, Y. V. Klanichka

*Precarpathian National University named by Vasil Stefanic;
76000, Ivano-Frankivs'k, Shevchenko street, 57; e-mail: freik@pu.if.ua*

There are the review of science papers, devoted research of classic size effect in lead chalcogenide 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: thin tapes, halcogenid of lead, transport phenomena, mechanisms of dispersion.

Нафтогазова справа

УДК 622.24

ІНЖЕНЕРНИЙ ВНЕСОК В ТЕХНОЛОГІЮ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА ПРИКАРПАТТІ ПІСЛЯ 1939 РОКУ

Р. С. Яремійчук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: public@nung.edu.ua*

Описано розвиток технології буріння свердловин на Прикарпатті в період 1945-2000 рр. Розглядаються технології буріння з використанням стисненого газового потоку, буріння стовбурів свердловин великого діаметра, надглибоких свердловин, а також свердловин зі складним профілем.

Ключові слова: буріння стовбурів свердловин великого діаметра, буріння розгалужено-горизонтальних свердловин, буріння реактивно-турбінними бурами, промивальні рідини, тампонування свердловин, освоєння свердловин.

В кінці 1939 після приєднання Західної України до Радянського Союзу створено п'ять великих промислів, які увійшли до тресту “Укрнафтовидобуток”.

У 1940 році цей трест пробурило 65973 м гірських порід, в тому числі 2554 м розвідувальних. При цьому одна Бориславська контора буріння пробурила 40933 м, а в бурінні перебувало 74 свердловини

За період німецької окупації в Бориславі пробурено лише 123 неглибоких свердловини, в тому числі на ділянці МЕР – двадцять свердловин глибиною до 400 м. У Східниці – свердловина СК 1-27, в Уричі – Ур 1-5. У Роточині пробурені глибокі свердловини – “Роточин-28” (глибина 1959 м), “Павло-4” (глибина 1450 м), на Водянці “Герта” (глибиною 1287 м).

У 1943 році були відновлені розвідувальні роботи на площі “Помірки”, де почали бурити свердловини П-1 та П-2 і де вперше було освоєно обертове буріння та централізоване забезпечення буровим глинистим розчином.

Одна з останніх свердловин, що бурилася в Бориславі ударним способом була “Ніагара-5” (жовтень 1944 – березень 1948 р.).

Табл. 1. Дані про обсяги буріння свердловин на Прикарпатті з 1945 до 1995 рр

Роки	Всього, тис. м	В тому числі			
		геолого-розвідувальне буріння, тис. м	експлуатаційне буріння, тис. м		
			всього	в тому числі	
			на нафту	на газ	
1945	20,6	5,2	15,4	16,4	2,0
1946-1950			61,8	20,1	41,7
1950	84,2	75,1	9,1	2,2	6,9
1951-1955			41,7	38,6	3,1
1955	64,4	51,2	13,2	13,2	–
1956-1960			304,9	245,7	59,2
1960	228,3	135,1	93,2	75,3	17,9
1961-1965			681,0	582,2	98,8
1965	427,2	244,9	182,3	132,9	49,4
1966-1970			786,4	623,1	163,3
1970	332,9	198,5	134,4	10,4	30,0
1971-1975			430,9	346,1	84,8
1975	200,1	125,7	74,4	66,3	8,1
1976-1980			404,8	335,0	69,8
1980	199,0	104,2	94,8	73,2	21,6
1981-1985			329,3	286,1	43,2
1985	163,7	126,6	37,1	37,1	–
1986-1990			189,8	140,8	49,0
1990	109,7	80,7	29,0	24,8	4,2
1991-1995			186,8	126,4	60,4
1995	68,3	19,7	48,6	31,8	16,8

В період 1945-1995 рр. було пробурено 5 млн. 880 тис. м пошуково-розвідувального і 3 млн. 228 тис. експлуатаційного метражу. В таблиці 1 зведено дані про динаміку зміни обсягів буріння за цей період. За цей час з'явилися нові технології буріння, потужне бурове устаткування, йшло невпинне їх удосконалення.

Для Прикарпатського нафтогазового регіону найбільший розквіт геолого-розвідувальних бурових робіт та експлуатаційного буріння припав на кінець 50-х років та наступні двадцять років.

Вже в 1945 році було пробурено 7342 метри. Для підготовки місцевих кадрів групу Бориславських нафтовиків відправили на навчання в Азербайджан. Серед них були Євстахій Гринчак, Роман Дудурак, Михайло Желем, Дмитро Мицак. Всі вони потім багато років працювали буровими майстрами.

Виконання таких масштабних бурових робіт вимагало використання великої кількості спеціалістів – інженерів-буровиків. І “Львівська політехніка” у 50-і – 60-і роки ХХ ст. підготувала їх.

Серед цих інженерів було багато по-справжньому великих та талановитих людей – організаторів виробництва: Петро Тюпін, Борис Чайковський, Василь Стюпкін, Олександр Скачедуб, Іван Діак, Василь Пушкар, Петро Шинкарик, Євген Іваницький, Володимир Дітчук, Михайло Агапчев, Йосип Андрійчук, Микола Касіян, Роман Сенів, Ярослав

Струс, Володимир Жданков, Григорій Питляр, Ярослав Гірник, Богдан Кобрин, Зіновій Білий, Любомир Гураль, Едуард Піддубний, Борислав Крих, Мирон Іванів, Олексій Янкевич, Яків Коршунов, Микола Пекарський, Борис Буняк, Леонід Архіпов, Богдан Прокопець, Омелян Мрозек, Орест Жарський, Омелян Камінський, Олег Дудар та багато інших. Напружена праця передчасно їх зношувала і дуже багато інженерів-буровиків не доживало до 60-ти років, а деякі помирали від тяжких та невиліковних хвороб.

Це нове покоління українських інженерів-буровиків, отримавши добру фахову освіту у Львівській політехніці, було дуже чутливим до сприйняття досягнень науки та техніки. В цей час зменшується число аварій в бурінні, вводяться нові системи бурових розчинів, удосконалюється технологія цементування свердловин, освоюється технологія буріння похило-скерованих свердловин, буріння стовбурів великого діаметра, і в решті решт в 70-х роках у великій кількості буряться надглибокі свердловини, апогеєм яких стало буріння свердловини № 1 Шевченкова на глибину 7522 м. Цей рекорд глибини так і не був переkritий впродовж багатьох років аж донині.

Буровики Передкарпаття навчилися бурити свердловини різного призначення, до малих або великих глибин, проходити гірські породи з нормальними чи аномально-високими або аномально-низькими пластовими тисками, при підвищених або навіть дуже високих пластових температурах.

70-і роки відзначені видатними досягненнями Прикарпатських нафтовиків – тут пробурили 11 розгалужено-горизонтальних свердловин при глибинах залягання продуктивних пластів від 2500 до 3500 м. При цьому використовувалася досконала, як на той час, українська техніка та технологія – електробури та телесистеми, механізми викривлення, що поставлялися з Харкова, а технологія спорудження таких свердловин відпрацьовувалися Долинськими та Бориславськими буровиками разом зі спеціалістами ВНДІ бурової техніки (Москва, Івано-Франківськ).

В 1947 році вперше на свердловині № 1560м (на Потоці, Борислав), якою керував Дмитро Мицак, застосовували турбінне буріння. В цьому ж році турбінне буріння застосували на свердловині № 1565м (буровий майстер Євстахій Гринчак).

Того часу у Бориславі працювали відомі інженери К. Стукалов, М. Олов'янов, К. Гаврилкевич, які розробили багато нового. Головний інженер контори буріння А. Асланов впровадив коронку-фрез для відбору керна при обертвовому (ротаторному) бурінні, М. Олов'янов і К. Шумілов розробили сито-конвейер для очистки бурового розчину СКОШ.

Вже у 1952 році роторний спосіб буріння поступається турбінному, в цьому році 72% метражу пробурено саме цим методом.

В 1961 році при бурінні поляницьких відкладів на свердловині № 21 Орів (буровий майстер Ярослав Кулиняк) були випробувані алмазні долота діаметром 188 мм фірми Крістенсен.

Буріння свердловин з продуванням вибою стиснутими газами почалося вперше в колишньому СРСР теж на Прикарпатті. З 1965 року аж до кінця 70-х років цей метод використовувався на десятках свердловин. Розбурювались воротищенські, поляницькі, стрийські, менілітові та

інші відклади. Розширенню обсягів буріння цим способом сприяло те, що ВНДІБТ передав своєму Українському відділу десять пересувних компресорів високого та низького тисків фірми Піньоне. Освоєння цієї технології йшло під науковим керівництвом А. Борзова, Ю. Лопатіна, І. Елманова з участю українських інженерів І. Белея, М. Шумади, Г. Семака, Д. Бігуна, В. Лотовського та інших. Своєрідний експеримент був поставлений в Надвірній при активному сприянні О. М. Янкевича, тодішнього начальника Управління бурових робіт – розкриття менілітових відкладів на Битківському родовищі з продувкою вибою повітрям та введенням ПАР, стиснутим азотом та природним газом.

Конструкції свердловин

При бурінні глибоких розвідувальних свердловин на площах Передкарпаття застосовувалися три- і чотириколонні конструкції. На газових родовищах з невеликими (до 2000 м) глибинами залягання продуктивних горизонтів, нормальними пластовими тисками і низькими початковими дебітами (до 50 тис. м³/добу) використовують такі конструкції свердловин: 245x168x114 мм.

Спільними зусиллями бурових підприємств і науково-дослідних організацій розроблені технологічні регламенти, погоджені з альбомом конструкцій свердловин, типорозмірами бурових доліт і режимами їхніх відробок, а також компоновки низу бурильної колони, бурові та тампонажні розчини під кожну обсадну колону. На основі цих альбомів та регламентів розроблено і впроваджено систему автоматизованого проектування САПР – буріння. Проектними організаціями укладено атласи конструкцій свердловин, авторами яких були відомі спеціалісти України – О. М. Черняков, І. С. Фіногенов, О. П. Сельващук, Л. Л. Лушков, В. В. Кравець, В. І. Орлов, Б. А. Тершак, Ю. П. Процько та інші.

Для спорудження свердловин на перспективних площах Передкарпаття залежно від призначення, умов і глибини буріння здебільшого використовувались дво- або триколонні конструкції з таким поєднанням обсадних колон – 426x324x245x146 мм. В табл. 3 наведені типові проектні конструкції свердловин для площ Передкарпаття.

Найглибша в Україні свердловина Шевченкова-1 пробурена в 1971-74 рр. з метою вивчення глибинної будови Долинського нафтового району. В табл. 4 наведена проектна і фактична конструкції цієї надглибокої свердловини.

Особливість фактичної конструкції свердловини Шевченкова-1 полягала в тому, що верхня секція (0-1200) 245 мм проміжної колони була змінною і не цементувалась. На випадок зносу труб це давало змогу повертати або замінювати секцію. Третя проміжна колона була спущена із заміною верхньої секції 245 мм труб через можливе розкриття пластів з високими тисками.

Буріння розгалужено-горизонтальних свердловин

Серед здобутків буровиків і до сьогодні вражають деякі досягнення 50-х років: в березні 1954 року в Бориславі пробурена перша розгалужено-горизонтальна свердловина № 1543. В цій свердловині під різними азимутами пробурені п'ять стовбурів з відстанню між вибоями від 40 м до 120 м (цими роботами керував О.М. Григорян); в 1957 – 1958 роках на ділянці МЕРП пробурили ще три розгалужено-горизонтальні свердло-

вини – № 1544 (серпень, 1957), № 1545 (лютий, 1958), № 1546 (жовтень, 1958).

Дебіт цих свердловин перевищував дебіт старих навколишніх свердловин в 4 рази. З цих свердловин протягом наступних п'ятнадцяти років одержали 48091 тонн нафти. В січні 1959 року на ділянці "Помірка" пробурили розгалужено-горизонтальну свердловину № 15 до глибини 1697 м трьома стовбурами.

Табл. 2. Конструкції надглибоких свердловин на Прикарпатті

Свердловина	Діаметр колон, мм			
	Глибина спуску, м			
Вишків-1	426	324	245	168×146
	1300	3000	5000	6200
Синевидне-1	426	299	245×219	168×146×127
	900	4000	6000	6800

Табл. 3. Проектні конструкції свердловин

Свердловина	Діаметр колон, мм			
	Глибина спуску, м			
Доброміль-Стрільбичі 34п (пошукова)	426	324	245	168×146
	150	3020	4600	5600
Південний Гвізд 7р (розвідувальна)	324	245	168×146	
	150	3000	4000	
Новосхідницька 55е (експлуатаційна)	426	324	245	168×146
	100	2650	4200	5000
Завадівська 61, 72, 73е (експлуатаційна)	426	324	245	168×146
	100	1500	4400	4900

Табл. 4. Конструкція свердловини Шевченкова-1

Проектна		Фактична	
Колона	Глибина, м	Колона	Глибина, м
Кондуктор 426 мм	150	Кондуктор 426 мм	150
Проміжна колона 324 мм	3500	Проміжна колона 324 мм	3000
Проміжна колона 245 мм	3400-5500	Проміжна колона 245 мм	5522
Хвостовик 194 мм	5400-6500	Проміжна колона 245x194 мм	7022
Експлуатаційна колона 168x146x127 мм	7000	Відкритий стовбур 164 мм	7520

Буріння перших в Україні горизонтальних свердловин було започатковано саме в Бориславі. Для цього були розроблені методи орієнтування долота разом з кривим перехідником та турбобурами.

Як уже згадувалось, першою на Прикарпатті розгалужено-горизонтальною була свердловина № 1543 на Бориславському родовищі (ділянка МЕРП). Нафтонасиченими колекторами тут є ямненські пісковики, які залягають на глибині 450-500 м. Продуктивний розріз цього

родовища представлений прошарками пісковиків, глин та сланців. Загальна товщина продуктивної частини становить 40-50 м. Даний поклад експлуатувався густою сіткою свердловин, пробурених у різні часи (починаючи з 1914 р.) на відстані 30-80 м одна від одної. На невеликій площі експлуатувалось 23 вертикальних свердловини із дебітом від 0,1 до 2,0 т за добу. На свердловині № 1543 забурювання розгалужено-горизонтальних стовбурів здійснювалось турбінним відхилювачем з використанням доліт \varnothing 295 мм. Для збереження колекторських властивостей розбурюваних пластів застосовувався буровий розчин із водовіддачею 4-5 см³ / 30 хв, густиною 1,12-1,14 г/см³ і в'язкістю 50-60 с. Кривизна свердловини вимірювалась через кожні 15-20 м проходки. При кутах нахилу 50° і більше здійснювався примусовий спуск приладів. Регулярний відбір шламу (через кожні 2 м) і періодичний відбір керна давали можливість стежити за розбурюваними породами і своєчасно скеровувати напрям окремих стовбурів. У свердловині в різних напрямках пробурено п'ять різко викривлених стовбурів: перший довжиною 350-530 м; другий – 448-522 м; третій – 455-491 м; четвертий – 470-495 м; п'ятий – 380-422 м. Кінцеві кути нахилу окремих стовбурів – від 45 до 72°, а відстань між вибоями – від 40 до 120 м.

Після кріплення стовбурів попередньо перфорованими хвостовиками свердловина була освоєна і вступила в експлуатацію з початковим дебітом нафти 28 т / добу. В той час дебіт сусідніх навколишніх свердловин не перевищував 1 т/добу.

Протягом 1957-58 рр. на ділянці МЕР Бориславського родовища за аналогічною конструкцією і технологією пробурено ще дві розгалужено-горизонтальні свердловини №№ 1544 і 1546. Горизонтальна свердловина № 1544 пробурена з одним горизонтальним стовбуром довжиною 100 м, який під великим кутом пересік нафтонасичений пісковик. Після освоєння свердловина вступила в експлуатацію із дебітом 16 т/добу. Свердловина № 1546 пробурена трьома стовбурами. Після кріплення їх перфорованими хвостовиками і освоєння друга свердловина дала 12 т нафти за добу.

В січні 1959 р. введено в експлуатацію розгалужено-горизонтальну свердловину 15-Помірки. Свердловина пробурена трьома способами. Глибина основного з них становила 1697 м.

Після трьох років експлуатації згадані свердловини працювали із дебітом від 6 до 8 т, причому падіння видобутку в них було повільніше, ніж у звичайних вертикальних свердловинах. Вартість багатобійних розгалужено-горизонтальних свердловин порівняно із вертикальними була в 1,5-2,5 рази вищою, причому дорожчими виявились перші свердловини. В процесі подальшої експлуатації свердловин із незацементованим фільтром мало місце обводнення продукції, що послужило причиною тимчасового поспішного припинення буріння розгалужено-горизонтальних свердловин на Прикарпатті.

Буріння таких свердловин (на якісно вищому рівні) було відновлено аж через 15 років в Долинському УБР з ініціативи Я. Ф. Гельфгата,

О. М. Григоряна та за участю інженерів В. М. Дітчука і А. М. Мельничука. Ними розробляється та втілюється великомасштабний проект буріння розгалужено-горизонтальних свердловин на підвернутому крилі Долинського родовища. Першою розгалужено-горизонтальною свердловиною в Долинському нафтопромисловому районі була 801-Долинська, яка була забурена 1972 року. Технологічний контроль за проведенням цієї та інших розгалужено-горизонтальних свердловин здійснювали к.т.н. Ф. Фоменко та інж. Я. Й. Гірник. Після спущеного 324 мм кондуктора на глибину 166 м буріння вертикального інтервалу до 1704 м здійснювалось електробурами Е250/8 і Е240/8 в поєднанні із тришарошковими долотами \varnothing 295 мм і долотами \varnothing 267 мм, армованими надтвердим сплавом "Славутич". Для орієнтування відхилюючих компоновок і набору кривизни застосовувались телеметричні системи СТЕ-215 і механізми викривлення одинарної і подвійної дії МВ-240-1⁰30', МВ-215-1⁰х1⁰30' і МВ-215-1⁰30' х1⁰30'.

Забурювання відгалужень проводилось алмазними зарізними долотами МДВ-188. Більш детальна інформація щодо буріння основного стовбура кожного із чотирьох відгалужень наведена в таблиці. Після кріплення колон і освоєння свердловина передана Долинському НГВУ для експлуатації.

Протягом 1973-1981 рр. в Долинському нафтопромисловому районі було пробурено ще 4 розгалужено-горизонтальні свердловини: 350, 356, 357 і 825. Із вказаних свердловин трьома стовбурами пробурено св. 350-Долинська, двома – свердловини №№ 356, 357 і 358.

В практичній реалізації цієї унікальної технології брали участь інженери Андрійчук Й.С., Дудар О.С., Гірник Я. Й., Думін І.І., Белінський Й.Ф., Красівський Б.М., Гаванчук М.П., Куртяк Я.С., Вареник В.А., Чмихов О.С., Дмитрук Л.О., Наконечний І.М., Дзвонковський Я.М., Гунька Н.П., Мурзін Р.Д., Яремійчук Р.С. та інші.

Буріння стовбурів свердловин великого діаметра

В кінці 60-х років, впродовж 70-х років на Передкарпатті починаються масштабні роботи з освоєння надглибокого буріння, що пов'язано з пошуками глибинної нафти і газу. Проектні глибини свердловини, наприклад, на площі Танява складають: № 21 – 5000 м, № 100 – 6200 м. Проте досягнення цих глибин на перших порах не вдається. Свердловина № 21 зупинила буріння при глибині 2794 м, № 17 – 4135 м, № 8 – 4028 м, № 12 – 4440 м.

Складні конструкції свердловин передбачають спуск одно- або дворозмірних колон великого діаметра на великі глибини. Так, у свердловині № 27 Спас передбачено спуск кондуктора діаметром 426 мм на глибину 250 м, комбінованої колони 299х324 мм на глибину 3000 м; на свердловині № 100 Танява при таких же діаметрах кондуктора та глибинах їх спуску, як і в свердловині № 27 Спас, передбачено спуск 299 колони на глибину 3600 м; на свердловині № 1 Вишків передбачався спуск кондуктора діаметром 426 мм на глибину 1350 м, а колони діаметром 324 мм на глибину 3000 м. Приблизно такими ж складними було

буріння та спуск колон великого діаметра на свердловинах № 1 Синевидне (426 мм колона на глибину до 900 м та 299 мм колона на глибину 4000 м) та № 1 Шевченкова (426 мм колона на глибину 150 м та 324 мм колона на глибину 3500 м). Таким чином виникла необхідність утворення стовбурів свердловин діаметром 394 мм та 640 мм на великі глибини, а пізніше спуск в ці свердловини колон діаметром 426 мм, 324 мм та 299 мм. Проте буріння таких стовбурів в умовах Передкарпаття було надзвичайно технологічно складним у зв'язку з інтенсивним самочинним викривленням стовбурів. Це пояснюється тим, що породи, які розбурюються, мають великі міцність та абразивність, чергуються ці породи з породами невеликої міцності, для свого руйнування потребують великих навантажень на долото. Відсутність досконалого породоруйнівного інструменту та компоновок, які б попереджували викривлення свердловин, призводила до низьких швидкостей буріння. Тому при проектуванні способів буріння верхніх інтервалів великим діаметром стало завдання – яким чином поєднати ефективно буріння зі збереженням вертикальності стовбура свердловини.

Для формування стовбурів свердловини великого діаметра використовувалось декілька способів буріння:

- 1) долотами великого діаметра;
- 2) випереджуючим пілотним стовбуром свердловини з подальшим розширенням його до необхідного діаметра;
- 3) суміщеним турбінно-роторним способом;
- 4) турбінно-реактивними бурами (РТБ).

Буріння долотами великого діаметра широко використовувалося при проходці відносно м'яких порід. У випадку збільшення твердості (міцності) гірських порід та при тенденції до інтенсивного природного викривлення використання доліт великого діаметра стає проблематичним через відсутність широкої гама таких доліт, а також центруючих та калібруючих елементів і обважнених бурильних труб великого та субвеликого діаметрів.

У більшості випадків компоновки для попередження викривлення свердловин при бурінні вертикальних отворів суцільним вибоєм засновані на використанні ефекту виска в нижній частині бурильної колони, вимагають збільшення жорсткості нижньої частини бурильної колони та застосування відхилювачів вибійних двигунів.

Ефект виска використовується для створення випрямляючого зусилля, що виникає за рахунок ваги нижньої частини бурильної колони, яка не доторкається стінки свердловини. Це зусилля є єдиним, яке притискує долото вниз до стінки свердловини і деякою мірою нейтралізує відхилення при асиметричному руйнуванні анізотропних порід.

Застосування спеціальних наддолотних обважнених труб або обважнених труб (ОБТ) субвеликого діаметра дає змогу збільшити випрямляюче зусилля. Збільшення ваги одиниці довжини нижньої частини бурильної колони пропорційно квадрату діаметра обважнених труб, а також жорсткості компоновки пропорційно діаметру труб в четвертому

Таблиця 5 – Показники буріння свердловини РГ-801-Долинська

Інтервал буріння, м	К-ть метрів, м	К-ть доліт, шт	Тип і розмір долота	Тип і розмір електробура, відхилювача	Механічна швидкість буріння, м/год	Проходка на долото, м	Осьове навантаження, т	Продуктивність насосів, л/с	Густина бурового розчину, кг/м ³	В'язкість, с	Водо-віддача, см ³ /30хв.
166-1704	1538	56	295 МГА, У295С	Е250/8, Е240/8, Е240/8 з МВ-1°30'	5,23	27,4	12-14	45-50	1350-1380	120	6-80
1704-1796	92	7	У295СЗГ, ТЗ, ИСМ-267	Е215/8 з МВ-1°30'	1,96	13,2	14	45-50	1350-1380	120	6
1796-2060	264	4	ИСМ-267	Те саме	1,16	66,0	8	25	1380	110	4-5
Всього	1894	67			3,33	28,4					
2060-2105	46	6	К190 ТК3	Е164/8 з МВ-1°x1°	3,0	7,5	12	18	1280	70-120	4-5
2105-2242	137	2	МДК-188	Е164/8 з МВ-1°x1°30'	1,61	68,5	8	18	1180-1200	70-110	4-5
Всього	183	8			1,82						
2170-2175	5	4	МДВ-188	Е164/8 з МВ-1°x1°15'	1,25	15	3-5	18	1190	60-80	4-5
2175-2220	45	3	МДК-188	Е164/8 з МВ-1°x1°	1,25	15,0	7	18	1180	60-75	4-5
Всього	50	7			1,79	7,1					
2130-2269	139	5	МДВ-188 (2 шт.), ИСМ-188	Е164/8 з МВ-1°x1°15', Е164/8 з МВ-1°30'	1,46	27,8	7	18	1,18-1,20	70-80	
2114-2346	232	4	МДВ-188, ИСМ-188	Е164/8 з МВ-1°x1°15'	1,54	58,0	6-8	18	1,21-1,22	70-80	
2073-2239	166	2	ИСМ-188	Е164/8 з МВ-1°x1°30'	1,37	88	6-8	18	1,21-1,22	70-80	

ступені призводить до зменшення прогину ОБТ, а довжина вільної частини від долота до першої точки доторкання ОБТ зі стінкою свердловини збільшується, що тягне за собою підвищення випрямляючого зусилля. Проте промисловість не випускала калібратори та центратори великого діаметра, і тому буріння стовбурів великого діаметра в умовах Передкарпаття було великою проблемою.

Буріння реактивно-турбінними бурами (РТБ)

Розробником реактивно-турбінного буріння був к.т.н. Г.І.Булах. Цей спосіб дає можливість бурити вертикальні стовбури діаметрами від 394 мм до 1020 мм і навіть більше. З 1970 року на площах Передкарпаття почали застосовувати РТБ-640 та РТБ-394. Ними бурилися стовбури великого діаметра на свердловинах № 19 Яблунька Кричка, № 1 Синевидне, № 814 Пасічна, № 22 Смільна, № 14 Іваники. Лише за 1970-1973 роки загальний обсяг буріння РТБ становив близько 8 тисяч метрів. Зі зменшенням обсягів надглибокого буріння відпала необхідність у використанні РТБ. Проте отриманий досвід їх використання є повчальним, особливо при порівнянні різних способів та технічних засобів буріння таких стовбурів. Тим більше, що в найближчі роки нафтова промисловість України, в тому числі на Прикарпатті, повернеться до геологічного вивчення та освоєння ресурсів нафти з великих глибин.

Вертикальність стовбурів при реактивно-турбінному бурінні зберігається завдяки застосуванню способів, заснованих на отриманні доброго породоруйнівного ефекту при низьких осьових навантаженнях, але зате при високих питомих тисках на вибій, а також на збільшенні ваги та жорсткості одиниці нижньої частини бурильної колони. При збільшенні навантаження на вибій більше 3/4 ваги РТБ стовбур починає викривлятися з інтенсивністю, пропорційною зростанню навантаження.

РТБ-640 складається з перехідника, траверси, двох турбобурів Т12МЗ-240, вантажів, двох перехідників-обважнювачів, шести вантажів напівхомутів, чотирьох поздовжніх стяжок, чотирьох круглих гайок та інших скріплюючих елементів. Долота в цьому бурі використовувались діаметром 295,3 мм. Траверса служить для направлення потоків бурового розчину з бурильної колони до двох турбобурів.

Зупинимось на досвіді буріння реактивно-турбінними бурами на свердловині № 1 Синевидне (буром РТБ-640 в інтервалі від нульової позначки до глибини 901 м; буром РТБ-394 в інтервалі від 901 до 4001 м). За нашими даними ці глибини були рекордними при застосуванні цих складних агрегатів.

Буріння здійснювалося буровою бригадою начальника бурової Мельничина С. Г. На буровій був змонтований буровий верстат "Урал-маш-4Е". Міжремонтний період роботи турбобурів складав 20...68 годин. При бурінні агрегат РТБ-640 примусово обертася ротором зі швидкістю 60 обертів за хвилину. Витрата рідини змінювалася від 72 л/с до 60 л/с. Буровий розчин очищувався за допомогою здвоєних віброцит та гідроциклона. Осьове навантаження становило 2-4 тс. В інтервалі буріння зенітний кут не перевищував 2°. При бурінні використовувалися

лись долота діаметром 295 мм Дрогобицького заводу типів С, СТ, Т, СЗГ, ТК. Якби в цьому інтервалі використовувались кращі долота (У 295 СЗГ), то число рейсів в інтервалі 0-901 м можна було б скоротити з 165 до 93. В пробурений стовбур була спущена та зацементована обсадна колона діаметром 426 мм без будь-якої проробки стовбура. Низ колони (кондуктора) був обладнаний башмаком з пластобетонною направляючою пробкою та двома клапанами-хлопавками.

Подальше поглиблення цієї свердловини до глибини 4001 м здійснювалося чотирма комплексами РТБ-394, якими пробурені такі відклади: еоценові 901-1193 м; ямненські 1193-1351 м; стрийські 1351-2240 м; ямненські 2240-2344 м; еоценові 2344-2658 м; менілітові 2658-3950 м; еоценові 3950-4000 м.

Перед спуском 324 мм обсадної зварної колони було виконано дворазове калібрування стовбура свердловини з застосуванням спіральних лопатевих калібраторів в нижній частині бурильної колони. Обсадна колона спущена трьома секціями до проектної глибини. За допомогою РТБ-394 були пробурені такі інтервали у свердловинах: № 23 Семигинів – 20...730 м; № 10 Завода – 33...1069 м; № 12 Завода – 64...1380 м; № 1 Північна Завода – 155...1158 м; № 19 Яблунька Кричка – 0...448 м та 550...969 м; № 14 Іваники – 323...919 м та 1126...1590 м; № 22 Смільна – 52...290 м та 421...475 м.

Комерційна швидкість буріння на перших п'яти свердловинах становила 450...681 м/верстат-місяць; на свердловині № 14 Іваники в менілітових відкладах – 4266 м/верстат-місяць, в стрийській та полянинській свитах – 303 м/верстат-місяць, а в воротиненських відкладах свердловини № 22 Смільна в першому інтервалі – 1020 м/верстат-місяць та 405 м/верстат-місяць в другому інтервалі.

На основі аналізу використання РТБ (640 та 394) було встановлено, що при невеликих осьових навантаженнях стовбури з прийнятними для практики техніко-економічними показниками буряться вертикальними. Проте основним недоліком РТБ, особливо РТБ-640, були складності його збирання в умовах бурової свердловини, необхідність використання автомобільних та тракторних кранів для подачі агрегату з містків у бурову, особливо при їх завантаженні та розвантаженні на стелажі.

Ремонт та транспортування РТБ теж створювали значні труднощі.

Буріння випереджуючого стовбура з подальшим його розширенням

При бурінні випереджуючого стовбура ставилися такі основні завдання: попередження викривлення свердловини та досягнення високих швидкостей буріння. Спочатку для розширення пілотного стовбура використовувалися долота великого діаметра. Внаслідок тривалої дії на стінки свердловини гірського тиску та бурового розчину в навколосвердловинній зоні утворюються тріщини, що спричиняють появу обвалів порід, утворення каверн.

Розширення пілотного стовбура виконувалося як роторним, так і турбінним способами. При цьому ефективність застосування турбінного

способу при розширенні долотами великого діаметра виявилась вищою, ніж при роторному способі в м'яких та середньої міцності породах. З ростом глибин, міцності порід ефективність турбінного способу розширення стовбурів суттєво знижувалась. Для розширення використовували долота 2Д-394С, 2Д-394Т, 3Д-445С і 3Д-490С і турбобури ТС5-9'', А9К5Са, ТСШ-240.

З середини 60-х років почалось використання для цілей розширення стовбурів свердловин дискових розширювачів конструкції ВНДІБТ (РД-445, РД-394, РП2-394). На початку 70-х років Л. А. Райхерт розробив шарошкові розширювачі діаметрами 295, 333, 394 та 555 мм.

В 1972 році розроблено та серійно випробувано розширювач ДРУ-394 (автори Яремійчук Р. С., Семак Т. Т.) зі змінними шарошками, який давав змогу замінювати до п'яти разів відпрацьовані шарошки на одному корпусі. Проте існуючий валовий показник виготовлення виробів робив такий розширювач, попри всі його переваги у споживача, не вигідним для заводу-виготовлювача, і в серійне виробництво він не був запущений. Розширювачі РШ4-394, РШ6М-394, РШ6С-394, розроблені Л. А. Райхертом, серійно освоєні Дрогобицьким долотним заводом, Дрогобицьким заводом газової апаратури та спецобладнання. Для створення достатнього осьового навантаження Л. А. Райхерт розробив та сприяв серійному випуску спеціальних вискових обважнювачів діаметром 500 мм – ОП-500.

Табл. 6. Основні показники буріння стовбура великого діаметра в інтервалі 0-150 мм

Показник	Буріння	Розширення		Всього
		до 445 мм	до 640 мм	
Кількість довбань	18	1	1	2
Тривалість механічного буріння, год.	168	3,25	31,75	203
Загальна тривалість, год.	234	12,25	44,75	291
Швидкість, м/год				
механічна	0,9	46,4	4,8	0,74
рейсова	0,72	12,6	3,6	0,52
Проходка на долото, м	8,3	150	151	7,5
Тривалість одного довбання, год.	11,5	12,25	44,75	–
Осьове навантаження, тс	1-2	4-6	до 8	–
Швидкість обертання ротора	–	60-70	50-70	–

В результаті широкого застосування цього методу створення стовбурів великого діаметра було виявлено деякі негативні явища. Найбільш характерним було буріння надглибокої свердловини № 1 Шевченкова. Інтервал буріння під кондуктор діаметром 426 мм розбурювався долотами 295 мм, а пізніше розширювався дисковим розширювачем РД-445 до діаметра 445 мм та діаметра 640 мм. Буріння здійснювалося турбобурами Т12МЗБ-240, А9К5Са та ТСШ-240 з використанням опорної компоновки низу бурильної колони. Розширення велося роторним способом.

Основні показники буріння стовбура свердловини в цьому інтервалі вміщені в таблиці 6.

Буріння цієї свердловини до глибини 3000 м здійснювали при дуже низьких осьових навантаженнях (від 5...6 тс до 2...3 тс) з підняттям осьового навантаження на долото при глибині 2400 м до 12...14 тс. Це забезпечило максимальний zenітний кут викривлення свердловини до 3°. В цьому інтервалі було витрачено велику кількість доліт, 182 калібратора ТРС-295, 9 комплектів маховиків діаметром 245 мм, міжремонтний період роботи турбобурів був дуже низьким.

За даними буріння свердловини № 1 Синевидне та № 1 Шевченкова було встановлено, що застосування РТБ-640 дало змогу отримати збільшення проходки на долото на 20%, рейсової та механічної швидкості в 2...2,5 рази, ніж при бурінні пілотного стовбура з подальшим його розширенням.

Буріння стовбурів великого діаметра суміщеним турбінно-роторним способом

З американської практики буріння відомо, що в тих випадках, коли звичайні компоновки для буріння не задовольняють умовам попередження викривлення свердловин, треба застосовувати спеціальні компоновки, які містять пілотні розширювачі.

В Україні цей спосіб розвинувся і почав широко застосовуватися завдяки працям Р. С. Яремійчука, Л. А. Райхерта, І. М. Фриза. На час розробки цього методу було відомо, що в США широко використовуються в КНБК спіральні калібратори. В 1971 році Л. А. Рахерт розробив конструкції лопатевих спіральних калібраторів КЛС-394 і налагодив їх виробництво в Долинській ремонтно-експлуатаційній конторі, пізніше на Дрогобицьких заводах.

Цей спосіб буріння забезпечує збереження вертикальності стовбура, високі техніко-економічні показники буріння. Активна компоновка нижньої частини бурильної колони призначена для буріння стовбурів діаметром 394 мм суміщеним турбінно-роторним способом. Вона складається з долота діаметром 295 мм, калібратора КЛС-295В, двосекційного турбобура (ТСШ-240, А9К5Са, А9ГТ), розширювача РШ6С-394 та двох калібраторів КЛС-394, з'єднаних між собою однією ОБТ діаметром 203...299 мм, вага яких розраховується як для роторного буріння. Для буріння стовбурів діаметром 555 мм (під 426 мм обсадні колони) суміщеним турбінно-роторним способом запропонована компоновка, в якій використовується подвійне одночасно-ступеневе розширення випереджуючого стовбура.

При бурінні в м'яких породах використовували суміщений роторно-роторний спосіб. Вперше цей спосіб був запропонований на свердловині № 17 Спас при бурінні під 324 мм кондуктор до глибини 936 м. На цій свердловині було отримано комерційну швидкість буріння в 2,7 рази вищу, ніж при бурінні випереджуючого стовбура з подальшим розширенням.

Перші випробування компоновки для буріння стовбура свердловини діаметром 555 мм були проведені на свердловині № 10 Вигода-Витвиця (ВВ). В табл. 7 наведені дані про показники буріння співставлених інтервалів при бурінні суміщеним турбінно-роторним способом (А) та буріння випереджуючого пілот-стовбура з подальшим розширенням (Б).

Табл. 7. Порівняльні дані буріння за способом А і Б

Номер свердловини	Спосіб (А чи Б)	Інтервал буріння, м	Час буріння (загальний)	Максимальне викривлення свердловини, град.	Комерційна швидкість буріння, м/верстат-місяць
18 Спас	А	0 – 1253	1032	2°30'	874
77 ВВ	Б	0 – 1258	1928	7°45'	470
73 ВВ	Б	0 – 1256	1712	8°15'	528
10 ВВ	А (до Ø 555 мм)	0 – 116	85	0°	870
1 Шевченкова	Б	0 – 118	206	0°30'	425
10 ВВ	А (до Ø 394 мм)	116 – 1443	1610	2°30'	600
1 Шевченкова	Б	118 – 1442	3984	2°30'	262
901 Пасічна	А	0 – 2023	2640	2°30'	552
900 Пасічна	Б	0 – 2027	4302	7°30'	338

У 1973 році технологія стовбурів великого діаметра суміщеним турбінно-роторним способом була впроваджена на 22 свердловинах об'єднання "Укрнафта" (418 Північна Долина, 100 Тянява, 20 Спас, 22 Добромиль-Стрільбичі та інші).

Висновки: При бурінні трьох параметричних свердловин, які знаходились в одному геологічному проділі, застосовували різні способи буріння. Свердловина № 1 Синевидне в інтервалі від 0 до 4000 м бурилася РБТ-640 і РБТ-394. Свердловина № 1 Шевченкова в інтервалі від 0 до 3000 м бурилася пілотним стовбуром діаметром 295 мм з подальшим розширенням до діаметрів 640 та 394 мм, а свердловина № 100 Тянява в інтервалі від 0 до 3630 м бурилася суміщеним турбінно-роторним способом. У всіх трьох свердловинах ставилося завдання зберегти вертикальність стовбура свердловини та забезпечити спуск у ці свердловини колони діаметрами 426, 324 та 299 мм.

Комерційна швидкість в стрийських відкладах на свердловині № 1 Синевидне становила 173 м/верстат-місяць, на № 100 Тянява – 335 м/верстат-місяць і на № 1 Шевченкова – 274 м/верстат-місяць.

З середини 70-х років суміщений турбінно-роторний спосіб, а пізніше суміщений роторно-роторний спосіб став основним при бурінні стовбурів великого діаметра в Передкарпатті. Його техніко-економічні переваги над іншими стали очевидними.

Буріння надглибокої свердловини № 1 Шевченкова

Відомо, що Внутрішня зона Передкарпатського прогину є найбільш перспективною в Карпатській нафтогазоносній провінції. Це зона нафтогазонакопичення, де відкриті нафтові і нафтогазоносні родовища (Бориславське, Орів-Вуличнянське, Стинавське, Східницьке, Долинське та Північно-Долинське, Битківське та ін.). Промислова нафтогазоносність в цій зоні спостерігається від крейдяних до поляницьких відкладів включно. Проте основні поклади нафти і газу належать до вигодської та манявської світ еоцену та менілітової світи олігоцену. Ці стратиграфічні горизонти можна розглядати як регіонально нафтогазоносні. Верхній ярус структур Долинського нафтопромислового району, який розташований на глибині 4000 – 4500 м до початку буріння надглибоких свердловин № 1 Луги, № 1 Шевченкова та № 1 Синевидне, був практично розвіданим. Тому подальші пошуково-розвідувальні роботи були спрямовані на розкриття нижнього ярусу складок, складених палеогеновим флішем, а також на виявлення подібних структур далі південно-західного напрямку під насувом Карпат, які належать другому чи третьому ярусу складок Внутрішньої зони Передкарпатського прогину. Існує думка, що під насунутими структурами знаходиться автохтонна основа, складена породами палеозою і мезозою, а осадовий чохол автохтонної основи повинен викликати велику зацікавленість при пошуках нових крупних родовищ нафти і газу. Цим і визначалися завдання буріння надглибоких свердловин в даному регіоні.

Конструкції надглибоких свердловин вибиралися з умов перекриття несумісних за своєю природою гірських порід та гідрогеологічними умовами. Найбільш складним, як на той час, було буріння стовбурів свердловин великого діаметра для спуску у свердловину обсадних колон діаметрами 245, 299, 324, 426 мм.

Оскільки буріння цих надглибоких свердловин схоже за технологією, зупинимось на унікальному досвіді буріння свердловини № 1 Шевченкова.

Свердловиною № 1 Шевченкова пройдена потужна товщина флішу, з якої складені дві тектонічні луски, розділені насувом на глибині 6240 м.

При досягненні глибини 7522 м свердловина не розкрила нові структурні елементи – глибинні складки прогину, а також його автохтонну основу.

Розкритий розріз крейди, судячи з кернів та за даними промислово-геофізичних досліджень, містив ряд горизонтів та пачок порід, які можна розглядати як породи-колектори. Зі збільшенням глибини не спостерігалось істотного збільшення густини і твердості порід. За даними промислово-геофізичних досліджень пористість окремих пачок порід, особливо в інтервалі 7000-7500 м, досягала 12-18%. Спостерігалась велика тріщинність порід. При люмінесцентно-крапельному аналізі (в хлороформі та спиртобензолі) в тріщинах спостерігалось світложовте забарвлення, що вказувало на наявність маслянистого бітуму.

Особливо великий вміст газів відзначався в інтервалі буріння 6900-7522 м на газокаротажній станції, що вказувало на наявність вуглеводневих горизонтів. Треба відзначити, що монтаж всього бурового облад-

нання був настільки зручним, що впродовж всього циклу буріння не прийшлося вносити будь-які зміни. Особливо продуманими були питання екології (відведення відпрацьованих у двигунах газів, масел, утилізація бурових розчинів різного призначення тощо). Буріння почалося 3 грудня 1969 року. Начальником бурової був один з найкращих буровиків Долини Орест Жарський, буровим майстром – інженер Петро Здрок, який кілька років перед тим закінчив з відзнакою Івано-Франківський інститут нафти і газу, пізніше інженер С. П. Костенко.

У зв'язку з тим, що на глибині 6500 м не розкрили маркуючого горизонту, було вирішено спустити колону-хвостовик діаметром 194 мм на глибину 7000 м та продовжити буріння до 7500 м. Враховуючи зношення колони діаметром 245 мм (за даними профілеграм в середньому на 2^{-6} мм) та зростання пластового тиску, було прийнято рішення замість колони-хвостовика спустити колону діаметром 245×194 мм та замінити верхню секцію труб діаметром 245 мм довжиною 1199 м.

Оскільки зовнішній діаметр муфт в колоні 194 мм становив 216 мм, передбачили спуск безмуфтової колони, для чого в трубах 194 мм з товщиною стінки 9,52 мм групи міцності “Р-110” була нарізана трапецеподібна різьба ОГ-1М, а у відкритій частині стовбура в інтервалі 5525-7022 спускали гладку безмуфтову колону. В колоні 245 мм (внутрішній діаметр 221 мм) спускали ці ж труби діаметром 194 мм з обточеними муфтами до діаметра 210 мм.

Цементування колони. Перша секція труб 194 мм довжиною 1825 м (інтервал 7022-5197 м) спускалася на сталевих (СБТ) і легкосплавних (ЛБТ) бурильних трубах (СБТ 140 мм марки “Д” довжиною 298,7 м; ЛБТ 147 мм марки “Д-16Т” довжиною 1000 м; СБТ 127 марки “G-105” довжиною 757 м; СБТ 140 марки “Л” довжиною 1041,3 м; СБТ 139,7 марки “G-105” довжиною 2000 м). Особливо важливу роль відводили розробці рецептур та технології цементування всіх колон. Так, при цементуванні першої проміжної колони діаметром 245 мм враховувалося таке. У зв'язку з наявністю газопроявляючих пластів цементування потрібно було проводити двома однаковими за об'ємом порціями тампонажного розчину. Щоб забезпечити протитиск на газопроявляючі пласти, тривалість тужавіння верхньої порції мала бути порівняно з нижньою у два рази більшою. Щоб покращити контакт цементного каменю з стінками свердловини, приготування цементного розчину проводилось на насиченому хлористим натрієм розчині.

Подачу цементного розчину здійснювали трьома агрегатами ЗЦА-400 та ЦА-320 попарно. Протискувався цементний розчин буровим розчином з густиною 1400 кг/м^3 в об'ємі 102 м^3 протягом 1 год. 15 хв. чотирма агрегатами ЗЦА-400 та одинадцятьма агрегатами ЦА-320М.

Цементування другої секції колони на глибині 8900-1993 було теж двопорційним. Для верхньої порції використовувався полегшений цемент Вольського заводу, а для нижньої порції цемент Здолбунівського заводу. У верхній порції водоцементне відношення дорівнювало 1, а у нижній порції – 0,52. Густина цементного розчину верхньої порції становила 1520 кг/м^3 , а нижньої 1800 кг/м^3 . І для нижньої, і для верхньої порцій використовували як сповільнювач тужавіння КМЦ-500 та розсіл хлористого натрію з густинами 1150 кг/м^3 та 1200 кг/м^3 .

Для цементування третьої секції використовували полегшений цемент Вольського заводу.

Цементування другої проміжної колони діаметром 245 мм мало свої технологічні особливості, оскільки цю колону спускали чотирма секціями після досягнення свердловиною вибою 5527 м. Перша секція спускалася в інтервал глибин 5522-4195 м при температурі на вибої 130°C , друга секція була спущена в інтервал глибин 4195-2704 м; третя секція в інтервал 2704-1199 м; четверта секція в інтервалі 1199-0 м була передбачена змінною і з'єднувалася з третьою стикуючим пристроєм РЦС-245. Після спуску четвертої секції за колону було запомповано бетонітовий розчин густиною 1200 кг/м^3 , умовною в'язкістю 40 с, статичною напругою зсуву $9/20 \text{ мг/см}^2$ та водовіддачею $16 \text{ см}^3/30 \text{ хв}$.

Для першої секції використовувався обважнений термостійкий цемент Костянтинівського заводу “Обважнювач”. Тут було використано теж двопорційне заливання тампонажного розчину. Рідиною для приготування цементного розчину був розсіл хлористого натрію з густиною 1180 кг/м^3 , оброблений виннокам'яною кислотою.

Після спуску першої секції колони свердловину промивали протягом 15 годин буровим розчином з густиною 1800 кг/м^3 при продуктивності насосів 50 л/с.

Середня густина цементного розчину дорівнювала 2120 кг/м^3 . Послідовна подача двох порцій цементу по 39 тонн продовжувалась 41 хвилину, а протискування його буровим розчином в об'ємі $106,6 \text{ м}^3$ – 1 годину 43 хвилини. В кінці протискування була скинута куля діаметром 75 мм, яка йшла до спеціальної муфти, установленої на глибині 4195 м, протягом 40 хвилин. Тиск в кінці протискування становив 5,5 МПа, а при зрізанні штифтів – 17 МПа. Для того, щоб зрізати та винести на поверхню надлишковий цементний розчин, було проциркульовано 365 м^3 бурового розчину.

Процес цементування другої та третьої секцій відбувався аналогічно. Як вже написано раніше, після досягнення глибини 7022 м була піднята незацементована 245 мм колона, і все подальше кріплення здійснювалося вже комбінованою колоною 245×194 мм. Температура на вибої становила 180°C , пластовий тиск – 120 МПа, розкриті пласти були і поглинаючими, і проявляючими, кільцевий зазор між стінкою обсадної колони і стінкою свердловини становив лише 10 мм.

Вага першої секції обсадної 194 мм колони довжиною 1829 м становила 80 т, а разом з бурильною колоною – 120 т.

Головним інженерним завданням було підібрати рівномірну бурильну колону, роз'єднуючі пристрої, тампонажний матеріал, реагенти – сповільнювачі тужавіння.

Оскільки і понині такі операції є дуже відповідальними, ми детально описуємо деякі моменти спуску та цементування цієї колони. Так, в розтруб нижньої обсадної колони вставили направляючу насадку з алюмінію. В кожні з наступних трьох труб вставили безкорпусні зворотні клапани – перший конструкції ВНДКрнафти та два наступні конструкції ВНДІБТ, які перед тим були опресовані при тиску 14 МПа. На останній верхній 194 мм трубі був змонтований різьбовий роз'єднувач з

пристосуванням для підвішування секції обсадної колони на цементному камені.

Гладкі обсадні труби та труби з обточеними муфтами спускали на спайдерах вантажопідйомністю 320 т (виробництво Румунії), скручували круговим ключем та закріплювали машинними ключами. На ключах установлювався моментомір. Крутий момент на кріпленні різі ОГ-1М доводили до 600 кгс·м.

При спуску обсадних труб кожні 40 м заповнювали розчином, а при спуску бурильних труб – після кожної свічі труб. Проміжне відновлення циркуляції здійснювали при глибинах спуску 3000 м та 5500 м. Спуск секції обсадної колони проходив зі швидкістю 0,5 м/с та зайняв в загальному 41 годину.

Після спуску секції обсадної колони на глибину 7005 м була відновлена циркуляція при тиску 6 МПа, а відтак впродовж 3 год. 15 хв. свердловину промивали з продуктивністю насосів 25 л/с та при тиску 15 МПа.

При промиванні з свердловини була вимита порція розгазованого бурового розчину (густина 1570 кг/м³) об'ємом 20 м³. Для приготування тампонажного розчину був використаний спеціальний цемент ШПЦС-200 Костянтинівського заводу "Обважнювач".

Для приготування 30 м³ рідини для цементного розчину було витрачено 305 кг борної та 176 кг виннокам'яної кислот. Для приготування 40 м³ тампонажного розчину витрачено 52 т цементу та 24,3 м³ технічної води.

Об'єм поданого у свердловину тампонажного розчину – 35 м³; густина тампонажного розчину 1790 кг/м³; об'єм протискуючої рідини 101,5 м³; тиски: притискування тампонажного розчину 12 – 15 МПа, в момент зрізання штифтів – 17 МПа, після зрізання штифтів – 6 МПа; тривалість операції цементування 3 год. 10 хв.; середня швидкість висхідного потоку – 1,2 м/с.

Цементування 2-ї секції (інтервал 2740,6-5176,46 м) та наступних були приблизно однакові.

На цій свердловині працювали секційні, а також високомоментні та шпindelні турбобури з ґратками гідрогальмування, спеціальні компоновки низу бурильної колони, долота з твердосплавним зубковим озброєнням. Лише з глибини 5527 м буріння велося роторним способом. На цій свердловині середня комерційна швидкість становила 138,1 м/верстат-місяць, середня проходка на долото – 5,16 м, середня механічна швидкість буріння – 0,94 м/год, а кількість використаних бурових доліт – 1362. Бурові долота, що використовувалися при бурінні, дуже часто не відповідали твердості та абразивності порід. Пізніше було встановлено, що лише за рахунок використання кращих доліт можна було майже вдвічі скоротити час буріння цієї свердловини. Треба відзначити, що при бурінні цієї свердловини вперше було спостережено, що, починаючи з глибини 5000 м і до глибини 7022 м, йшло неухильне збільшення як проходки на долото, так і механічної швидкості буріння (на 22%), хоча твердість і абразивність порід стрийської серії не мінялися, а саме буріння велося при аналогічних режимах.

При глибині 7522 м сталося прихоплення бурильних труб. Колона бурильних труб не лише була зношеною попереднім бурінням, а й не була розрахована на умови буріння при глибині 7500 м.

При ліквідації прихоплення стався обрив бурильних труб. Подальші спроби ліквідувати аварію на існуючих бурильних трубах не давали результату.

Протягом кількох років великий загін інженерів і вчених опікувався цією буровою. Серед них треба назвати тодішніх начальника Управління бурових робіт В. М. Дітчука, головного інженера Й. С. Андрійчука, інженерів В. К. Бабака, М. Ф. Дмитріва, І. Д. Кардаєва, В. В. Кроткова, А. М. Мельничука, безпосередніх керівників бурової бригади О. І. Жарського, П. Здрока, С. П. Костенка, представників ВНДІ бурової техніки Я. А. Гельфгата, О. В. Орлова, О. І. Крейтера, Л. А. Райхерта, О. І. Башлакова, Р. С. Яремійчука, В. Ф. Жданкова, працівників ЦНДЛ об'єднання "Укрнафта" Т. М. Боднарука, А. Ф. Семенаша і багатьох інших.

Багато з інженерних рішень залишились актуальними і до сьогоднішнього дня. А на той час це був видатний інженерний результат буровиків України.

Промивальні рідини

Збільшення глибини буріння на родовищах Західної України вимагало наукового і практичного вирішення низки проблем, що пов'язані з приготуванням і застосуванням бурових промивальних рідин. З врахуванням впливу на їх характеристики таких агресивних факторів як температура, тиск, мінералізація, дія біологічних організмів на деструкцію окремих реагентів-стабілізаторів постійно проводилась робота з удосконалення складів бурових розчинів.

В 50-тих роках, застосовуючи глинистий матеріал з місцевих кар'єрів, готували суспензії, які після обробки каустичною, кальцинованою содою або гексметафосфатом натрію стабілізували вугільно-лужним реагентом (ВЛР). Такі системи бурових розчинів застосовували при низьких і середніх вибірних температурах (до 80°C).

В умовах буріння солевмісних гірських порід застосовували крохмаль і різні його модифікації. На перших порах сухий крохмальний порошок попередньо пептизували в розчині каустичної соди, а відтак додавали одержаний продукт-реагент до бурового розчину. Пізніше для галузі продукували сухий модифікований крохмаль, який одержували шляхом взаємодії звичайного крохмалю, луґу і хлориду натрію.

Значною мірою удосконаленню рецептур сприяла поява такого ефективного лігносульфонатного реагенту як конденсована сульфат-спиртова барда (КССБ).

В 1958 р. науковцями Чернівецького держуніверситету був запропонований проект організації випуску КССБ на території тодішнього Станіславського адміністративно-економічного району.

Широкого застосування в ті часи набули крохмально-сольові, лігносульфонатні розчини, а також проведені перші випробування нафто-емульсійних глинистих розчинів (в Долинській конторі буріння). Надалі асортимент реагентів для обробки бурових розчинів поповнився нітролігніном, продуктами гідролізу поліакриламиду (РС-2, РС-4, ін.). Для

одержання цих реагентів використовували поліакриламід Дніпродзержинського виробництва, згодом – Калуського.

Впровадження цих реагентів дало змогу одержати нові системи малоглинистих бурових розчинів, які забезпечили одержання значних економічних ефектів під час буріння свердловин на Долинському, Спаському, Тянявському, Битківському родовищах.

З метою підвищення якості розкриття продуктивних пластів в 60-тих роках почали застосовувати синтетичні поверхнево-активні речовини (ПАР), зокрема НЧК (нейтралізований чорний контакт), СНС (сульфонатрієві солі), ДС-РАС, ОП-10, сульфонол, проксанол, превоцел.

Застосування ПАР сприяло появі нових систем бурових розчинів як на водяній, так і на нафтовій основі. Збільшення термостійкості промивальних рідин забезпечували різні модифікації карбоксиметилцелюлози (КМЦ), карбофен, а також різні добавки інгібіторів термодеструкції.

Значний внесок в розробку і впровадження нових реагентів та нових систем бурових розчинів на Прикарпатті в різний час зробили У. Скальська, А. Семенаш, Л. Склярська, А. Андрусак, І. Остафійчук, Б. Ємчук, М. Рудько, С. Питель, М. Кравчук, М. Кресса та ін.

Тампонування свердловин

На Прикарпатті тампонування свердловин за методом Паркінса започатковано з 1918 року, хоча назва свердловини, на якій воно було реалізовано, не збереглася. Після катастрофи на свердловині “Ойл Сіті” (м. Борислав) стало очевидним, що створити більш-менш надійні умови проводки свердловини, а тим більше її подальшого освоєння без ізоляції затрубного простору неможливо. Це була перша вдала спроба ущільнення затрубного простору портландцементним тістом. Ці, а також наступні спроби проводили за допомогою дуже примітивного обладнання. Спочатку для тампонування нафтових свердловин застосовувався звичайний портландцемент, який в ті часи не мав нормованого мінералогічного складу і характеризувався досить грубим помелом – до величини питомої поверхні 1200-1300 см³/г (за Вагнером). Цей портландцемент відрізнявся повільним тужавінням, особливо при низьких температурах, які спостерігалися в порівняно неглибоких свердловинах того часу на Прикарпатті. Пуск свердловини в експлуатацію часто затримувався, доки цемент не твердів та не отримував необхідну міцність. Ця затримка отримала назву “очікувального терміну”. У зв’язку з цим нафтовики висунули вимогу, щоб цемент для тампонування свердловин мав більшу м’якість млива, щоб він швидше тужавів та набирив необхідну міцність. Тому багато тампонажних цементів на перших порах являли собою просто стандартні портландцементи, змелені до питомої поверхні 1800-2000 см³/г (за Вагнером).

Довга історія створення тампонажних цементів пройшла етапи від тонкомелених цементів до поступового зниження м’якості млива та введення в цемент домішок, які сповільнюють терміни тужавіння.

Тампонажні цементи повільного тужавіння відрізняються від звичайних цементів тим, що в них містяться спеціальні сповільнювачі при меленні або після нього (крім гіпсу або замість гіпсу). Призначення цих домішок полягає у тому, щоб сповільнити гідратацію цементу і таким

чином продовжити терміни тужавіння при тампонуванні свердловин від 1800 до 4800 м.

Цементування обсадних колон в нафтових та газових свердловинах є технологічною операцією, від результатів якої залежить якість свердловини, а іноді й саме її існування як об’єкта гірничого призначення.

Успішність робіт з цементування залежить від багатьох чинників, серед яких для Карпатського регіону найбільш характерними є конфігурація стовбура, температурний режим у свердловині, тампонажні матеріали, технічні засоби, що використовуються при цементуванні обсадних колон, організація робіт тощо. В основу технічного прогресу в галузі цементування свердловин, подальшого вдосконалення і розвитку цих робіт покладені теоретичні і прикладні дослідження видатних учених Росії та України – Булатова А. І., Єременка Т. Є., Круглицького М. М., Луценка М. О., Мочернюка Д. Ю., Фіногенова І. С., Шищенко Р. І.

Особливості геологічної будови нафтових та газових родовищ регіону – перш за все тонка шаруватість порід з різними механічними властивостями, круті кути залягання цих порід – сприяють створенню складної конфігурації стовбура свердловини, основними ознаками якої є суттєве зенітне та азимутальне викривлення, створення уступів, каверн та жолобів. Все це призводить до ексцентричного розміщення колони обсадних труб у стовбурі свердловини, зменшує ступінь витіснення бурового розчину цементним і не дає змоги створити суцільне цементне кільце довкола обсадної колони і забезпечити надійну ізоляцію затрубного простору від проникнення через нього нафти і газу, пластових вод із одного пласта в інший, у стовбур свердловини або через заколонний простір на поверхню землі у вигляді міжколонних проявів або грифонів.

Родовища нафти і газу Карпат, Передкарпаття і Закарпаття характеризуються своєрідним тепловим режимом. На різних глибинах відмічені теплові аномалії. Досить сказати, що геотермічний градієнт залежно від геологічної зони і глибини буріння змінюється від 45 м на 1°С до 20-25 м на 1°С. Це ставить жорсткі умови перед вибором тампонажних матеріалів, реагентів для регулювання властивостей розчинів та технології цементування.

У зв’язку з цим в практиці робіт з цементування обсадних колон в глибоких свердловинах знайшли застосування різноманітні тампонажні матеріали, наповнювачі та хімічні реагенти: сповільнювачі, прискорювачі, пластифікатори тощо. Відповідної специфіки набуває і технологія цементування: суцільне, ступеневе, зворотне.

Крім своєрідного теплового режиму, надра регіону відрізняються ще й наявністю в розрізі свердловин пластів з аномально низькими та аномально високими пластовими тисками, що, в свою чергу, потребує додаткових заходів із забезпечення належної якості робіт при цементуванні обсадних колон, серед яких найчастіше використовується цементування полегшеними тампонажними розчинами. Ці розчини запобігають поглинанню їх пластами з низьким тиском та сильно дренованими горизонтами.

Саме ці особливості геологічної будови та термобаричні умови надр спричинили застосування шлакоцементів, цементів з домішками

доломітового пилу, глиноцементних, перлітоцементних, золоцементних, піщаноцементних сумішей. Одні з них є термостійкими (шлакопортландцементи), інші утворюють тампонажні розчини з пониженою густиною (глиноцементні, перлітоцементні, золоцементні), що дає змогу здійснювати підняття їх поза обсадною колоною на значну висоту без загрози поглинання пластами з низьким пластовим тиском.

В Івано-Франківській Центральній науково-дослідній лабораторії групою дослідників в 60-х роках під керівництвом М. Й. Марухняка розроблена глиноцементна суміш на базі портландцементу для “гарячих” свердловин і глино-порошку Городищенського заводу. Ця суміш давала змогу вирішувати проблему комплексно – забезпечувала можливість отримання розчину з густиною до 1300-1400 кг/м³ і одночасно утворювати цементний камінь з механічною міцністю при температурах середовища до 100-130°C, яка перевищувала міцність цементного каменю із чистого портландцементу.

Таких же результатів досягнуто і в Українському державному геолого-розвідувальному інституті в ці ж роки В. Б. Крихом при вивченні і практичному застосуванні золоцементних сумішей, приготвлених шляхом змішування портландцементу для “гарячих” свердловин з золою Добротворської ДРЕС.

Подальший розвиток цих робіт здійснювали В. В. Кротков, Я. Ю. Соболевський, А. Б. Меркулов, А. М. Переяслов, С. В. Шумега, І. І. Цуцк та інші.

Екстремальні умови цементування та широка гама тампонажних матеріалів вимагали застосування відповідних хімічних реагентів для регулювання властивостей тампонажних розчинів. Як сповільнювачі тужавіння тампонажних розчинів широко використовувалися КССБ, КМЦ, винний камінь, деревний пек. Як прискорювач тужавіння тампонажних розчинів переважно вживалася кухонна сіль.

Починаючи з середини 60-х років ХХ-го століття з метою забезпечення в заколопному просторі максимальної повноти заміщення і недопущення взаємного перемішування бурового розчину з тампонажним розчином, широкого застосування набули так звані буферні рідини. Вони подавалися у свердловину перед тампонажним розчином і після нього у кількостях, що створюють стовп цієї рідини в обсадній колоні висотою 100-150 м.

З метою забезпечення повноти заміщення промивної рідини тампонажним розчином та необхідної герметизації заколонного простору за рахунок надійного зчеплення цементного каменю з породою робилися неодноразові спроби застосування центруючих пристроїв та засобів зняття зі стінок свердловини глинистої кірки. Однак через складну просторову конфігурацію стовбурів свердловин та малі зазори між обсадною колоною і стінкою свердловини ці заходи широкого застосування не знайшли. Основною причиною цього є побоювання можливих аварійних ситуацій при спуску обсадних колон та їх цементуванні.

Як буферна рідина переважно використовувалася технічна вода, іноді з домішкою поверхнево-активних речовин для покращання її вимивних властивостей.

В останні роки для приготування і помпування у свердловину тампонажного розчину використовуються цементозмішувальні машини 2СМН-20, цементувальні агрегати ЦА-320А та ЗЦА-400А, блок маніфольдів 1БМ-700, станція контролю цементування СКЦ-2М, цементувальна головка, розподільні пробки.

Схеми розміщення і обв'язки цього устаткування різні і залежать від маси сухого матеріалу для приготування необхідної кількості тампонажного розчину, розмірів майданчика для розміщення цементувальної техніки, загальної кількості технічних засобів, що використовуються при цементуванні обсадної колони.

У всіх цих схемах, як правило, передбачається таке співвідношення між кількістю цементозмішувальних машин і цементувальних агрегатів, при якому забезпечується безперервне приготування і помпування тампонажного розчину у свердловину з наперед заданим темпом.

При цементуванні свердловин застосовуються станції контролю цементування СКЦ-2М, за допомогою яких здійснюється контроль і управління режимами процесу цементування та параметрами рідин, що помпуються у свердловину.

Самохідний блок маніфольдів 1БМ-700, до якого під'єднуються нагнітальні лінії цементувальних агрегатів, має відповідні датчики з виведенням інформації про параметри рідини на прилади, розміщені в СКЦ-2М.

Найбільш потужне підприємство для виконання всіх видів тампонажних робіт в свердловинах цього регіону (ВАТ “Укрнафта”, Долинське тампонажне управління) має сучасне цементувальне устаткування, висококваліфіковані кадри, воно накопичило багатий досвід цементування обсадних колон різного діаметра та довжини, включно з роботами з кріплення надглибоких свердловин, наприклад, № 1 – Шевченкова, а також щодо установки в свердловинах цементних мостів різного призначення.

Незаперечну і виключно важливу роль у розвитку робіт з цементування обсадних колон, наукового підходу до вибору найефективніших тампонажних матеріалів, активних домішок до них, інертних наповнювачів, хімічних реагентів, в освоєнні нових технічних засобів і новітніх технологій відіграли такі провідні фахівці-виробничники, як Діак І. В., Мельничук А. М., Камінський О. М., Андрійчук Й. С., Іванів М. І., Прокопець Б. М., Білик М. І., Дячишин М. М. та багато інших.

Буріння свердловин з урахуванням закономірностей природного викривлення

На нафтових та газових родовищах в межах Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину та Скибової зони Складчастих Карпат буріння свердловин супроводжується значним викривленням, що призводить до відхилення вибоїв від проектного положення на 300-400 м та набуття стовбурами свердловин складної просторової конфігурації. Таке велике відхилення вибоїв свердловин при пошуково-розвідувальному бурінні може призвести до непопадання свердловини в глибоко залягаючі поклади, де ширина складок співставима з величиною горизонтального відхилення, а при експлуатаційному бурінні велике викривлення стовбурів призводить до значного порушення сітки роз-

робки, що у будь-якому випадку ускладнює процес експлуатації покладів нафти і газу.

Тому для боротьби з викривленням свердловин буріння їх велося на занижених осьових навантаженнях на долото з використанням кривих перехідників, жорстких компоновок низу бурильної колони, що неминуче призводило до зменшення швидкості буріння і збільшення вартості бурових робіт.

Аналіз даних по свердловинах, пробурених на родовищах Бориславсько-Покутської зони, показав, що викривлення стовбурів свердловин відбувається не хаотично та безсистемно, а у відповідності з певними об'єктивно існуючими закономірностями. Наявність таких закономірностей дає змогу завчасно розрахувати відхилення траєкторії стовбура від вертикалі. При таких розрахунках провідна роль належить встановленню азимута та кута падіння порід в проектній свердловині, де також враховуються спосіб буріння, тип та розмір доліт, компоновка бурильної колони, осьові навантаження на долото та інші чинники, що впливають на викривлення стовбура свердловини.

На основі визначення проектних величин кутів зенітного та азимутального викривлення свердловини будуються проектні профілі викривлення та інклінограми, згідно з якими визначаються азимут та сумарне горизонтальне відхилення вибою свердловини від її гирла. Після цього визначається точка закладання свердловини шляхом зміщення її від проектного положення на відстань, що дорівнює сумарному проектному відхиленню у напрямі азимуту відхилення, зміненому на 180° .

Методика буріння із зміщеного положення гирла свердловини розроблена в Івано-Франківській центральній науково-дослідній лабораторії в 1962-1963 роках колективом авторів (Артемчук І. О., Бахталовський Б. Б., Боднарук Т. М., Марухняк М.Й., Скальський В. М.) і вперше була випробувана при бурінні свердловини № 526 на Битківському родовищі. Сумарне горизонтальне відхилення вибою цієї свердловини становило 265 м, проте відхилення від проектного місцеположення, визначеного проектом розробки родовища, становило лише 56 м. Подальше впровадження методики на Битківському та Долинському родовищах дало змогу досягти відхилень в межах 22-32 м.

Всі ці свердловини бурилися без обмежень осьових навантажень на долото та без застосування кривих перехідників і складних компоновок низу бурильної колони, завдяки чому досягалися більш високі техніко-економічні показники буріння і скорочувалися терміни будівництва свердловин.

У другій половині 70-х та на початку 90-х років цей метод почав широко застосовуватися при бурінні на Передкарпатті похило-скерованих свердловин.

Сутність технології з використанням природного викривлення (Величко М. М., Боднарук Т. М.) полягає в тому, що у верхніх інтервалах до глибини 2000 – 2500 м ведеться активне керування траєкторією стовбура свердловини з таким розрахунком, щоб в нижніх інтервалах він (прямуючи природним викривленням) потрапив у коло допуску. Профіль похило-скерованої свердловини, яка буриться із використанням природного викривлення, складається із таких інтервалів: умовно-

вертикального, переходу на розрахунковий азимут і набору зенітного кута; стабілізація зенітного і азимутального кутів; падіння зенітного кута з переходом на природне викривлення свердловини; природного викривлення свердловини.

Буріння свердловин за такою технологією дає можливість виконати всі роботи, пов'язані з орієнтуванням КНБК і набором кривизни, у верхніх інтервалах, що дуже важливо при турбінному бурінні.

Крім цього, така технологія дає змогу бурити нижні інтервали без обмеження навантаження на долото. За такою методикою пробурено більшість похило-спрямованих свердловин Старо-Самбірського, Орів-Уличнянського, Довбушанського, Бистрицького, Південно-Гвіздецького та інших родовищ Передкарпаття.

З історії буріння свердловин з продувкою вибою газами на Передкарпатті

Відомі чотири різновиди способу буріння з використанням газоподібних агентів за співвідношенням витрат газу та рідкої фази, які в теорії буріння відрізняються за ступенем аерації α :

I. Буріння з продувкою вибою повітрям (газом), при цьому рідкої фази нема.

II. Буріння з продувкою вибою туманом (подача рідини, зазвичай води, обробленої ПАР, в незначних об'ємах), $\alpha = 300$ і навіть більше.

III. Буріння з промиванням вибою піною (вода також обробляється ПАР), $\alpha = 50...300$.

IV. Буріння з промиванням вибою аерованим буровим розчином, $\alpha = 4...25$.

Використання цього методу буріння забезпечує:

– зростання проходки на одне долото до 10 разів і більше та механічної швидкості буріння в 3-4 рази, при цьому збільшення показників буріння залежить від величини α (чим більше α , тим більша кратність росту);

– скорочення часу на ліквідацію поглинання бурового розчину, очищення стовбура свердловини від шламонакопичення;

– збереження колекторських властивостей пласта і, як правило, скорочення часу на освоєння свердловин та збільшення їх дебітів.

Збільшення показників роботи доліт пов'язане зі зниженням тиску та кращим очищенням вибою від зруйнованої породи. Зниження тиску дає змогу проходити зони поглинання в умовах рівноваги вибірного та пластового тисків, розкривати продуктивні горизонти з аномально низьким пластовим тиском не лише в режимі рівноваги, але й при депресії, тобто, коли тиск на пласт під час розкриття є меншим від пластового.

В колишньому СРСР вперше спосіб буріння з продувкою вибою стиснутим повітрям був випробуваний в 1965 році на свердловині № 643 Долинського нафтового родовища.

На цій свердловині після спуску кондуктора діаметром 325 мм та його цементування на гирлі над превентором був установлений герметизатор та обв'язані два компресори 4N02. Буріння велося в поляницьких відкладах в інтервалі 150-842 м роторним способом шарошковими долотами У295МГЛ Дрогобицького заводу з демонтованими гідромоні-

торними насадками. Цей інтервал був пройдений трьома долотами в той час, коли при турбінному бурінні аналогічних розрізів в інших свердловинах витрачалося від 18 до 21 доліт. Механічна швидкість буріння була вищою, ніж при турбінному бурінні в 1,7 рази. На глибині 966 м почалося обвалювання порід зі стінок свердловини, що стало причиною припинення цього буріння.

На наступній свердловині (№ 640) інтервал 174-1190 м був теж пробурений трьома долотами. Перше долото підняли з вибою передчасно через злам зворотного клапана, який установлювався над долотом. Зате наступне долото пройшло інтервал 300-1031 м при зносі до 60%. Проходка на це долото в 20 разів перевищила аналогічні проходки на долото при турбінному бурінні. Третє долото пройшло лише 159 м, і буріння було припинене через появу обвалів порід, хоча при його підйомі не виявили ознак спрацювання долота.

В цю свердловину на глибину 1254 м була спущена обсадна колона діаметром 219 мм, і надалі поглиблення свердловини роторним способом велося до глибини 1469 м з продувкою вибою стиснутим повітрям. При глибині 1469 м перейшли на буріння з промиванням вибою буровим розчином, оскільки почалося осипання порід та незначний приплив газу.

Третю свердловину (№ 647) на цьому родовищі бурили електробуром Е250/8 (швидкість обертання вала становила 675 об/хв). На буріння інтервалу 165-972 м було витрачено сім доліт. Середня механічна швидкість буріння становила 28,2 м/год. Під час буріння було встановлено, що при такій швидкості обертання вала перегріваються і електробур, і долото.

Велику допомогу в організації буріння цих та інших свердловин надали тодішній заступник генерального директора об'єднання "Укрзахіднафтогаз" Б. І. Чайковський, начальник Долинського УБР В. М. Дітчук, головний інженер цього ж УБР Й. С. Андрійчук та головний механік В. А. Сокирко.

В Івано-Франківську для цих цілей був створений відділ промислових випробувань ВНДІБТ, куди були запрошені на роботу молоді, але досвідчені інженери Д. С. Бігун, Д. В. Даниш, М. Л. Шумада, В. М. Лотовський. Першим керівником відділення (1966-1968 рр.) був Л. П. Шанович, пізніше Р. С. Яремійчук (1969-1976 рр.) та В. Ф. Жданков (1976-1985 рр.), після 1985 р. – В. М. Мойсеєнко.

Практичне технічне керівництво, розробку технологій буріння цим новим способом здійснювали к.т.н. Ю. С. Лопатін, к.т.н. І. П. Елманов, інженери В. П. Мазур, І. В. Белей. Безпосередню координацію робіт здійснював к.т.н. Я. А. Гельфгат.

В цьому ж році вперше на території колишнього СРСР на родовищі Спас було розкрито нафтовий пласт з продувкою вибою туманом. В інтервалі 1300-1600 м містилося шість нафтових пластів, товщина кожного з них становила 3-8 м.

На першій свердловині (№ 35) в процесі буріння туманом до глибини 178 м були розкриті лише три пласти. Під час буріння з пласта виносилися нафта і газ. Під час спуско-підйомальних робіт свердловина заповнювалася дегазованою нафтою.

На наступній свердловині (№ 36) проектом передбачалося розкрити лише один нижній пласт. Обсадна колона була опущена до покрівлі останнього пласта. Пробуривши продуктивний пласт, в нього опустили фільтр-хвостовик і запустили свердловину в експлуатацію. Дебіт свердловини становив 15 т/добу, що дорівнювало дебіту свердловин, які експлуатували всі шість пластів.

В 1968 році буріння з продувкою повітрям велося лише на 4-х свердловинах, оскільки бурові організації зменшили буріння в західному регіоні України та переорієнтувалися на роботу в Західному Сибіру.

В 1968 році вперше було застосовано піну в свердловині № 116 Вулично в інтервалі 305-1026 м. Цей інтервал пробурений чотирма долотами, в той час як при застосуванні турбінного способу витрачалося 35-38 доліт. Механічна швидкість була в два рази більшою, ніж при турбінному бурінні.

В 1969 році за ініціативи головного інженера тресту "Львівнафтогазрозвідка" М. С. Касіяна та головного геолога Скордулі В. Д., не дивлячись на те, що в більшості свердловин спостерігалися газопрояви під час розкриття пластів, були проведені роботи з розкриття газового пласта на площі Великі Мости (Волино-Поділля), на якій на той час з 24 пробурених свердловин лише одна дала промисловий приплив.

На цій площі градієнт пластового тиску становив 0,8...0,9, що вело до незворотного погіршення колекторських властивостей порід під час розкриття пластів з промиванням буровим розчином.

На цій свердловині в інтервалі 2197-2360 м було витрачено п'ять доліт, що в 7,7 разів менше, ніж при турбінному бурінні. На гирлі свердловини були установлені універсальний превентор та обертовий превентор фірми Шеффер. На цій же свердловині були виконані і ловильні роботи з підняття з вибою долота і однієї свічки обважнених бурильних труб.

Зразу ж після досягнення проектного вибою був проведений вимір дебіту газу, який становив 100 тис. куб. м.

Актуальність цих робіт зберігається на Волино-Поділлі і нині, оскільки, як встановлено пізніше, більшість пластів тут мають аномально низькі пластові тиски, тому буріння звичайним способом не призвело до відкриття нових родовищ.

В 1970-х роках продовжувалися роботи на площах Вулично та Битків.

Унікальні дані були отримані на свердловині № 44 Спас, на якій після спуску проміжної обсадної колони був розкритий туманом лише один продуктивний пласт, дебіт якого становив при ерліфтному режимі 23,5 т/добу. Після заповнення свердловини буровим розчином та бурінні її до проектною глибини, обсадження інтервалу та цементування і перфорації процес освоєння свердловини тривав 85 діб. Початковий дебіт всіх свердловин становив лише 3 т/добу, а при подальшій експлуатації свердловин внаслідок поступового очищення пластів протягом 170 діб дебіт свердловини стабілізувався на величині 15 т/добу. Цим було наочно підтверджено доцільність розкриття пластів з продувкою вибою газом.

В тресті “Львівнафтогазрозвідка” в цьому ж році велося буріння на розвідувальних площах Росільна, Теревля та Дольнич-Колодинець, причому на останній буріння велося в двох інтервалах: 100-842 м та 1825-2208 м. На цих свердловинах проходка на долото зросла в 10 разів, а механічна швидкість буріння в 3-4 рази порівняно з турбінним бурінням.

В 1971 році цей спосіб буріння застосовувався в свердловинах на площах Вулично, Делятин та Битків. На площі Делятин буріння міцних стрийських порід велося електробуром в інтервалі 200-1315 м.

В тресті “Львівнафтогазрозвідка” цей спосіб застосовувався також при бурінні двох структурно-пошукових свердловин на площах Завадівка та Володимир-Волинська з загальним об’ємом буріння 1500 м.

В цьому тресті унікальними можна вважати результати застосування продування вибою повітрям на свердловині № 2 Новий Битків в двох інтервалах. Перший інтервал 528-1509 м був пробурений 12-ма долотами діаметром 269 замість 85 мм, які витрачалися в сусідніх свердловинах при турбінному бурінні. У зв’язку з появою обвалів стінок свердловини подальше поглиблення до проектної глибини з 3500 м велося з промиванням вибою буровим розчином. На цій свердловині зекономлено 141 долото при зростанні швидкості буріння в 3-5 разів. В цьому ж тресті буріння з продувкою повітрям велося на свердловині № 1 Чернівці в інтервалах 396-1335 м та 1349-1627 м.

З 1973 року з ініціативи Г. Г. Семака та Р. С. Яремійчука при підтримці тодішнього начальника Надвірнянського УБР О. М. Янкевича, заступника начальника об’єднання “Укрнафта” А. М. Мельничука почалися роботи щодо розкриття менілітових покладів на Битківському родовищі з продувкою вибою азотом, природним газом та пінами (свердловини №№ 662, 609 та 640). Джерелом азоту були установки рідкого азоту АГУ-8К, які заправлялися рідким азотом на Львівському кисневому заводі. Це були перші роботи в колишньому Радянському Союзі, при яких продуктивний пласт розкривався газоподібним азотом.

Після закінчення розкриття пластів були отримані дебіти, що перевищували в два рази дебіти навколишніх експлуатаційних свердловин.

На свердловині № 650 Битків розкриття продуктивних менілітових покладів велося з продувкою вибою природним газом з газопроводу, призначеною для газліфтною експлуатації. При активних нафтопроявленнях було пробурено 160 м, після чого свердловину пустили в експлуатацію.

В 1975 році розкриття нафтового пласта азотним туманом (бориславського пісковика) проводилось на свердловинах № 1 БП та 2 БП, у яких градієнт пластового тиску становив лише 0,1. Свердловини були призначені для теплового впливу на пласт.

В 1976 році продовжувалися роботи з розкриття нафтових пластів з продувкою туманом на свердловинах № 161 та № 160 Орівського родовища поблизу Борислава на глибинах понад 3000 м. З свердловини № 161 Орів було отримано приплив нафти близько 30 т/добу та газу 250 тисяч м³/добу. Після глушіння свердловини дегазованою нафтою її передали в експлуатацію.

Виконані за 8 років роботи дали змогу не лише відпрацювати технологію такого буріння, а й сформулювати вимоги до вибору об’єктів для застосування газоподібних агентів при бурінні.

Значний вклад в розвиток робіт з буріння та розкриття продуктивних пластів із використанням газоподібних агентів внесли спеціалісти ВНДІБТ Ф. Н. Авдєєв, І. В. Белей, Д. С. Бігун, І. Л. Елманов, О. В. Зоре, Р. Г. Карлов, Ю. С. Лопатін, В. П. Мазур, О. О. Межлумов, І. М. Мурадян, Ф. М. Фоменко, Г. Г. Семак, М. Л. Шумада, Р. С. Яремійчук та спеціалісти-виробничники Й. С. Андрійчук, В. М. Дітчук, Е. А. Іваницький, Я. М. Струс, О. М. Янкевич та інші.

На жаль, цей унікальний досвід в подальшому не знайшов поширення в Західній Україні. Тут, починаючи з середини 70-х років, скорочуються обсяги буріння свердловин взагалі, зменшується фінансування робіт, а багато бурових колективів починають працювати вахтовим методом в Східній частині України та в Західному Сибіру (Росія).

Освоєння свердловин

Довгий час освоєння свердловин здійснювалося традиційним способом – заміною рідин (бурового розчину водою, нафтою) або зниженням їх рівня у свердловині за рахунок подачі в трубний або затрубний простір стиснутого повітря чи опускання на сталевій лінві сваба. В 50-і роки нафтовики отримали для цих цілей пересувний компресор УКП-80. Як правило, під час освоєння свердловин силами бурових бригад пласти рідко піддавалися штучній дії з метою інтенсифікації припливу. Ці операції виконували спеціалісти нафтогазовидобувних підприємств вже на стадії експлуатації свердловин.

В кінці 50-х років, на початку 60-х років починає застосовуватись як засіб покращання фільтраційних властивостей порід-колекторів метод змінних тисків, розроблений К. В. Гаврилкевичем. Метод полягав в тому, що у свердловині створювалися тиски до величини міцності обсадної колони, при яких установлена на гирлі тарована діафрагма розривалася. Під час розриву діафрагми у вибої миттєво зменшувався тиск, що призводило до прискореної фільтрації пластового флюїду з пласта у свердловину з винесенням з пласта дисперсної фази, включаючи обважнювач бурового розчину – гематит. Повторно установлювалася на гирлі діафрагма, і процес продовжувався. Цей метод давав можливість після проведення багаторазових циклів змінних тисків досить добре очищувати пласт. Так, на свердловині № 1 Орів у 1961 році були проведені роботи цим методом при освоєнні менілітових відкладів при глибині свердловини 3000 м. Після проведення кожних п’яти циклів свердловина промивалася пінним потоком до очищення вибою. На цій свердловині було проведено 40 циклів протягом шести діб, внаслідок чого з свердловини було вимито близько 6 т гематиту, який потрапив під час розкриття менілітових відкладів у пласт. При такому забрудненні пласта отримати промисловий приток було неможливо. Цей метод успішно застосовувався в Бориславі та інших нафтових регіонах Західної України.

В Бориславі в окремих випадках виклик припливу здійснювали і таким чином. У свердловину опускали насосно-компресорні труби з установленою чавунною заглушкою в нижній частині колони. Опустивши ці труби на глибину 1500-2000 м та обладнавши відповідним чином

гирло свердловини, в насосно-компресорні труби вкидали сталевий лом, який, падаючи донизу, руйнував чавунну перемичку, внаслідок чого стовп рідини із затрубного простору швидко переміщувався в середину НКТ. Цим створювали миттєву депресію на пласт, що забезпечувала створення умов для припливу нафти чи газу з пласта.

В 70-х роках на Прикарпатті було пробурено 26 свердловин глибиною понад 4300 м. Проте лише поодинокі свердловини були освоєні з дебітом від 20 до 100 т/добу. В 10-ти свердловинах були отримані припливи від 2 до 5-6 т/добу. А в 8-ми свердловинах продуктивні горизонти виявилися “сухими”, хоча за заключенням промислово-геофізичних служб пласти були нафтогазонасиченими.

В Івано-Франківському інституті нафти і газу (нині Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу) почалася реалізація нової програми освоєння свердловин. Вже до 1981 року проф. Яремійчуком Р. С. були розроблені наукові засади технології, яка давала змогу створювати в зоні продуктивного пласта багаторазові миттєві депресії на пласт при використанні високонапірних струминних апаратів. В цей час і в наступні роки розроблені різні модифікації струминних апаратів (стаціонарні, вставні, з прямою та зворотною циркуляцією типу УОС, УЕОС, ПГДС) з фіксацією тиску у зоні пласта за допомогою глибинних манометрів або з фіксацією тиску на поверхневих осцилографах від глибинних датчиків. В розробці цієї технології та обладнання брали участь Б. М. Кифор, В. Р. Возний, В. М. Лотовський, Г. О. Лісовський та інші інженери. Вперше струминні апарати були випробувані в Долині (1980), пізніше в Старому Самборі (1981) і найбільш повно, як на той час, на свердловині № 6 Східниця (1981).

Цією технологією створювалися по чергово миттєві депресії на пласт з наступним відновленням гідростатичного тиску. Під час створення миттєвих депресій відбувалося очищення пристовбурної зони пласта від продуктів кольматації, винесення у свердловину різних механічних домішок, продуктів гідратації глин, осадів солей і т. ін. Розроблені конструкції струминних апаратів давали змогу періодично записувати криві відновлення тисків, а їх інтерпретація – оцінювати заміну фільтраційних властивостей порід в процесі освоєння свердловини.

На свердловині № 6 Східниця внаслідок технологічних помилок під час розкриття пласта та цементування експлуатаційної колони в пласт через тріщини проникла велика кількість глинистого розчину та обважнювача. Оскільки свердловина № 3 Східниця була здана в експлуатацію з добовим дебітом понад 200 т, то отримання дебіту на свердловині № 6 лише 3 т заставило виробничників шукати шляхи збільшення дебіту цієї свердловини. На цій свердловині були отримані такі наукові та виробничі дані:

- встановлені залежності для визначення величини депресії на пласт при різних параметрах струминного апарата, конструкції свердловини, тисках, що створюються на гирлі наземними агрегатами під час проведення операцій, та величинах припливу з пласта;

- експериментально було підтверджено можливість створення вакууму в підпакерній зоні пласта, “холодного кипіння” рідини при відсутності припливу з пласта;

- під час проведення 106 циклів “депресій-репресій” з пласта було вилучено близько 40 м³ бурового розчину, який був поглинутий тріщинами при цементуванні з протитиском.

Практично ці роботи дали життя новій технології, яка в наступні роки була перенесена в Росію (Західний Сибір, республіка Комі, Оренбург та в інші нафтогазонасні райони), де за період 1984-1999 рр. вона застосовувалась на більш як 5-ти тисячах свердловин.

На жаль, ця технологія не знайшла подальшого застосування на Передкарпатті.

Нині вона застосовується для очищення привибійних зон нафтових і газових свердловин з метою збільшення дебітів видобувних або приймальності нагнітальних свердловин, для гідродинамічних досліджень пластів.

Значний внесок в методи гідравлічних досліджень свердловин зроблено видатним вченим-нафтовиком Е. Б. Чекалюком.

З інженерів-практиків та дослідників, які працювали над проблемою освоєння свердловин, треба відзначити Ю. Д. Качмара, який багатовіс нового в теорію та практику гідравлічного розриву пластів, в розробку технологій гідропіскоструминної перфорації, в удосконалення методів кислотних обробок пластів.

В липні 1955 року Е. Чекалюком розроблена інструкція для проведення ГРП, затверджена управлінням “Бориславнафта”, а в грудні він завершив науковий звіт по темі № 5 ЦНДЛ об’єднання “Укрнафта”. У звіті вперше запропоновано уявлення про механізм ГРП на базі теорії пружності та опору матеріалів. Розроблена теорія перевірена промисловими експериментами.

На Долинському родовищі застосовували технологію, розроблену О. Гайворонським та В. Бабченком. ГРП проводили в’язкою рідиною 60-90 м³ – суміші гудрону з веретенною оливою та 5-6 т піску. Нагнітання в пласт спочатку здійснювали агрегатами АН-500 при витраті 0,8 м³/хв. і тиску до 30 МПа. Всього проведено 40 ГРП, після яких одержано додатково близько 90 тис. т нафти.

На Долинському родовищі Ю. Качмар, В. Касянчук, Р. Мисьович застосовували технологію високошвидкісного ГРП з нагнітанням в пласт з витратою 1,6-1,8 м³/хв. при тиску на гирлі близько 50 МПа малов’язкої нафти або води в об’ємі 100-500 м³.

Практично всі ГРП здійснювались на родовищах Передкарпаття, які характеризуються низькопроникними колекторами.

В НГДУ “Долиннафта” у 1970-95 рр. В. Касянчук використав водні 0,4% розчини ПАА для ГРП у нафтових і водонагнітальних свердловинах. Це дало змогу значно, майже на 15 МПа, зменшити гідравлічні втрати і збільшити витрату рідини до 2 м³/хв., застосовуючи 8-10 агрегатів 4 АН-700.

Взагалі ВАТ “Укрнафта” в 1970-80 рр. проводилось щорічно близько 50 ГРП з середнім додатковим видобутком нафти 350-500 т на одну операцію.

Пізніше, у зв’язку зі значною обводненістю свердловин, ефективність і кількість ГРП знизилась. У 1981-95 рр. вона становила 200-300 т на одну свердловину при зменшенні їх кількості до 15-25 на рік.

В 1996 р. ВАТ “Укрнафта” за ініціативою Г. Лісового, М. Лилака і В. Гаркота придбало комплект спецтехніки фірми “Stewart & Stivenson”: 3 насосні агрегати FC-2251 з сумарною витратою 3,6 м³/хв. при тиску до 70 МПа, змішувач, комп’ютеризовану станцію керування і програми для проектування процесу фірми Meyer & Associates, Inc. Також придбано керамічний закріплювач тріщин високої міцності замість піску – пропант та рідину – водний гель фірми Clearwater, Inc.

ЦНДЛ ВАТ “Укрнафта” (Ю. Качмар, Ф. Бурмич, А. Андрусак, В. Цьомко) та Долинське тампонажне управління (М. Дячишин, І. Дмитришин, В. Савка, І. Кузів) здійснюють проектування і проведення процесів за новою технологією в свердловинах глибиною від 1500 до 6000 м.

За 1997-99 рр. проведено близько 30 потужних ГРП. Додатковий видобуток нафти зріс до 900 т на одну свердловину-операцію.

ЦНДЛ розробляє і впроваджує власні рецептури рідин для ГРП, щоб здешевити процес.

Цікаві та важливі роботи з гідропіскоструминної перфорації перфораторами з похилими каналами в 80-х роках виконані Г. Д. Савенковим разом з В. С. Бойко. Ці роботи показали можливість збільшення поверхні припливу з пласта з метою підвищення продуктивності свердловин.

Проблемі освоєння свердловин були присвячені також докторські дисертації М. М. Іванюти та Р. С. Яремійчука.

Деякі катастрофи при бурінні свердловин

У 1907 році в Бориславі страшна катастрофа мала місце на свердловині “Ойл Сіті”, яку бурила американська фірма у Тустановичах в районі Понерли. Пророча назва (“Нафтове місто”) без сумніву себе виправдала, а завдяки отриманому відкритому нафтовому фонтану стала відома на весь світ. При глибині 927 м вона в 1907 році видала 860 т нафти за добу. На початку 1908 року при продовженні буріння був розкритий другий продуктивний горизонт, який К. Толвінський назвав “бориславським пісковиком”. День трагічної слави цієї свердловини настав 19 червня 1908 року, коли з глибини 1016 м стався великий відкритий фонтан нафти і газу. Виверження нафти почалося так раптово і несподівано, що для приймання такої великої кількості нафти промисловці не були готові. У перші 24 години два парових насоси змогли перепомпувати лише 1800 т нафти, решта нафти залила навколишні поля. Кількість виверженої нафти зростала на очах, щоразу заливаючи все більшу територію. Наступного дня нафту помпували вже вісім парових насосів, але відібрати її всю було практично неможливо. Нафту річка Тисмениця несла у Дністер. Величезна армія робітників працювала над будівництвом загати навколо свердловини, насипаючи земляні вали. Щодобовий викид становив 3000 тонн нафти та 900 тисяч кубічних метрів газу. Тустановичі, Борислав, Трускавець, Дрогобич, всі навколишні поля були насичені масляним конденсатом, і вся територія Дрогобицького повіту знаходилися мов би над гирлом вулкану. Тодішня хроніка писала – одна іскра і центр нафтової промисловості буде знищений. На допомогу прийшло австрійське військо. До 17 червня ситуація була взята під контроль, а потік нафти був скерований до земляних збірників. Внаслідок нафтових і газових викидів навколишні ліси та поля були знищені. При-

родний газ викидувався в атмосферу. Його з великої відстані було видно неозброєним оком.

Під час грози 4 липня 1908 року від блискавки “Ойл Сіті” разом з резервуарами нафти загорілася. Великий струмінь палаючих нафти і газу вирвався з-під землі на висоту 100 метрів, створивши загрозу всьому Бориславу. Річкою Лошень плив вогняний потік нафти, охоплений чорною хмарою такого диму, що серед білого дня жителі вимушені були освітлювати свої помешкання. Пожежу було видно з відстані 50 кілометрів, вона продовжувалася протягом 21 доби. Вид палаючої вежі назвали “Галицьким Везувієм”. Крім “Ойл Сіті”, пожежа охопила ще декілька свердловин, а також прилеглі до них збірники нафти. Для ліквідації пожежі вогняний простір було вкрито бляхою з отворами для відведення згоряючих газів. Потім бляху було засипано землею, нафта ж витікала трубами до долів (земляних ям). Палаючі гази, що гасилися в одному місці, одночасно спалахували в іншому. Не допомагали і бомби, наповнені вуглекислою. Фонтан зупинився від обвалів порід у стовбурі свердловини.

Після цієї катастрофи в Бориславі, Биткові та Східниці траплялося ще багато відкритих фонтанів, але катастрофи таких масштабів більше не повторювалися.

Інженери почали працювати над проблемами закріплення за колонного простору цементним розчином з метою створення монолітної конструкції свердловини.

Почалися роботи і над створенням захисного гирлового обладнання, яке було б спроможним скеровувати потік нафти і газу з свердловини у збірники. Вже в 30-х роках з’являються перші ковани превенторні установки, вдосконалюється система з’єднання всіх колон, які опускаються в свердловину.

Наступною аварією, яка увійшла в аннали нафтогазової історії, був відкритий газовий фонтан у 1946 році на свердловині № 105 Угерсько. Внаслідок недостатньої геологічної інформації, порушення технологічної дисципліни при відсутності на свердловині надійних превенторів виник потужний газовий фонтан, який пізніше запалився. Заграву від полум’я вночі було видно на відстані 100 км або й більше. Щодоби викидалося в небо понад 1,5 мільйона кубічних метрів газу. Навколо свердловини утворився кратер, заповнений водою. Враження від газового фонтану було приголомшливим. Величезний кратер довжиною 100-120 м та шириною близько 30 м був заповнений киплячою та кликочучою рідиною, над поверхнею якої простягалася величезна куля згоряючого газу та клуби пари. Від потужного вирування рідини бурильні труби та інші частини зануреного обладнання пересувалися та рухалися. За два роки в атмосферу було викинуто понад 1 млрд. м³ газу.

Буріння цієї свердловини велось трестом “Укргаз”, керуючим якого був А. О. Дегтярьов, а головним інженером П. Строна. Бурова бригада складалася переважно з місцевих робітників (села Дашава, Угерсько).

Відкритий газовий фонтан не вдавалося закрити впродовж двох років. З Москви в 1947 році відрядили до Стрия відомого вже в той час молодого інженера Гельфгата Я. А. Було прийнято рішення використати свердловину, яка знаходилася на відстані близько 500 м від свердловини

№ 105 Угерсько і на якій вже був спущений кондуктор для буріння похило-скерованої свердловини. Тут вперше були використані турбобури, виготовлені в ремісничих майстернях, інклінометри, а замість кривих перехідників використали вигнуту бурильну трубу. Після закінчення буріння цієї свердловини, обсадки її трубами та освоєння без використання штуцера, тобто при необмеженому відборі газу на свердловині № 105 фонтан послабився, а відтак згас. Очевидно, що зменшення відбору газу співпало з обвалами породи в зоні продуктивного пласта. Сьогодні на місці цієї свердловини залишився кратер, що став малим озером.

Ще одна катастрофа мала місце в 1959 році на Рудківському газовому родовищі. 2 травня в селі Тулиголови вздовж річки Дністер газ вирвався через заколонний простір закінчених бурінням газових свердловин до верхніх водяних пластів і утворив багато грифонів. Газ мов би зорав землю, на болотах видував великі грязьові бульбашки та викидав болото з газом на висоту до десяти метрів, зрихлював землю під печами окремих хат, в пивницях. На відстані близько 10 кілометрів газ вирвався через розлом ріки Дністер. 2 травня співпало з Великодніми святами, а людей терміново почали евакуювати за межі району цього лиха. Виходи газу підпалили. І вдень, і вночі горів газ над водою вздовж ріки Дністер, вздовж села, на полях і на болотах.

Причиною цього лиха було те, що на Рудківському газовому родовищі в масовому обсязі бурилися похило-скеровані свердловини, прообраз майбутнього кущового буріння. При цьому використовувалися спеціальні вишки, в яких на короні пересувався кронблок, а в самій вишці ротор теж співставлявся з пересунутим кронблоком по виску на 1 метр. Цієї відстані було достатньо, щоб з однієї вишки прокладалися траси двох свердловин, вибої яких розводилися один від одного на 700 м. Технологія кріплення свердловин була недосконалою. На обсадних колонах не установлювалися центратори, і вони ввігнутою стороною лягали на стінку свердловини.

Під час буріння однієї з свердловин почався неконтрольований газовий викид. Його вдалося утримати превенторами, і тиск через затрубний простір кондуктора утворив тріщини і дав можливість газу вирватися на поверхню, проникнути у верхні пласти прісної води.

Для ліквідації цього лиха фонтануючу свердловину заповнили цементним розчином через бурильні труби, спущені перед цим до вибою, ліквідувавши таким чином газовий фонтан.

Для розвантаження від газу верхніх водяних горизонтів на глибину до 100 м було пробурено кілька сотень свердловин, верхні кінці обсаджених труб були нарощені вверх на 8...10 метрів, а газ, що виходив з них, підпалювався. Вся територія нагадувала величезний багатосвічковий світильник. Протягом літа 1959 та зими 1960 років з Руднівського родовища витекло в атмосферу близько 1 млрд. м³ газу.

Головним уроком цієї катастрофи були розроблені умови до проектування конструкцій газових свердловин, оснащення обсадних колон центраторами та розробка технології заміщення глинистого розчину цементним при ламінарній течії потоків рідин (Т. Ю. Єременко та Д. Ю. Мочернюк), а створення надлишкового тиску під превентором на тужавіючий цементний розчин було запропоновано та реалізовано впе-

рше П. В. Шинкариком в 1962 році, хоча в літературу воно ввійшло в 1964 році від А. А. Гайворонського.

Короткі відомості про науковців-буровиків, що працювали з 1945 до 2000 року на теренах Передкарпаття

З кінця 40-х років при Львівському політехнічному інституті на нафтовому (газонафтопромисловому) факультеті формується наукова школа буріння свердловин. Ця школа зосереджується на кафедрі буріння нафтових і газових свердловин навколо завідувача кафедри к.т.н., доцента, а згодом д.т.н., професора Єременка Т. Ю. На перших порах вона виключно була присвячена проблемам міцності обсадних труб, методам розрахунку обсадних колон. Разом з Т. Ю. Єременком працювали на той час ще молоді дослідники Д. Ю. Мочернюк, М. О. Жидовцев, А. О. Федоров, О. В. Тищенко, С. Ф. Білик, П. О. Віслобіцький, Л. І. Піскозуб, В. В. Кравець. У Львівському політехнічному інституті була сконструйована та виготовлена унікальна експериментально-дослідна установка для дослідження обсадних труб.

З цієї групи дослідників пізніше вийшли вчені – доктори наук Дмитро Мочернюк, Микола Жидовцев, Сергій Білик.

З 1967 року науково-дослідні роботи в галузі буріння свердловин розвиваються в Івано-Франківському державному технічному університеті нафти і газу, де формуються окремі школи з різних проблем буріння свердловин. Школу проф. Єременка Т. Ю. розвиває і нині д.т.н., проф. Коцкулич Я. С.

У 1982 р. захистив докторську дисертацію Роман Яремійчук, у 1992 – Ярослав Коцкулич, пізніше Богдан Навроцький, Василь Векерик, Михайло Мислюк, Євстахій Крижанівський, Георгій Семенов, Петро Огородніков, Василь Мойсишин, Богдан Копей. З середини 70-х років в Університеті працював російський вчений, д.т.н., професор Віталій Ясов.

Професори Євстахій Крижанівський, Богдан Копей, Олег Карпаш, Василь Івасів, Борис Чернов у своїх докторських дисертаціях розробляють теоретичні основи міцності та надійності роботи бурильних колон, досліджують опір втомі бурильної колони, розробляють методи прогнозування довговічності їх роботи.

Професори Петро Огородніков, Василь Векерик, Василь Мойсишин досліджують динаміку бурильної колони, створюють оригінальні конструкції амортизаторів бурильної колони.

Професори Віталій Ясов і Михайло Мислюк займалися дослідженнями процесів попередження і ліквідації ускладнень при бурінні, розробили гідродинамічну модель поглинаючих тріщинних пластів, методологію вибору технологічних рішень в умовах інформаційної невизначеності тощо.

Професор Роман Яремійчук розробив нові технології освоєння свердловин шляхом управління фільтраційним станом привибійної зони свердловини, розробив методи відновлення та покращання фільтраційних характеристик пласта-колектора за рахунок створення багаторазових миттєвих депресій та репресій на пласт, розробив новий клас струминних апаратів для цих цілей.

Над удосконаленням конструкції бурових доліт працюють професори Юрій Петрина, Георгій Семенцов, Оксана Драганчук, Ярослав Дрогомирецький.

Професор Юрій Курніков заклав з 1980 р. науково-дослідні та конструкторські роботи з створення високосилового магнітного уловлюючого інструменту на базі постійних керамічних магнітів.

У підготовці цього матеріалу брали участь кандидати технічних наук Бражина Г. Й., Марухняк М. Й., Качмар Ю. Д., інженери Андрусак А. М., Величко М. І.

Стаття поступила в редакційну колегію 11.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Мойсишиним В.М.

ENGINEERING CONTRIBUTION TO TECHNOLOGY OF BORING DRILLING OF MINING HOLES ON PRICARPATTI AFTER 1939

R. S. Yaremiychouc

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019; Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
e-mail: public@nung.edu.ua*

We describe the development of well drilling technologies at Precarpathia in 1945-2000. We consider the drilling technologies, where the gas stream is given under pressure, the drilling of large diameter wells, the drilling of superdeep wells and drilling of complex profile wells.

Key words: boring drilling of trunks of mining holes of large diameter, boring drilling of ramified-horizontal mining holes, boring drilling by the reactive-turbine boring, washing liquids, tamponouvannya of mining holes, mastering of mining holes.

УДК 622.276.63

АНАЛІЗ ЗАСТОСУВАННЯ НОВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ КИСЛОТНОГО РОЗРИВУ ПЛАСТА ТЕРИГЕННИХ КОЛЕКТОРІВ

Ю. Д. Качмар, В. В. Цьомко, І. Ф. Климович, Я. О. Заливаха

*Науково-дослідний і проектний інститут ВАТ "Укрнафта";
м. Івано-Франківськ, Південний бульвар ім. Пушкіна, 2;
тел. +380 (342) 77-61-40, 77-61-49; grp@ndpi.ukrnapfta.com*

Проаналізовано розкриття і розвиток тріщин під час проведення поінтервальної дії кислотами на окремі пласти та дії на весь багатопластовий розріз свердловин. Визначено розміри тріщин, розміри зон розчинення породи в тріщинах і навколо них у таких умовах. Наведено приклад кислотного розриву в багатопластовому розрізі свердловини. Показано результати застосування нової технології.

Ключові слова: кислотний розрив, поінтервальна дія, дія на весь розріз, теригенні породи

Нафтогазові поклади України перебувають на пізній стадії розробки: знижується пластовий тиск на одних родовищах і значно зростає обводненість продукції на інших, тому з кожним роком видобувати вуглеводні стає щораз складніше. За такого стану розробки потрібно постійно вдосконалювати технологію обробок привибійної зони свердловин. Для підвищення ефективності робіт з інтенсифікації припливу вуглеводнів розроблено нову технологію кислотного розриву пласта (КГРП) [1].

Суть розробленої технології полягає в тому, що послідовно нагнітають в пласт солянокислотний розчин (СКР) і глинокислотний розчин (ГКР) з невеликою витратою, що викликає збільшення тиску, достатнього для розкриття тонкої тріщини (від 0,3 мм до 0,5 мм). Внаслідок великих фільтраційних втрат 97 % кислотного розчину проникає в пласт навколо тріщини. Глинисто-карбонатний цемент на стінках тріщини і в породі навколо тріщини розчиняється, внаслідок чого зростає проникність навколо тріщини і зерна кварцу, що становлять скелет породи, відшаровуються від стінки тріщини. Після ГКР в пласт нагнітають протискуючу рідину (ПРР), наприклад, пластову воду з поверхнево-активною речовиною (ПАР), з витратою і об'ємом не менше ніж у 1,5 раза більшими витрати і об'єму кислотного розчину, що забезпечує збільшення ширини тріщини і переміщення по ній відшарованих зерен кварцу. Після завершення нагнітання рідин і зниження тиску до величини, меншої за тиск змикання тріщини на відшаровані зерна, тріщина закріплюється. Внаслідок КГРП в пласті створюється самозакріплена тріщина і зона високої проникності навколо неї, що забезпечує збільшення припливу пластових флюїдів до свердловини.

За три роки впровадження КГРП в теригенних колекторах проведено 32 свердловино-операції, додатково видобуто 31595 т нафти і 13,8

млн.м³ газу, тобто 831 т нафти і 0,36 млн.м³ газу на одну свердловино-операцію. Найбільші прирости видобутку вуглеводнів одержано у свердловинах родовищ Передкарпаття з теригенними слабкокарбонатними колекторами.

Результати проведених КГРП, які з урахуванням застосованих технологій розділено на три групи, наведено в табл. 1. До першої групи віднесено КГРП поінтервальні, у частині розрізу під пакером або поміж двома пакерами, до другої – після потужного ГРП для очищення тріщини і навколо неї від продуктів розкладу гелю, до третьої – КГРП в свердловинах з більшою обводненістю, в яких кислотний розчин діяв на велику частину всього розкритого розрізу.

Табл. 1. Додатковий видобуток нафти і газу після КГРП (станом на 01.01.2009)

Спосіб дії	Кількість, свердловино-операцій	Дебіт перед КГРП,		Додатково видобуто, всього		Додатково видобуто, на один КГРП		Час роботи зі збільшенням дебітом, місяці
		рідини, т/д	нафти, т/д	нафти, т	газу, т.м ³	нафти, т	газу, т.м ³	
Поінтервальні	9	1,6	0,7	13524	6817	1503	757	213
Після ПГРП	7	1,15	0,7	8874	3756	1268	537	119
На весь розріз	16	4,8	0,8	4704	2582	294	161	134
Всього	32	-	-	27102	13155	847	411	466
На один КГРП	-	1,9	0,9	847	411	-	-	14,6

Аналіз результатів наведених в табл.1, свідчить:

– найвища ефективність робіт забезпечується проведенням КГРП в перспективній частині розрізу свердловини під пакером чи поміж двома пакерами;

– ефективним є застосування процесу для очищення тріщини і порового простору навколо неї від продуктів розкладу гелю після проведеного ПГРП;

– найменш ефективним є застосування в багатопластових розрізах обводнених свердловин з продуктивними пластами малої товщини, які чергуються з непродуктивними пропластками аргілітів.

Якщо прийняти середні витрати на проведення КГРП з КРС – 200,0 тис. грн, то за різниці між ціною реалізації нафти та її собівартістю 500 грн/т для окупності КГРП потрібно додатково видобути $200000/500 = 400$ т нафти. Отже, витрати на проведення КГРП по всьому розрізу не окупуються, тому необхідно застосовувати поінтервальні дії на частину розрізу свердловин, вибирати свердловини з більшим додатним скін-ефектом і з меншою обводненістю.

Проведемо порівняльний аналіз дії КГРП поінтервально, у продуктивних пластах під пакером або між пакерами, та його дії по всьому багатопластовому розрізу свердловини.

У теригенних колекторах поінтервальні КГРП проводились з витратою 0,25-1,0 м³/хв під час послідовного нагнітання 5,5-11 м³ СКР

+5,5-11 м³ ГКР +5-15 м³ ПРР в пласт, за високих градієнтів тиску 1,9-2,2 МПа на 100 м. глибини свердловини. СКР складався з 15% НС1, а ГКР з –15 % НС1 +2-3 % HF з додаванням інгібіторів, ПАР і стабілізаторів.

Під час нагнітання в пласт СКР і ГКР з постійною витратою, як правило, спостерігалось зниження тиску на усті свердловин, що свідчить про активну взаємодію їх з породами. З переходом на нагнітання з такою ж витратою ПРР, яка не розчиняє породи, тиск на усті зростає.

За програмою Меєра Мґґас виконано аналіз розвитку тріщин з використанням наявних геолого-промислових даних про характеристики об'єктів обробки та про режими нагнітання СКР, ГКР і ПРР, за схемою, наведеною на прикладі свердловини 579-Битківська [2, 3]. Результати аналізу типових процесів у чотирьох свердловинах, для яких визначено розміри тріщин та зони дії в тріщинах СКР, ГКР і ПРР, наведено в таблиці 2.

Зони розчинення породи СКР і ГКР по півдовжині тріщин на їхніх стінках у свердловинах з пластовою температурою від 48 °С до 63 °С і розкритою шириною 0,06 см дорівнюють зоні проникнення кислоти по тріщинах, створених ними, а саме: 10-28 м – для СКР та 12-36 м – для ГКР. Ширина тріщин після розчинення глинисто-карбонатних складових породи змінюється незначно, але навколо тріщини створюється зона підвищеної проникності порід шириною декілька сантиметрів. Зерна кварцу, що відокремилися від стінок тріщини, а також нерозчинні компоненти кольматанту під час нагнітання ПРР переміщуються по тріщині.

Табл. 2. Характеристики свердловин і технологія КГРП в теригенних колекторах

№ свердловини	Інтервали перфораций, м	Пласт, шифр і ефективна товщина, м	Пористість, %	Гемпература густа, °С	Градієнт Р _{пл} , МПа на 100 м	Об'єм СКР/ГКР, м ³	Об'єм ПРР, всього/в пласті, м ³	Витрата нагнітання / протискування, м ³ /хв	радієнт Р _{грп} , МПа на 100 м	Розміри вертикальної тріщина			
										висота, м	півдовжина, *м	ширина, мм	Зона проникнення, см
579 Битківська	1680-1692	Мл-2 12	8	48	0,62	5,5/ 5,5	20/ 14	0,4/ 1,0	1,9	12	28/ 36/ 67	0,6	10
Об'єм СКР+ГКР-0,91 м ³ /м, а ПРР –1,67 м ³ /м товщини; q _н =1,1т/д, води-14%, Гф= 1900м ³ /т Додатковий видобуток нафти всього 1673 т, на один місяць 35 т/міс. Газу – 1,59 млн м ³ ; Тривалість -48 місяців													
485 Битківська	2246-2259	Мл 2-10	10	63	0,51	5,5/ 5,5	22/ 14	0,25/ 0,55	1,9	13	12/ 19/ 28	0,6	10
Об'єм СКР+ГКР-1,1 м ³ /м, а ПРР –1,0 м ³ /м товщини; q _н =0,75 т/д, води-60%, Гф= 520м ³ /т Додатковий видобуток нафти всього 1071 т, на один місяць 41т/міс. Газу – 0,47 млн м ³ ; Тривалість -26 місяців													

Примітки: *) тріщина, утворена СКР/ СКР+ГКР/ СКР+ГКР+ПРР

За даними гідродинамічних досліджень виявлено підвищення проникності пластів у привибійній зоні та зменшення скін-ефекту, що підтверджує ефективність застосованої технології.

Отже, в результаті аналізу розкриття і розвитку тріщин під час поінтервальних КГРП виявлено зони дії СКР, СКР+ГКР і СКР+ГКР+ПРР, кількісно визначено розміри тріщин, розміри зон розчинення і зон проникнення продуктів реакції під час дії на пласти невеликої товщини.

Оскільки більшість КГРП (табл.1) проведено по всьому розрізу свердловини, де інтервали перфорації в продуктивних пластах розділені інтервалами непродуктивних порід, тобто умови обробки значно відрізняються, розглянемо приклад типового процесу гідророзриву в свердловині 1522-Долинська.

Свердловина розташована в нерозробленій частині V ділянки менілітових відкладів Долинського родовища. Нижні меніліти перфоровані в інтервалі 2240-2142 м, середні – в інтервалі 2017-1857 м. Вибій – 2258 м. Перфорацією розкрито низькопроникні нафтонасичені алевролітисті пісковики пористістю 9 %. Свердловина експлуатується ШГН з поточним дебітом 1,2 т/д нафти, води – 0,03 т/д, обводненістю 12 %, газовим фактором – 280 м³/т. Градієнт пластового тиску – 0,9 МПа на 100 м глибини свердловини.

КГРП проведено 06.02.2009 р. з метою визначення видобувних можливостей покладу в цій частині родовища. Свердловину заглушили пластовою водою, опустили НКТ діаметром 73 мм на глибину 2240 м. Під час КГРП при відкритому затрубному просторі запомпували 10 м³ солянокислотного розчину з витратою 0,4 м³/хв і за тиску в НКТ 4,0 МПа. При закритому затрубному просторі нагнітали 10 м³ глинокислотного розчину спочатку за тиску 19,5 МПа, який різко знизився до 17,5 МПа, тому витрату збільшили до 0,55 м³/хв, за якою тиск в НКТ піднявся до 18 МПа і стабілізувався. Тиск в затрубному просторі становив спочатку 16 МПа, а наприкінці нагнітання ГКР – 15,5 МПа. Протиснули СКР+ГКР в пласт нагнітанням в НКТ 25 м³ ПРР (пластової води з ПАР) з витратою 1,0 м³/хв та 4 м³ ПРР в затрубний простір з витратою 0,4 м³/хв. за тиску в НКТ 26,8 – 25,0 МПа. Всього в пласти запомповано 10 м³ СКР і 10 м³ ГКР та 29 м³ (у пласт 23 м³) ПРР. Після завершення нагнітання за 8 хв тиск в затрубному просторі знизився від 15,3 до 13,8 МПа. Після КГРП із свердловини за два місяці додатково видобуто 69 т нафти, тобто 34 т/міс.

Для процесів, що проводять у багатопластовому розрізі на рис. 1 наведено типову термограму, записану відразу після нагнітання у пласти СКР+ГКР+ПРР в інтервалі 1800-2280 м. Рідини поглинались по всьому розрізу, у шести інтервалах. Графік зміни основних параметрів процесу наведено на рис. 2.

Швидке зниження тиску з 19,5 МПа до 17,5 МПа на початку нагнітання кислоти в пласт може свідчити про подолання певного бар'єру, кольматуючого вхід у тріщини, що розкрилися по розрізу свердловини.

Суттєвої зміни параметрів під час проведення КГРП поінтервально та в багатопластовому розрізі не спостерігається, тобто за їх зміною не

вдається визначити як розвиваються тріщини у багатопластовому розрізі. Спробуємо виявити такі зміни, порівнюючи в табл.3 параметри типових процесів з урахуванням розподілу продуктивних пластів у багатопластовому розрізі, ефективної товщини та пористості поглинаючих КР колекторів, як і у табл. 2, для поінтервальних обробок.

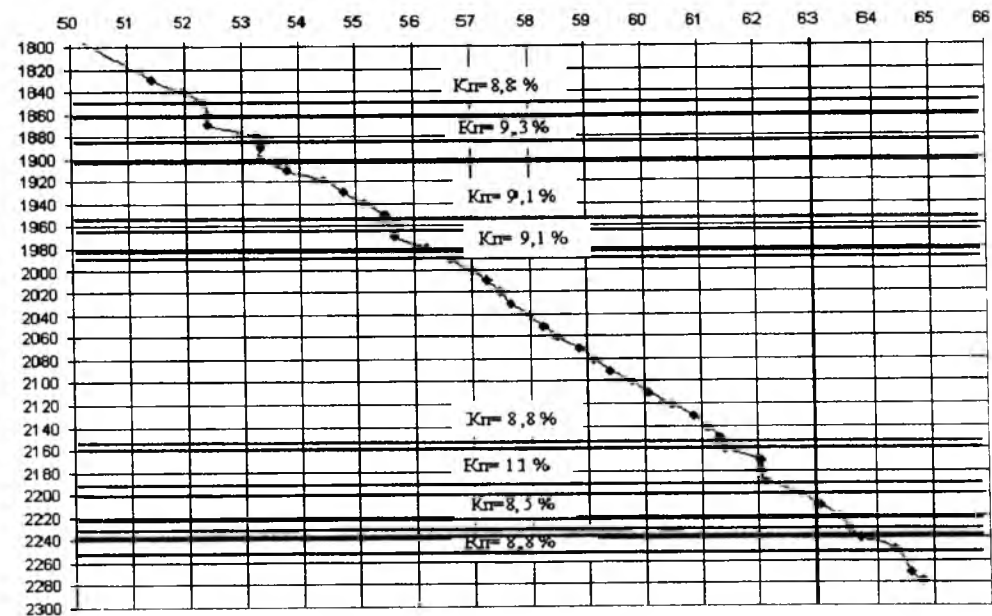


Рис. 1. Термограма після проведення КГРП у св. 1522-Долинська

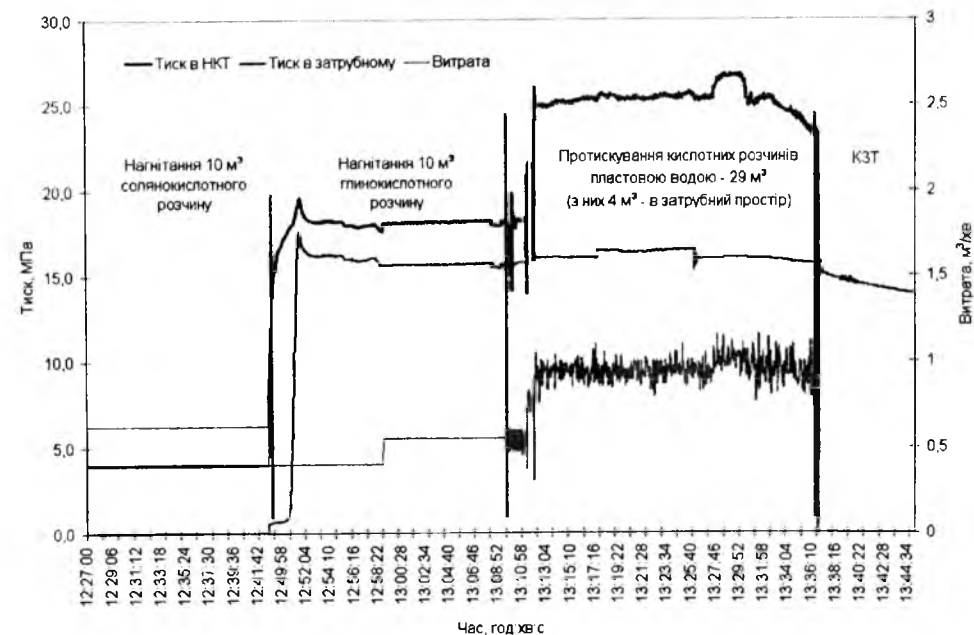


Рис. 2. Графік зміни основних параметрів при КГРП у св. 1522-Долинська

Аналізуючи дані, наведені в табл. 3, можна побачити, що під час КГРП у всьому багатопластовому розрізі:

– дії КР піддавалися 6-13 пластів товщиною по 0,5-5,0 м, загальною товщиною 16,5-25,0 м і пористістю 9,0-11,0 %, а градієнт пластового тиску становив 0,88-1,03 МПа на 100 метрів глибини залягання пластів;

– запомпований у пласт об'єм рідин становив 10-11 м³ СКР +10-11 м³ ГКР+20 - 35 м³ рідини протискування з витратою 0,9-1,0 м³/хв при градієнтах тиску розриву 1,75-2,0 МПа на 100 метрів глибини свердловини;

– під час нагнітання в пласт СКР і ГКР з постійною витратою спостерігалось зниження тиску на усті свердловин на 2,0-4,5 МПа, що свідчить про активну взаємодію їх з породами;

– для розрахунку розмірів вертикальної еквівалентної тріщини і зон розчинення в багатопластовому розрізі застосовано досвід моделювання поінтервальних КГРП. Для цього замінено численні пласти в багатопластовому розрізі одним пластом, товщина якого дорівнює їх сумарній товщині. При дотриманні таких передумов зони розчинення породи СКР і ГКР по довжині тріщин на їхніх стінках у свердловинах з пластовою температурою 60 °С і вертикальною тріщиною шириною 0,05-0,06 см дорівнюють відповідним півдовжинам проникнення кислоти по створених ними тріщинах, а саме: 10-22 м – для СКР та 18-30 м – для ГКР. Ширина тріщин після розчинення глинисто-карбонатних складових породи змінюється незначно, але навколо тріщини створюється зона підвищеної проникності порід шириною 8,0-10,0 см. Зерна кварцу, що відокремилися від стінок тріщин, а також нерозчинні компоненти кольматанту під час нагнітання ПРР по розкритих тріщинах півдовжиною 28-40 м переміщуються по них та закріплюють після зниження тиску на усті.

Таким чином, проведено аналіз розкриття і розвитку тріщин під час проведення КГРП у свердловинах з багатопластовим розрізом, виявлено зони дії СКР, СКР+ГКР і запомпованої після них рідини протискування, кількісно визначено розміри тріщин, розміри зон розчинення і зон проникнення продуктів реакції під час дії на численні пласти невеликої товщини.

З наведених в табл. 3 прикладів процесів можна побачити, що параметри ефективного КГРП у свердловині 1522-Долинська практично не відрізняються від параметрів у свердловині 1686-Бориславська, тому меншу ефективність обробок можна пояснити проникненням КР у малопродуктивну частину розрізу свердловин. Водночас практичні результати КГРП за описаною технологією свідчать про можливість одержання високого додаткового видобутку нафти під час його застосування у багатопластовому розрізі.

Таблиця 3 – Характеристики свердловин і технологія КГРП в теригенних колекторах

№ свердловини, горизонт експлуатації	Інтервали перфорації, м	Інтервали поглинання, м	Ефект. товщина поглинаючих пластів, м	Пористість, %	Температура пласта, °С	Градієнт тиску на 100 м, МПа	Витрата нагнітання / протискування, м ³ /хв	Градієнт тиску на 100 м, МПа	Розміри тріщини (по аналогії)	Зона проникнення, см		
											висота, м	півдовжина, м
1522 Долинська, МІ	1856-1867	1860-1870	3,5+0,5	8,8	60	0,88	0,5/ 1,0	1,75	17,5	12+19 +28	0,6	10
	1887-1908	1890-1910	(4x0,5)+1,5	9,1-9,3								
	1954-1963	1960-1970	3,5	9,1								
	1980-1990											
	2000-2017	2150-2160	1,5+0,5	8,0-8,8								
	2142-2150 2214-2218 2225-2240	2120-2140 2050-2150 2100	2,5+1+1 17,5	8,0-10,0 9,0								
Еквівалентний пласт												
Об'єм (СКР+ГКР)=(11+10), м ³ і ПРР(всього / в т.ч. в пласт)= (29/20) м ³ ; q _н =1,7 т/д, води-8 %, Гф= 310 м ³ /т; Додатковий видобуток нафти 69 т, на один міс. Газу – 0,02 млн м ³ ; Тривалість, два місяці												
1686 Бориславська, РІ	2040-2053	2045-2080	2+2	8,8-9,5	60	0,95	0,5/ 0,9	1,73	16,5	22+30 +40	0,5	8
	2057-2064											
	2070-2078	2090-2125	5+1,5+2	8,0-11,4 9,9								
	2092-2098 2114-2126 2135-2150	2135-2150	4	9,5								
Еквівалентний пласт		1850-2250 2050	16,5	9,5								
Об'єм (СКР+ГКР)=(11+11), м ³ і ПРР(всього / в т.ч. в пласт)= (43/20) м ³ ; q _н =0,7 т/д, води-80 %, Гф= 1230 м ³ /т; Додатковий видобуток нафти 644 т, на один місяць 26 т/міс. Газу – 0,79 млн м ³ ; Тривалість – 15 місяців												

Вперше змодельовано за програмами Меєра розміри тріщин за зміною тиску і витрати під час проведення КГРП, проаналізовано їх розвиток при послідовному нагнітанні в пласт СКР, ГKR і ПРР, визначено зони розчинення по тріщині та навколо неї. Для підвищення ефективності КГРП доцільно збільшувати розміри зони розчинення шляхом збільшення витрати та об'ємів СКР, ГKR і ПРР.

Проблема керування дією СКР+ГKR у розрізі свердловини найкраще вирішується шляхом поінтервальної дії, наприклад, в зоні обмеженої перфорації, або виділенням пластів між двома пакерами. Однак така технологія з різних причин не завжди може бути застосована, отже, необхідно працювати над її удосконаленням, так, щоб дія кислотного розчину була спрямована у потрібну частину розрізу свердловини.

Література

1. Качмар Ю.Д. Пат. UA 18091 Україна, МПК E21B 43/26. Спосіб кислотного розриву пласта / Ю.Д. Качмар, В.В. Цьомко, Ф.М. Бурмич; Опубл. 16.10.2006, Бюл. № 10.
2. Качмар Ю.Д. Кислотний розрив теригенних і карбонатних пластів родовищ України / Ю.Д. Качмар, Ф.М. Бурмич, В.В. Цьомко, Я.О. Заливаха // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – № 2(27). – С. 21-25.
3. Качмар Ю.Д. Нова технологія кислотного розриву пласта / Ю.Д. Качмар, Ф.М. Бурмич, В.В. Цьомко, Я.О. Заливаха // “Перспективи напрошування та збереження енергетичних ресурсів України” Збірник наукових праць науково-технічної конференції, 06-08 грудня 2006. – Івано-Франківськ, 2006. – С. 61-63.

Стаття поступила в редакційну колегію 06.07.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Яремійчуком Р.С.

ANALYSIS OF USING NEW TECHNOLOGY OF FORMATION ACIDIC FRACTURING OF TERRIGENOUS COLLECTORS

Yu. D. Kachmar, V. V. Tsomko, I. F. Klymovych, Ya. O. Zalyvakha

Scientific-research and design institute of JSC "Ukrnafta";

Ivano-Frankivsk, Pivdenny bulvar Pushkina, 2;

tel/fax +380 (342) 77-61-40, 77-61-49; e-mail: grp@ndpi.ukrnafta.com

The disclosure and development of fractures during interval action by acids on single formation and action on the whole multiple-zone drill core of wells are analyzed. The fractures sizes, sizes of dissolution zones rocks in the fracture and around them in such conditions are detected. An example of acidic fracturing in multiple-zone drill core of wells is presented. The results of new technology using are showing.

Key words: *acidic fracturing, interval action, action on the whole drill core, terrigenous rocks*

УДК 622/276/1/4

ОСОБЛИВОСТІ СТАТИСТИЧНОГО ПІДРАХУНКУ ЗАПАСІВ І ПРОГНОЗУВАННЯ ПОКАЗНИКІВ РОЗРОБКИ НАФТОВОГО РОДОВИЩА НА ПІЗНІЙ СТАДІЇ

В. С. Бойко, Р. Ф. Лагуш

Івано-Франківський національний університет нафти і газу;

76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;

тел. +380 (342) 99-41-96; e-mail: public@ifdtung.if.ua

Вирішується завдання з удосконалення методик статистичного підрахунку запасів і прогнозування показників розробки нафтового родовища на пізній стадії. Пропонується комплексне використання трьох методичних підходів і методів “голосування”, оцінювання дренажних запасів нафти, що припадають на одну свердловину, а відтак проведення оцінки необхідної кількості видобувних свердловин для відбору оцінених видобувних запасів нафти за методом “голосування” (чи затверджених ДКЗ).

Запропоновано нову методику прогнозування видобутку нафти на пізній стадії розробки родовища, обґрунтовано і застосовано нову характеристику для прогнозування обводненості продукції свердловин, що уможливорює за запрогнозованого видобутку нафти одержати прогнозований видобуток рідини та води. Наведено приклад застосування даних методик до конкретного покладу нафтового родовища.

Ключові слова: *нафтове родовище на пізній стадії розробки, статистичний підрахунок запасів, прогнозування технологічних показників розробки родовищ.*

В Україні більшість нафтових родовищ перебувають на пізній стадії розробки, а по великій кількості з них спостерігається значна розбіжність між проектними і фактичними показниками, що не дає змоги достовірно оцінити як перспективи конкретного родовища, так і перспективи власного видобутку нафти загалом [4]. Для проектування і прогнозування технологічних показників розробки нафтового родовища відомо статистичні і гідродинамічні методи [1]. У разі застосування групи методів підземної гідрогазомеханіки імовірнісної моделі покладу необхідно володіти повною інформацією про родовище для побудови детермінованої чи імовірнісної моделі покладу. Проте більшість таких родовищ розроблялися з давніх часів, коли не було виконано належних досліджень, тож щодо них така інформація відсутня. Тому на пізній стадії (точніше, на 4 і 5 стадіях проектування) здебільшого застосовуються статистичні, зокрема екстраполяційні методи, що базуються на обробленні фактичних статистичних даних про видобуток нафти за минулий період (ретроспектива) та екстраполяції на перспективу і виражаються в характеристиках витіснення або характеристиках виснаження [1, 2].

У даній роботі пропонується удосконалення методики використання екстраполяційних методів для уточнення видобувних запасів, коефіцієнта кінцевого нафтовилучення і прогнозування показників розробки на перспективу на прикладі одного із нафтових родовищ, причому розглянуто три методичні підходи.

За *першим методичним підходом* використано відомі характеристики витіснення [1, 2], із яких у галузевому документі [3] на основі широкого аналізу процесу розробки великої кількості нафтових родовищ рекомендовано до використання 12 характеристик витіснення, а серед них стосовно до 24 теригенних об'єктів на родовищах Урало-Поволжя і Північного Кавказу рекомендовано всього три способи: Назарова-Сипачова; Камбарова-Алмамедова-Махмудова; Пірвердяна [1].

Величину дренажних запасів розраховано за характеристиками витіснення Назарова-Сипачова, Камбарова-Алмамедова-Махмудова і Пірвердяна з наступним удосконаленням методики підрахунку запасів, запропонованим авторами.

Характеристика витіснення дає величину видобувних запасів нафти, які залучені до розробки існуючою кількістю працюючих свердловин. У міру освоєння родовища, тобто в міру його розбурювання, кількість свердловин зростає, а, значить, зростає величина запасів нафти, які залучені до розробки або, іншими словами, зростає величина дренажних запасів, що враховано авторами. Якщо величина дренажних запасів стабілізується на певному рівні, то це означає, що дренажні запаси стають рівними видобувним запасам нафти. Для того, щоб статистично згладити коливання показників розробки в часі, ми взяли як аргумент кількість останніх років розробки і назвали їх базою для підрахунку запасів. Відповідно до перебігу фактичних показників розробки в часі для основного об'єкта вибрано базисний (ретроспективний) період.

За *другим методичним підходом*, враховуючи наявність стапів виснаження пластової енергії як по родовищу і об'єктах, так і в локальних зонах біля окремих свердловин, ми використали залежність річного (місячного) відбору (дебіту) нафти від накопиченого відбору нафти, яка випливає із теоретичного закону падіння дебіту, виведеного Л. С. Лейбензоном [1], а, відтак, розвинутого І. Г. Пермьковим [2]. В основу своїх досліджень І. Г. Пермьков поклав закон однакових припущень. Звідси він показав, що кожний режим роботи продуктивного пласта характеризується однією, притаманною лише йому, канонічною формою кривої “дебіт – накопичений видобуток” незалежно від розміру покладу, темпів розробки і густоти мережі свердловин. Для прогнозування показників розробки і розрахунку видобувних запасів запропоновано спадні гілки згладити по прямій. Це перевірено [2] на прикладі великої кількості родовищ, розробка яких практично завершена (похибка прогнозу не виходить за межі 1-3%). Апроксимаційна крива проводиться з точки, яка відповідає накопиченому видобутку нафти, за якого розпочинається різке зниження дебіту, тобто на горизонтальній осі накопиченого відбору нафти маємо відрізок ОМ. Відрізок ОС відповідає накопиченому видо-

бутку, за якого спостерігається різкий згин спадної гілки. Продовжуючи спадну пряму на горизонтальній осі накопичених відборів нафти отримуємо відрізок ОВ. Шуканий відрізок ОА на горизонтальній осі накопичених відборів відповідає величині видобувних запасів. Відношення відрізків ОМ/ОА, ОС/ОА і ОВ/ОА називають коефіцієнтами подібності. За фактичними даними розробки конкретного покладу із графіків знаходимо величини відрізків ОМ, ОС, ОВ, а відтак розраховуємо відрізок ОА, тобто величину видобувних запасів. Коефіцієнти подібності вибираються в залежності від умов розробки та геолого-промислової характеристики конкретного родовища. На основі роботи [2] ми вибирали такі значини параметрів подібності для умов даного родовища: $OM = 20 \pm 1\%$; $OS = 73 \pm 1\%$; $OB = 83 \pm 2,5\%$.

Третій *методичний підхід* полягає в підборі залежностей зміни показників розробки родовища і об'єктів у часі (характеристика або крива виснаження [1]). Оскільки кількість видобувних свердловин змінювалася і буде змінюватися в перспективі (наприклад, через високу обводненість видобуваної продукції), то насамперед досліджено зміну добового дебіту свердловини на відпрацьований свердловино-день.

Апроксимаційні залежності (статистичні моделі) підбрано згідно з трьома методичними підходами і розглянуто на прикладі одного з покладів вибраного родовища, відтак з використанням відповідних моделей виконано уточнення видобувних запасів нафти.

Відповідно, за першим методичним підходом методи Назарова-Сипачова і Камбарова-Алмамедова-Махмудова характеризуються найвищими коефіцієнтами кореляції порівняно з методом Пірвердяна. При цьому стабілізація дренажних запасів здебільшого є характерною для методу Камбарова-Алмамедова-Махмудова; деяку зміну дає метод Назарова-Сипачова і велику – метод Пірвердяна.

Характеристику витіснення по покладу за методом Камбарова-Алмамедова-Махмудова зображено на рис. 1.

Величину видобувних запасів нафти покладу беремо за методом Камбарова-Алмамедова-Махмудова, яка рівна величині за період останніх 6 років, а саме 222,58 тис. т. Запаси нафти покладу, які підраховано за об'ємним методом (247 тис. т) і за характеристикою витіснення (222,581 тис. т), є близькими за значиною (запаси, підраховані об'ємним методом, більші на 10,97%).

За другим методичним підходом взято залежності “річний відбір нафти – накопичений відбір нафти” (рис. 2). За коефіцієнтами подібності відповідно до точок М, С і В отримано видобувні запаси 400,13 тис. т, 159,12 тис. т і 158,69 тис. т.

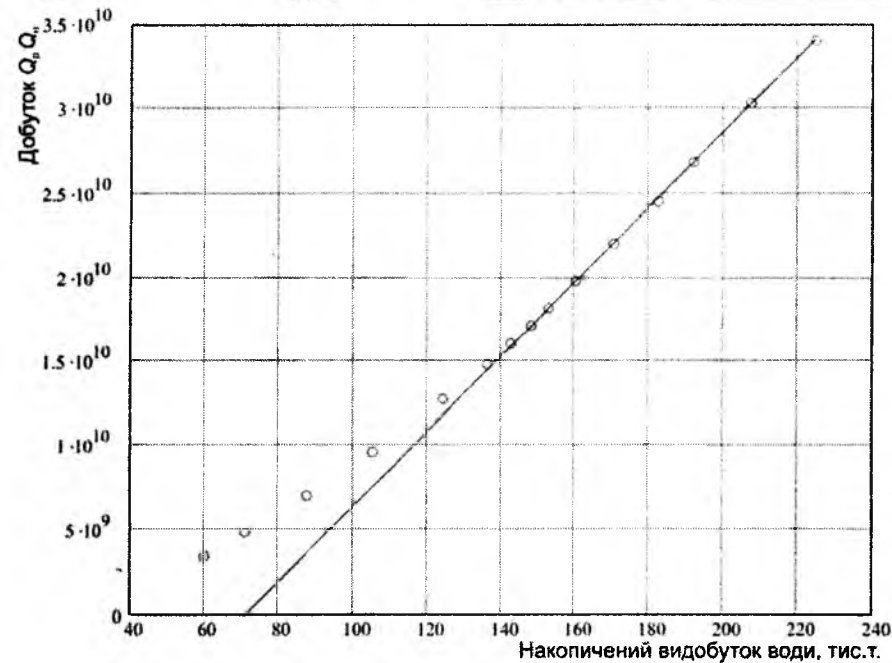


Рис. 1. Залежність добутку накопичених відборів нафти і рідини від накопичених відборів води для вибраного покладу за характеристикою витіснення Камбарова-Алмамедова-Махмудова (апроксимаційні коефіцієнти становлять $a = -1,5901 \times 10^{10}$; $b = 222587,28$; коефіцієнт кореляції – 0,999832)

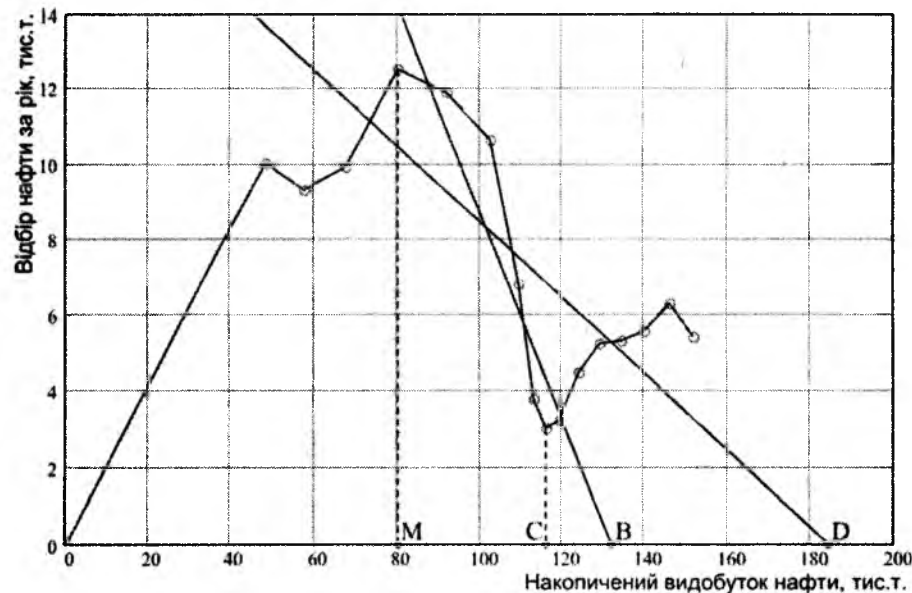


Рис. 2. Залежність річних відборів нафти від накопичених відборів нафти для вибраного покладу

Оскільки залежність на рис. 2 не має чітко вираженого класичного характеру, то нами підібрано кореляційну лінійну залежність для спадної гілки за річними відборами (рис. 2). Відповідно, видобувні запаси оцінюються величиною (точка D) 222,41 тис. т. Через розбіжність величин рекомендуємо використати принцип “голосування”, тоді середньоарифметична величина запасів, які отримано для точок M, C, B і D, дорівнює:

$$\frac{400,13 + 159,12 + 158,69 + 222,41}{4} = 235,09 \text{ тис. т.}$$

Дані запаси практично збігаються із запасами, що були підраховані за об'ємним методом (247 тис. т), розбіжність між ними становить 5,06%. Порівняно з величиною запасів, що отримано за характеристикою витіснення (222,58 тис.т), вони є більшими на 5,62%.

Згідно третього методичного підходу на рис. 3 показано зміну фактичного дебіту нафти на відпрацьований свердловино-день у часі по покладу за розрахунковий період (з 01.01.1992 р.) згідно із методом у напівлогарифмічних координатах.

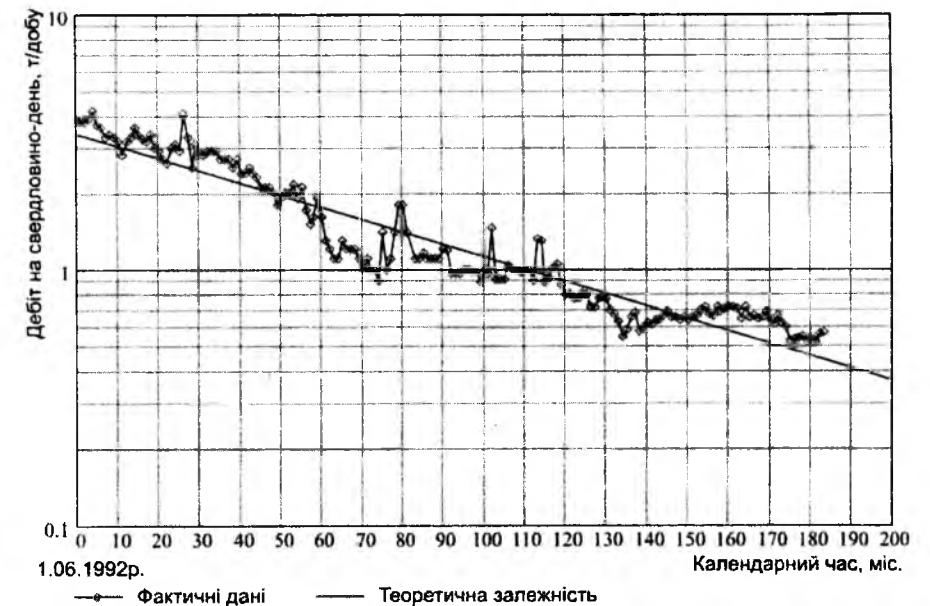


Рис. 3. Залежність середньодобового дебіту нафти однієї свердловини у часі в напівлогарифмічних координатах по вибраному покладу (коефіцієнт кореляції -0,955068)

За фактичними даними за методом найменших квадратів з використанням ПК в системі Mathcad підібрали експоненціальну залежність. Параметри залежності (по дебіту нафти): $q_0 = 3,40299$ т/добу; $a = 1,11371 \cdot 10^{-2}$ 1/міс.; коефіцієнт кореляції рівний -0,955068.

Відповідно розраховуємо видобувні (дреновані) запаси нафти, що припадають на одну свердловину,

$$Q_{св} = \frac{q_0}{a} = \frac{3,40299 \cdot 30,4}{1,11371 \cdot 10^{-2}} = 9288,89 \text{ т}$$

і дреновані запаси нафти покладу

$$Q = Q_{св} \cdot 27 + 42,751 = 293,551 \text{ тис. т,}$$

де 30,4 – середня розрахункова кількість днів у місяці; 27 – кількість свердловин, які розробляють поклад; 42,751 тис. т – накопичений видобуток із покладу станом на початок січня 1992 р. (початок базисного періоду).

Розрахована величина дренованих запасів (293,551 тис. т) значно перевищує величину початкових видобувних запасів (247 тис. т), затверджених Центральною комісією із запасів корисних копалин (ЦКЗ), що може свідчити про повноту охоплення розробкою усіх видобувних запасів покладу існуючим фондом свердловин.

Таким чином, за принципом “голосування” згідно з галузевим документом [3] величину початкових видобувних запасів нафти покладу для аналізу визначаємо як середньоарифметичну значину з величин отриманих за трьома методичними підходами

$$\frac{222,58 + 235,09 + 312,129}{3} = 256,60 \text{ тис. т,}$$

тобто 256,60 тис.т, що відрізняється від підрахованих за об’ємним методом на 3,74%.

Відповідно уточнені запаси нафти за трьома підходами становлять 256,6 тис.т.

Додатково виконано розрахунки запасів нафти ще за двома методами.

За методом “дебіт нафти – відсоток відбору видобувних запасів” отримано за базовий період величину дренованих запасів у розмірі 79,2% від затверджених початкових видобувних запасів, тобто запаси рівні $247 \times 0,792 = 195,6$ тис. т (рис. 4).

За методом “накопичений відбір нафти – час” одною свердловиною можна відібрати 9,289 тис. т нафти (рис. 5).

Поклад розробляється з липня 1983 р. За час експлуатації станом на 01.01.2008р. із покладу видобуто 151,69378 тис. т нафти і 244,2827 тис. т рідини. Залишкові балансові запаси нафти – 839,30622 тис.т; залишкові видобувні запаси – 95,30622 тис.т; річний темп відбору від початкових балансових запасів – 0,5448% (розрахунок ведеться від запасів, затверджених ЦКЗ). На сьогодні в експлуатації на перебуває 27 діючих свердловин (з початку розробки перебувало в експлуатації 45 свердловин).

Звідси, на покладі слід мати таку кількість свердловин: $247/9,289 = 27$, а за станом на 01.01.2008 р. на покладі працює 27 свердловин.

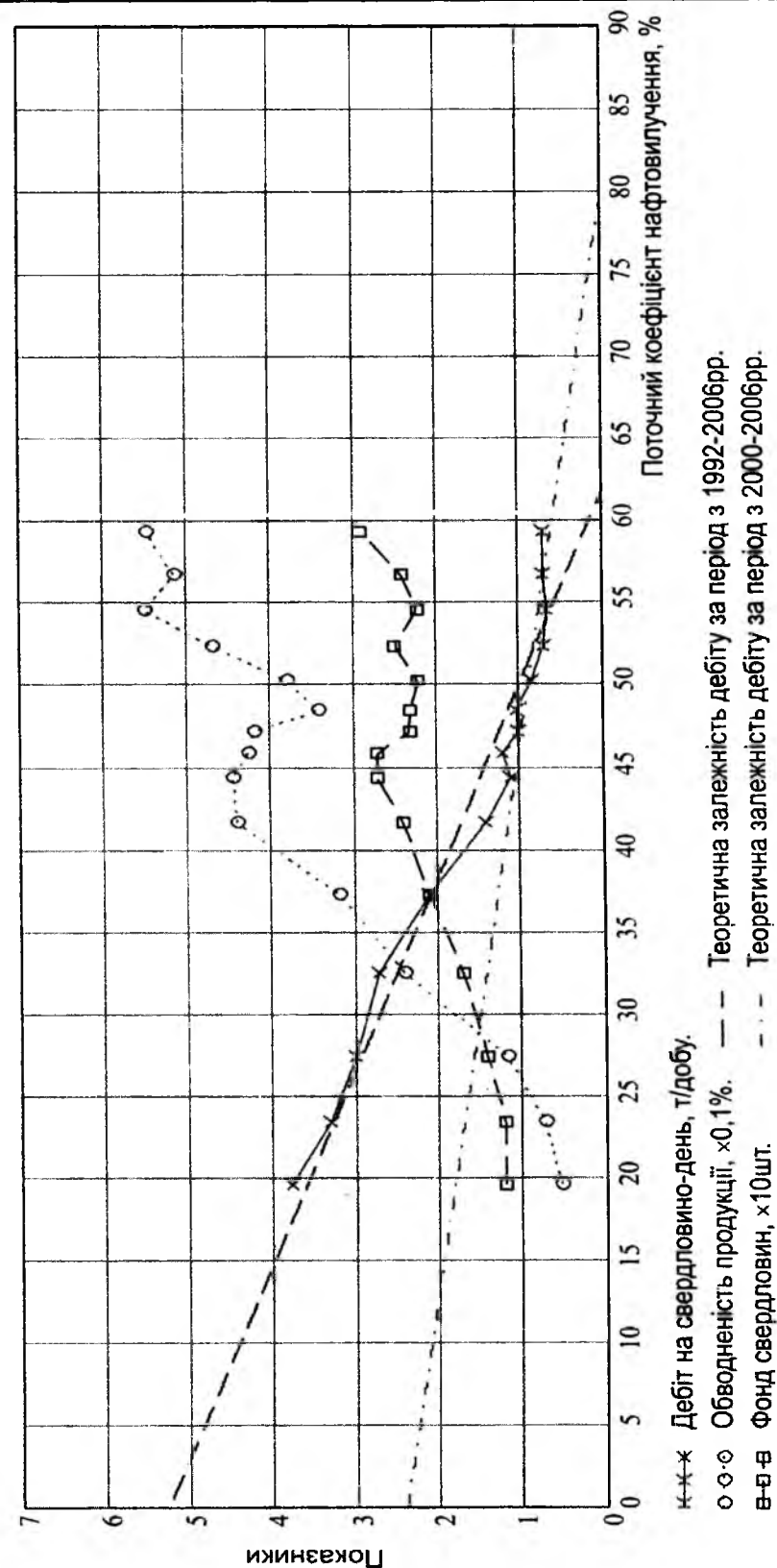


Рис. 4. Залежності зміни показників розробки родовища від поточного коефіцієнта нафтовилучення

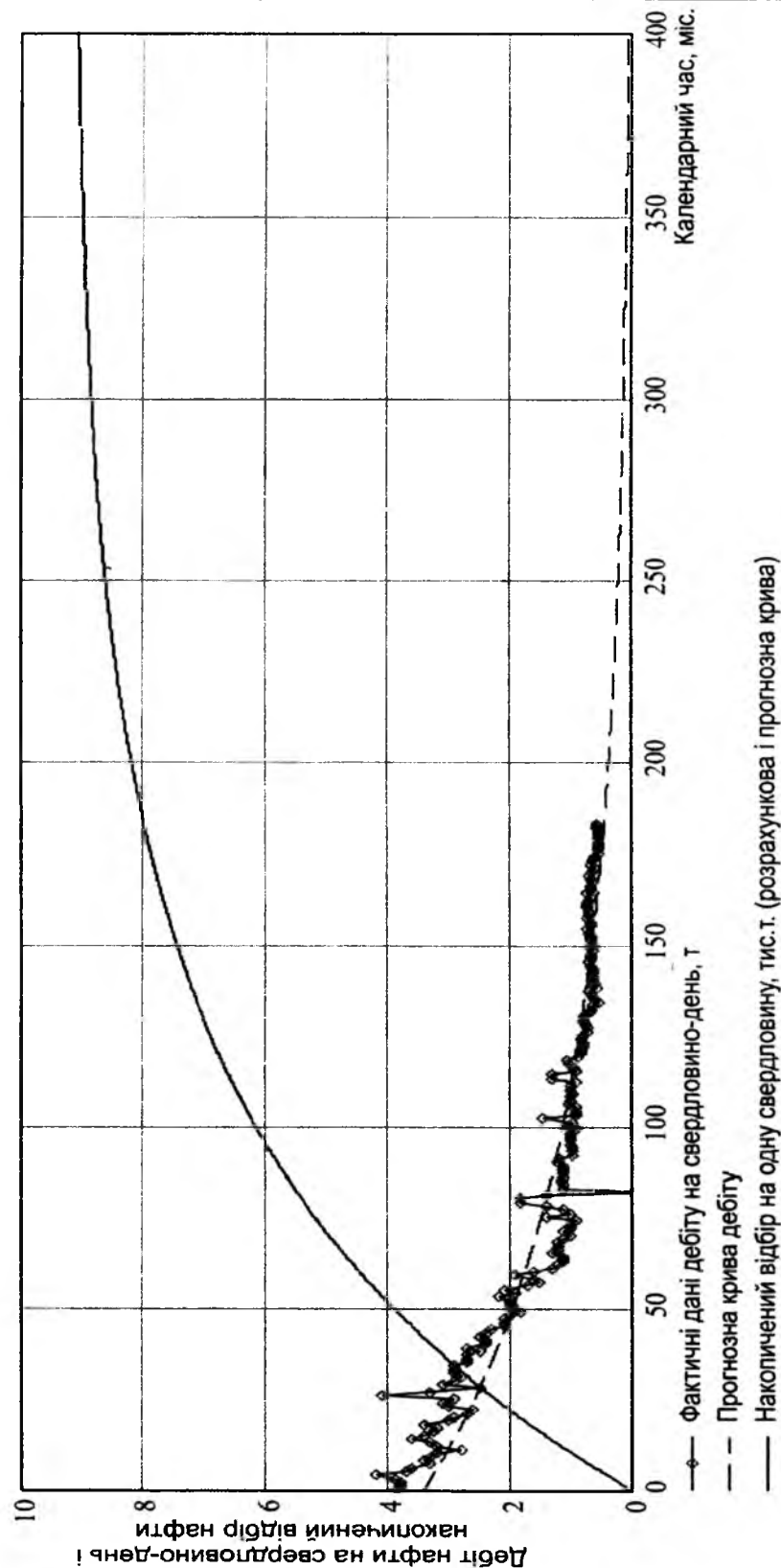


Рис. 5. Зміна показників розробки у часі

Теперішній третій стадії розробки розглядуваного нафтового покладу відповідає четверта-п'ята стадії проектування. Прогнозування показників розробки можна здійснювати за трьома методичними підходами. За першим методичним підходом, коли для розрахунку прогнозування показників розробки екстраполюється характеристика витіснення на перспективу, не враховуються зміни в системі розробки (ущільнення мережі чи вибуття із роботи свердловин), тому він не прийнятний для прогнозування. Враховуючи неklasичний характер залежності річного відбору нафти від накопиченого видобутку нафти за другим методичним підходом, останній також не прийнятний для прогнозування.

Третій методичний підхід полягає в підборі залежностей зміни показників розробки родовища і окремих об'єктів у часі. Оскільки кількість видобувних свердловин змінювалася і буде змінюватися в перспективі, наприклад, через високу обводненість продукції чи вибування із експлуатації, то в першу чергу досліджено зміну добового дебіту свердловини на відпрацьований свердловино-день.

Прогнозування видобутку нафти по покладу проведено за характеристикою витіснення, яку обґрунтував Л.С. Лейбензон. Поточний відбір (дебіт) у часі описуємо залежністю, яка нами використовується для виконання прогнозування:

$$Q(t) = \alpha e^{-kt}, \tag{1}$$

а накопичений відбір за залежністю

$$Q_H(t) = Q_3 (1 - e^{-kt}), \tag{2}$$

де α, k – емпіричні коефіцієнти; t – тривалість часу розробки покладу; Q_3 – початкові видобувні запаси нафти.

Відношення $Q_H(t)/Q_3$ – це поточний коефіцієнт нафтовилучення $\eta(t)$ із покладу.

Введемо поняття поточного коефіцієнта залишкових запасів нафти в покладі

$$\beta(t) = 1 - \eta(t), \tag{3}$$

або, інакше,

$$\beta(t) = \frac{Q_3 - Q_H(t)}{Q_3} = 1 - \frac{Q_H(t)}{Q_3}. \tag{4}$$

Тоді можемо записати:

$$\beta(t) = e^{-kt}, \tag{5}$$

звідки маємо

$$\ln \beta(t) = -kt. \tag{6}$$

На основі цього виконано прогнозування накопиченого видобутку нафти, а відтак і річного, за відомими запасами нафти. Накопичений відбір нафти в часі є інтегральною функцією, яка меншою мірою піддається флуктуаціям, ніж поточний відбір.

Для визначення накопиченого відбору $Q_H(t)$ за фактичною величиною початкових запасів Q_3 за формулою (4) розраховуємо поточний

коефіцієнт залишкових запасів і будуюмо графічну залежність (6), а відтак розраховуємо коефіцієнт кореляції r для цієї лінійної залежності. За найбільшою значиною коефіцієнта кореляції підбираємо базовий ретроспективний період для точок, які лежать на кореляційній прямій (у роках, чи за кількістю розрахункових точок).

На наступному етапі із даної залежності знаходимо емпіричний коефіцієнт k .

Оскільки за Л. С. Лейбензоном поточні видобувні запаси нафти складають

$$Q_3 = \frac{\alpha}{k}, \quad (7)$$

то знаходимо емпіричний коефіцієнт

$$\alpha = kQ_3. \quad (8)$$

Прогнозування поточних і накопичених відборів нафти на перспективу проведено на основі залежностей $Q(t)$ і $Q_n(t)$ за знайдених з використанням фактичних накопичених відборів емпіричних коефіцієнтів α і k .

Для прогнозування обводненості продукції використано залежність зміни масової частки води в продукції свердловин у часі:

$$n_a = 1 - e^{\alpha_1 t}, \quad (9)$$

де n_a – масова частка води в продукції свердловин; α_1 – емпіричний коефіцієнт; t – тривалість часу розробки покладу.

Дану залежність перетворюємо до вигляду:

$$1 - n_a = e^{\alpha_1 t}, \quad (10)$$

де, в свою чергу, $(1 - n_a) = n_n$ – частка нафти в продукції свердловин, що з часом прямує до 0.

Тоді, маючи фактичну зміну частки нафти в продукції свердловин у часі, визначаємо емпіричний коефіцієнт α_1 .

За відомою значиною коефіцієнта α_1 визначаємо частку нафти n_n на прогнозний період. Відтак за відомими прогнозною часткою нафти та прогнозним річним видобутком нафти, проводимо розрахунок річного видобутку рідини.

Таким чином, з метою удосконалення методик статистичного підрахунку запасів і прогнозування показників розробки нафтового родовища на пізній стадії нами запропоновано використання комплексно трьох методичних підходів і методу “голосування”, оцінювання дренажних запасів нафти, що припадають на одну свердловину, а, відтак, проведення оцінки необхідної кількості видобувних свердловин для відбору оцінених видобувних запасів нафти за методом “голосування” (чи затверджених). Запропоновано нову методику прогнозування видобутку нафти на пізній стадії розробки, застосовано нову характеристику для прогнозування обводненості продукції свердловин, що уможливило за прогнозованого видобутку нафти одержати видобуток рідини та води.

Література

1. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ: підручник. 4-е доповнене видання / В.С. Бойко. – Київ: Міжнародна економічна фундація, 2008. – 488 с.
2. Пермяков И.Г. Экспресс-метод расчета технологических показателей разработки нефтяных месторождений / И.Г. Пермяков. – Москва: Недра, 1975. – 128 с.
3. Руководящий документ “Методическое руководство по определению технологической эффективности гидродинамических методов повышения нефтеотдачи пластов”: РД 39-0147035-209-87. – Москва, 1987.
4. Іванюта М.М. Атлас родовищ нафти і газу України: у 6-ти томах / за заг. ред. М.М. Іванюти, В.О. Фецишина, Б.І. Денегі, Ю.О. Арсірія, Я.Г. Лазарука. – Т. VI – Львів: УНГА, 1998 – 224 с.

Стаття постуила в редакційну колегію 08.10.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Кондратом Р.М.

FEATURES OF STATISTICAL COUNT OF SUPPLIES AND PROGNOSTICATION OF INDEXES OF DEVELOPMENT OF OILFIELD ON A LATE STAGE

V. S. Boyco, R. F. Lagush

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankiv'sk, Carpats'ka street, 15;
tel. +380 (342) 99-41-96; e-mail: public@ifdtung.if.ua*

The task of improvement of methods of statistical count of supplies and prognostication of indexes of development of oilfield is decided on a late stage. It is suggested to take complex three methodical approaches and method of "voting", to estimate drenovate stock petroleums, which are on one mining hole, and consequently to conduct estimation of necessary amount of extractive mining holes for the selection of the appraised extractive supplies of petroleum after the method of "voting" (whether ratified DCZ).

A new method of prognostication of booty of petroleum is offered on the late stage of development of deposit, and a new description is applied for prognostication of water-beaten products of mining holes, that does possible at the booty of petroleum to get the forecast booty of liquid and water. The example of application of the given methods is resulted in relation to the concrete bed of oilfield.

Keywords: *oilfield on the late stage of development, statistical count of supplies, prognostication of technological indexes of development of deposits.*

ФІЗИКО-ПЕТРОГРАФІЧНІ ПАРАМЕТРИ КОЛЕКТОРІВ НАФТОВИХ І ГАЗОВИХ РОДОВИЩ КАРПАТСЬКОГО НАФТОГАЗОНОСНОГО РЕГІОНУ

В. І. Грицишин

*Карпатське управління геофізичних робіт;
76011, Івано-Франківськ, вул. І.Блавацького, 22;
e-mail: kigr@ttk.if.ua*

Розглядається питання вивчення фізико-петрографічних параметрів порід-колекторів палеогенових відкладів Бориславсько-Покутської зони (південно-східна частина) Передкарпатського прогину з використанням даних керна, відібраного у свердловинах у процесі буріння, результатів випробовування нафтогазоносних об'єктів з урахуванням результатів геофізичних досліджень свердловин. Зіставлені дані літолого-петрофізичних властивостей порід з геолого-геофізичними параметрами, що дало змогу розділити пісковики і алевроліти на дві категорії: промислові колектори (група А) і непромислові (група Б).

Ключові слова: колектор, геофізичні параметри, палеогенові відклади, питомий електричний опір, нейтронні властивості порід, швидкість пружних коливань, пористість, проникність.

Передкарпатський прогин

Передкарпатський прогин в геотектонічному відношенні являє собою передовий прогин Карпатської гірської споруди. В українській частині він простягається з північного заходу на південний схід на відстані біля 300км. Завдяки наявності в Передкарпатті родовищ цінної мінеральної сирони (нафта, газ, озокерит, кухонна і калійна солі, сірка та ін.) протягом багатьох десятиріч тут ведуться геологічні і геофізичні дослідження, спрямовані на вивчення геологічної будови цієї території, пошуки і розвідку родовищ корисних копалин. Нагромаджений у процесі цих досліджень матеріал узагальнений у працях В. І. Антипова, А. А. Богданова, В. С. Бутова, О. С. Вялова, В. В. Глушка, Л. В. Григорчака, Г. Н. Доленка, В. С. Іванишина, Й. Й. Курильця, М. Р. Ладиженського, Є. В. Павловського, І. П. Сафарова, М. М. Сороки, С. І. Субботіна, Б. М. Улізла, В. М. Утробіна, Е. Б. Чекалюка, М. М. Чайки, М. І. Шубіна, Б. І. Яроша та інших дослідників.

За особливостями геологічної будови та історії розвитку Передкарпатський прогин ділиться на дві зони – Внутрішню (Бориславсько-Покутську) і Зовнішню (Більче-Волицьку), що відрізняються як за віком порід, з яких вони складаються, так і ступенем їх дислокованості. Основним критерієм районування є те, що Внутрішня зона сформувалася у крайовій частині геосинкліналі, і міоценові моласи залягають над палео-

геновим флішем, а Зовнішня являє собою субплатформове крило крайового прогину, і фліш там є відсутній.

Бориславсько-Покутська зона була закладена в ранньоміоценовому часі на крейдовій і палеогеновій складчастій геосинклінальній основі, а Більче-Волицька – в середньоміоценовий період на платформовому фундаменті.

В Бориславсько-Покутській зоні розвинуті, здебільшого, нижні моласи (аквітан, бурдигал, карпатій), які залягають на крейдо-палеогенових флішових утвореннях, а в Більче-Волицькій – верхній (баденій, сармат), які залягають на розмитій поверхні мезозойських (крейда, юра), палеозойських (девон, силур, кембрій) і рифейських відкладах.

Зважаючи на те, що об'єктом наших досліджень є, переважно, палеогенові відклади Бориславсько-Покутської зони, нами наведена літолого-петрофізична характеристика цієї зони.

Фізико-петрофізичні параметри колекторів нафти і газу

Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину

Всебічне вивчення фізичних параметрів порід Передкарпатського прогину за даними керна протягом багатьох років проводилося в лабораторіях УкрДГРІ, ІГГГК АН України, тресту “Львівнафто-газрозвідка”, ЦНДЛ об'єднання “Укрнафта”, Галузевої науково-дослідної лабораторії № 6 (ІФІНГ) та ін.

Результати досліджень узагальнені в багатьох роботах і звітах відповідних організацій [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 11].

За результатами досліджень встановлено, що колекторські різновиди продуктивних відкладів характеризуються широким діапазоном фізичних параметрів (питомого електричного опору, швидкості пружних коливань, природної і наведеної радіоактивності, густини та ін.) і фільтраційно-ємнісних властивостей (проникності і пористості).

Високі дебіти нафти і газу, одержані з свердловин Долинського, Битківського і Бориславського родовищ, неоднакові дебіти із свердловин, пробурених на одні і ті ж горизонти, навели деяких дослідників [12, 13, 14, 15 та ін.] на думку, що колектори Внутрішньої зони прогину є, здебільшого в тріщинними. Підтвердженням цього є велика кількість тріщин майже в усіх літологічних різновидів, винесених у процесі буріння або під час проведення тунелів у гірській місцевості. Тріщини виповнені кальцитом, бітумом і мають сліди нафти на стінках. Отже, ряд дослідників [5, 6, 12, 13, 15, 16, 17] на основі різних матеріалів роблять висновки, що тріщини в породах Передкарпатських нафтових родовищ можливо слугують шляхами міграцій нафти і газу до свердловин.

Однак, існують і інші думки щодо цього питання. Мончак Л. С., Гнатюк Р. О. [18], Ковальчук М. Р. та ін. [19] вивчали колекторські властивості палеогенових порід Долинського і Бориславського нафтових родовищ, вважають, що високі дебіти у свердловинах обумовлені поровою проникністю. На основі значного фактичного матеріалу з дослідження колекторських властивостей порід Бортницька В. М., Кутова Д. В., Альошкіна Е. [6] прийшли до висновку, що на території

нафтових родовищ Передкарпаття розповсюджені колектори “тріщинно-порового типу, вирішальними оціночними критеріями яких є фільтраційні властивості тріщин і ємнісна характеристика порового простору”. Отже, тріщинуватість, на їх думку, повинна враховуватись під час оцінювання колекторських властивостей порід, підрахунку запасів нафти або газу і розробки вторинних методів експлуатації. У процесі розвідки і експлуатації нафтових і газових родовищ трапляються випадки одержання промислових дебітів нафти і газу (родовище Росільна, Бухтівець і ін.) з колекторів тріщинного типу. Але переважно в розрізі продуктивних горизонтів мають місце колектори порового типу і, в основному, з них ми одержуємо припливи пластового флюїду.

Слід зауважити, що породи-колектори Передкарпаття вивчені досить нерівномірно. Найбільш вивченими є колектори продуктивних ділянок нафтогазових товщ, менше керн відбирається у водоносній частині розрізу. На великих глибинах (4000 м і нижче) керн відбирається в незначному об’ємі, що створює труднощі у висвітленні розрізу щодо колекторських властивостей і розподілу їх у просторі.

В осадовій товщі, розкритій свердловинами південно-східної частини Передкарпатського прогину, виділяються чотири літолого-стратиграфічні комплекси порід, які відповідають основним етапам геологічного розвитку даної території: рифейсько-палеозойський, мезозойський, крейдо-палеогеновий (внутрішня зона прогину) і неогеновий. Ці комплекси відрізняються як умовами осадонакопичення, тектонічною історією, так і характером порід-колекторів та їх співвідношенням з породами-покришками. Нижче наводимо коротку характеристику колекторів палеогенового флішу, складену за даними опублікованих матеріалів, а також результатів вивчення фізичних і колекторських властивостей, виконаних в указаних лабораторіях.

Особливістю флішових палеогенових відкладів є наступне:

а) розріз відкладів представлений частим чергуванням піщано-алевролітистих і глинистих пропластків;

б) товщина окремих пропластків є різною – від часток сантиметра до декількох (рідше десятків) метрів;

в) літолого-петрографічна характеристика, а, отже, і петрофічні властивості пластів (пропластків) є непостійними як вздовж простягання, так і упоперек напластування;

г) фізичні властивості окремих пластів (питомий електричний опір, природна і штучна радіоактивність, нейтронні властивості, швидкість пружних коливань) змінюються у широких межах;

д) значна диференціація літолого-петрографічних властивостей і геофізичних параметрів у межах незначної товщини розрізу або пласта.

Колекторами нафти і газу в палеогеновому комплексі, як правило, є пісковики і алевроліти, які у вигляді прошарків товщиною від декількох сантиметрів до 10-15 м і більше залягають серед аргілітів. По розрізу вони поширюються не рівномірно. В деяких частинах комплексу кількість піщанистих прошарків і їх товщина збільшується, і вони утво-

рюють окремий пласт, хоча значною мірою неоднорідний. Іноді утворюються окремі піщанисті пачки, які виразно виділяються на діаграмах геофізичних методів. В деяких частинах, навпаки, переважають аргіліти, що призводить до утворення товщ з чергуванням тонких прошарків (макроанізотропія) пісковиків, алевролітів і аргілітистих порід. Спостерігається також значна мінливість піщанистості по площі. Наприклад, потужна товща ямненських пісковиків розповсюджена на значній частині Бориславсько-Покутської зони, але в південно-східному напрямку заміщується аргілітами. Розрізи манявської та вигодської світ є найбільш піщанистими в районі Биткова. На ділянці між Долиною і Битковим кількість пісковиків у розрізі цих світ зменшуються як за рахунок скорочення товщини окремих пісковиків, так і за рахунок часткового заміщення їх аргілітами. Навпаки, в деяких свердловинах, які розкрили складки третього ярусу, спостерігається значне збільшення піщанистості як менілітової, так і вигодської світи (св. 452-Битків – складка Пасічнлянська, а також у свердловинах Делятинської площі). Бистрицька світа в південно-східній частині зони представлена, в основному аргілітами.

В розрізі менілітової світи пісковики найбільш розповсюджені в районі сіл Спас і Струтина (Спаська і Верхньо-Струтинська складки).

На південному сході від цього району загальна товщина пісковиків менілітової світи зменшуються як за рахунок скорочення товщини окремих пластів і пачок, так і за рахунок розмивання окремих ділянок менілітової світи. Відносна піщанистість менілітової світи на ділянці Долини-Битків збільшується в північно-східному напрямку упоперк простягання Бориславсько-Покутської зони [1].

Рядом дослідників [1, 2, 3 та ін.] поряд з регіональною зміною піщанистості окремих ділянок розрізу палеогенового комплексу, встановлена локальна зміна на окремих структурах. Характерним є те, що зони максимальної піщанистості, пористості і проникності цих світ співпадають з ділянками максимальної товщини.

Пісковики і алевроліти палеогенового комплексу характеризуються значною неоднорідністю фізичних параметрів. Їх відкрита пористість змінюється від 0,2 до 21,7%, а міжзернова проникність – від тисячних долей до $510 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ (табл.). Для тонких (до 1-1,5 м) прошарків пісковиків і алевролітів властива підвищена карбонатність [5], внаслідок чого їх пористість не перевищує 6%. Такі літологічні різновиди практично є непроникиними. Низькою пористістю, а також відсутністю ефективною проникності, володіють пісковики і алевроліти великої товщини, якщо вони сильно зцементовані карбонатним або карбонатно-глинистим цементом з базальним типом цементации. Такі пласти за відсутності тріщинної пористості є непроникиними, і віднесені нами до неколекторів.

Нижче пропонується розгляд літолого-петрофізичних властивостей порід для окремих світ.

Таблиця – Результати аналізу колекторських властивостей зразків гірських порід у південно-східній частині Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину

Площа	Вік	Літологія	Кількість зразків, шт.		Межі змінованія пористості				Розподіл відкритої пористості у групах		Середнє значення відкр. пористості для $K_p > 8\%$	Проникність, $\times 10^{-3}$ мкм ²						
			$K_p, \%$	$K_p, \%$	Мінім. значення $K_p, \%$	Максимальне значення $K_p, \%$	$K_{<8}, \%$	$K_{>8}, \%$	Для $K_p < 8\%$	Для $K_p > 8\%$		К-ть, шт.	Межі змінованія	К-ть, шт.	Середнє значення			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	m_2	Пісковики і алевролі	18	19	2,2	0,6	18,1	15,5	12	64	7	36	13,9	-	-	6	27,5-388	206,9
	m_1	Пісковики і алевролі	41	41	2,9	1,5	19,8	19,0	8	19,5	33	80,5	14,5	3	<0,01-0,04	20	4,39-457	53,75
		Аргіліти	2	2	5,2	2,9	12,2	8,5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	bs	Пісковики і алевролі	6	6	1,5	0,9	12,8	11,6	4	67	2	33	11,3	-	-	-	-	-
		Аргіліти	1	1	-	-	7,4	3,6	1	100	-	-	-	1	<0,01	-	-	-
	$v-p$	Пісковики і алевролі	2	2	1,5	1,1	8,6	8,3	1	50	1	50	8,3	1	<0,01	-	-	-
		Вашняки	4	4	1,5	0,6	4,4	1,3	4	100	-	-	-	-	-	-	-	-
	m_v	Пісковики і алевролі	5	5	2,9	0,77	21,7	21,7	1	20	4	80	20,7	1	<0,01	4	66,9-264	178,5
	m_2	Пісковики і алевролі	195	86	0,1	0,4	21,6	13,8	75	87	11	13	11,0	57	<0,1-1,0	14	1,0-60,0	28,0
	m_1	Пісковики і алевролі	200	69	1,6	0,1	19,7	19,6	132	66	34	34	14,0	22	<1,0	20	0,1-45,7	8,3
	$v-p$	Пісковики і алевролі	-	54	-	0,05	-	18,2	48	89	6	11	-	-	-	-	0,1-47,6	-
	m_v	Пісковики і алевролі	88	60	-	0,4	-	20,4	32	53	28	47	12,3	-	-	-	0,1-68,0	-
	m_l	Пісковики і алевролі	-	22	-	0,81	-	7,1	22	100	-	-	-	-	<0,1	-	-	-
	bs	Пісковики і алевролі	-	74	-	0,3	-	16,7	72	97	2	3	13,2	-	<0,1-1,5	-	-	-
	vd	Пісковики і алевролі	-	38	-	0,8	-	6,4	38	100	-	-	-	-	<0,1-60,1	-	-	-
	m_v	Пісковики і алевролі	-	155	-	0,1	-	12,7	153	98	2	2	11,1	-	-	-	0,1-3,4	-
	m_l	Пісковики і алевролі	-	101	-	0,2	-	17,8	55	54	44	44	12,4	-	-	-	0,1-134,7	-
	bs	Пісковики і алевролі	-	38	-	0,2	-	7,3	38	100	-	-	-	-	<0,1-1,1	-	-	-
	vd	Пісковики і алевролі	-	56	-	0,2	-	10,7	55	98	1	2	10,7	-	<0,1-0,9	-	-	-
	m_v	Пісковики і алевролі	-	126	-	0,05	-	13,3	125	99	1	1	13,3	-	<0,1	-	11,5	-
		Загальна кількість зразків, шт.	562	959														

Еоценові відклади

Пісковики еоценових відкладів переважно кварцові, дрібно-середньо-і різнозерністі; здебільшого міцні, щільні, рідше – слабкоцементовані, часто тріщинуваті [6]. Кластичний матеріал складає 75-85% породи. Цемент глинистого складу з домішкою карбонатного, кремнистого і глауконітового матеріалу. Тип цементації – поровий, базальний, рідше – контактний. Внаслідок різного ступеня цементації порового простору і погані відсортованості уламкового матеріалу колекторські властивості піщаних осадів змінюються в широких межах (табл.). Об'ємна густина їх змінюється від $2,2 \cdot 10^3$ до $2,7 \cdot 10^3$ кг/м³. На Битківському родовищі у вигодсько-пасіччанській світі переважають щільні пісковики з пористістю до 8%.

У манявських відкладах південно-східної частини зони, крім низькопористих піщано-алевролітових різновидів з $K_p < 8\%$, спостерігаються пласти з досить доброю міжгранулярною пористістю і проникністю ($K_p = 8-21,7\%$; $K_{пр} = (10-510) \cdot 10^{-15}$ м²). Такі колектори зустрічаються в розрізах свердловин, що розкрили глибинні складки, на розвідувальних площах Старуня, Гвізд, Росільна, Яблунька-Кричка, Пасічна та ін. У пісковиках з високою пористістю відсутній карбонатний цемент, низька глинистість, тип цементації – плівковий або контактний. Зерна кварцу добре відсортовані.

Олігоцені відклади

Менілітова світа

Менілітова світа порід складена чергуванням щільних пісковиків, алевролітів і аргілітів з переважанням останніх. Товщина світи нестійна – від декількох сотень метрів до 600-800 м і більше. Піщано-алевролітові різновидності складають 15-40% від всієї товщі.

Менілітова світа в південно-східній частині Бориславсько-Покутської зони поділяється на нижньоменілітову і середньоменілітову підсвіти.

Аргіліти сірі до чорних, не вапнисті, слюдисті, щільні, володіють добре виразною шаруватістю, часто є сланцюваті, тріщинуваті, місцями зкременілі. Аргіліти складаються із пелітоморфної маси глинисто-серицитового складу з домішкою кремнистої, частково карбонатної речовини, просякнutoї бітумом. Структура переважно алевро-псамітова, часто з нерівномірно розсіяними алевролітовими зернами кварцу і глауконіту. Карбонатність аргілітів є незначною. Аргіліти в менілітах є непроникними навіть для газу. Сланцюваті аргіліти (за даними Є. І. Вульчина [7], В. М. Бортницької та ін. [5, 6]) містять значну кількість (до 30%) органічної речовини. Бітумний матеріал зустрічається у вигляді лінзовидних скупчень, орієнтованих паралельно до нашарування. Глинисті різновидності не можуть вміщувати промислової нафти, оскільки їм притаманні дуже тонкі порові канали. Значене перешарування їх з тонкими прошарками пісковиків і алевролітів, тріщинуватість за нашаруванням свідчать про можливість міграції нафти в аргілітовій товщі.

Алевроліти світлосірі до темносірих, слабо слюдисті, вапнисті, рідше не вапнисті. Мікроскопічно порода складається з кластичного матеріалу і цементу. Кластичний матеріал складає 70-75% породи і представлений зернами кварцу, польового шпату, циркону, глауконіту, лусок мусковіту і уламків серицитових і кварцово-слюдистих сланців. Кварц складає 90-95% кластичного матеріалу і представлений кутасто-заокругленими зернами розміром 0,04-0,2мм, переважають алевролітові зерна 0,05-0,1мм. Цемент базального типу, складається із серицитоглинистого матеріалу. Структура породи – алевролітова, текстура – мікрошарувата.

Неоднаковий вміст цементу, погана або недостатня відсортованість і окатаність матеріалу, з якого складається дана порода, зумовлюють низькі значення колекторських властивостей – невелику ємність і незначну проникність.

Пісковики нижньоменілітової підсвіти сірі, нерівномірно зернисті, кварцові. Мікроскопічно порода складена уламками (80-90% породи). Уламковий матеріал складається з кутасто-округлених зерен кварцу і поодиноких зерен польового шпату, лусочок слюди і уламків кременисто-слюдистих порід. Цемент породи глинисто-кременистий і належить до типу нарощування і заповнення пор. Структура породи – алевропсамітова.

Пісковики середньоменілітової підсвіти сірі, темно-сірі, бурі, дрібно- і середньозернисті, слюдисті, вапнисті, щільні, місцями крихкі; мікроскопічно порода складається з кутасто-заокруглених і окатаних зерен кварцу (80-95%), розміри зерен – 0,04-2,0 мм. Кластичний матеріал складає 60-85% породи і представлений зернами кварцу, польового шпату, глауконіту, лусочками мусковіту.

Цемент пісковиків поровий, за складом глинистий з невеликою домішкою карбонатного матеріалу. Структура породи – алевропсамітова, текстура – мікрошарувата.

На розвідувальних площах (газоконденсатне родовище Космач, Росільнянське газове родовище, нафтове родовище Пнів, Бухтівець, Рудовець, Верхня Луква та інші) одержано в достатній кількості керн, що дало змогу вивчити петрофізичні властивості піщано-алевролітових порід. Для відповідних світ побудовані статистичні залежності між колекторськими властивостями, мінералогічними параметрами і речовинним складом цементу.

Аналіз керна матеріалу сприяє більш глибокому вивченню геофізичного матеріалу. Ті чи інші невідповідності літолого-петрофізичної характеристики за керном успішно розв'язують залученням промислово-геофізичного матеріалу. За даними керн встановлені зв'язки між окремими петрофізичними параметрами і обумовленими ними промислово-геофізичними характеристиками.

Статистичні залежності між літологічними властивостями, речовинним складом цементуючої речовини, фільтраційно-ємнісними властивостями допомагають використати геофізичні методи для розділу порід на колектори і неколектори, визначення колекторських властивостей порід і характеру їх насичення.

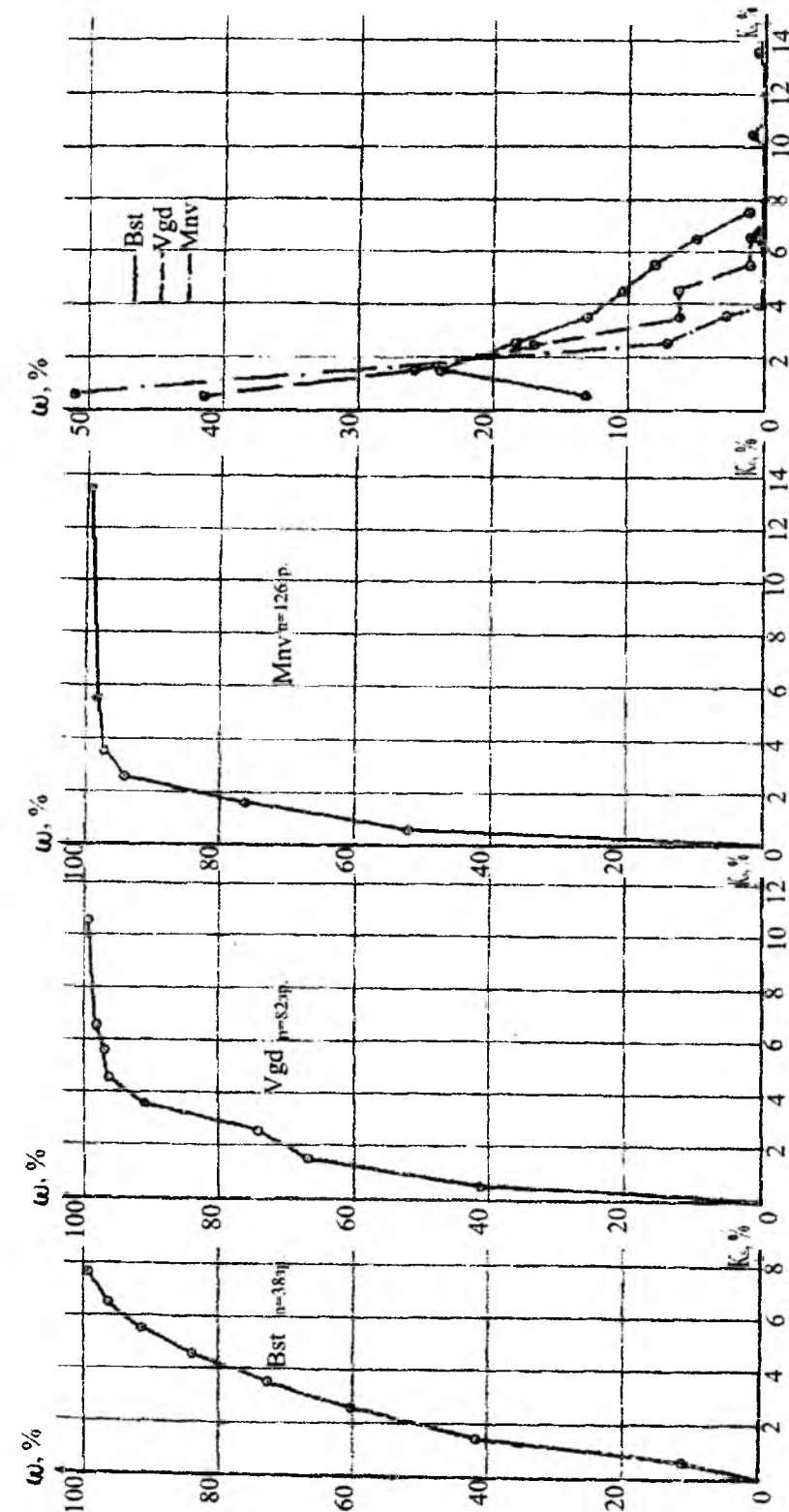


Рис.1 Розподіл пористості по родовищі Космач (еоеонові відклади).

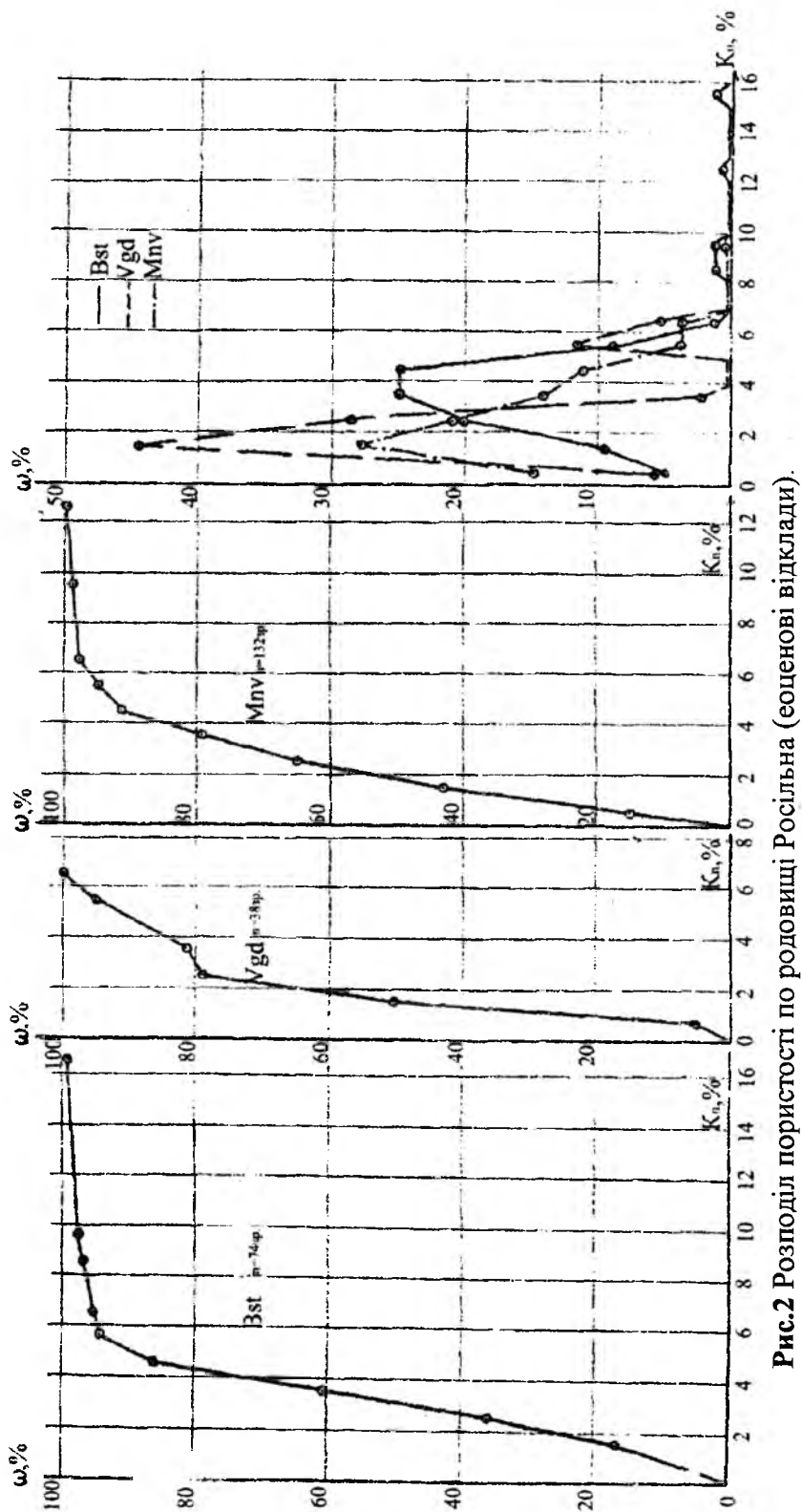


Рис.2 Розподіл пористості по родовищі Росільна (еоценові відклади).

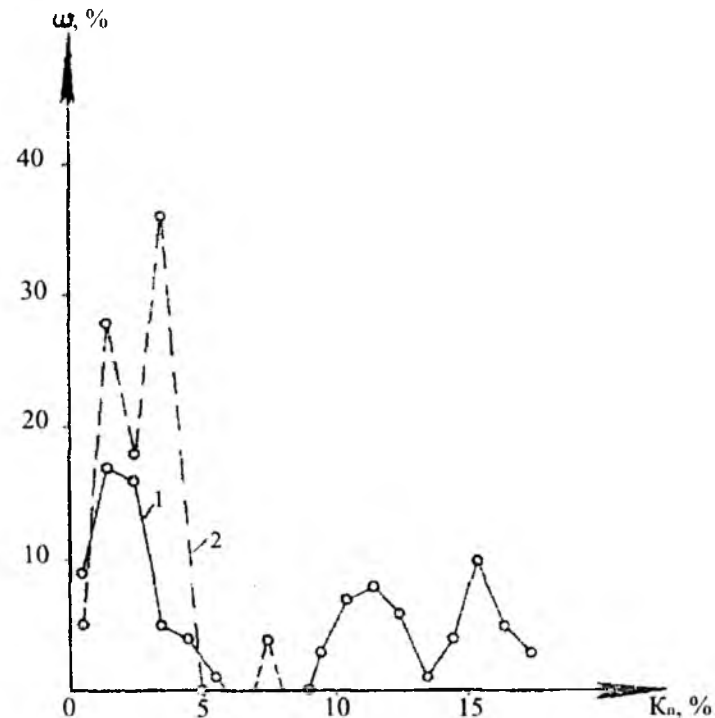


Рис. 3. Диференціальні криві розподілу відкритої пористості менілітової світи для родовища Космач (1) і Росільна (2)

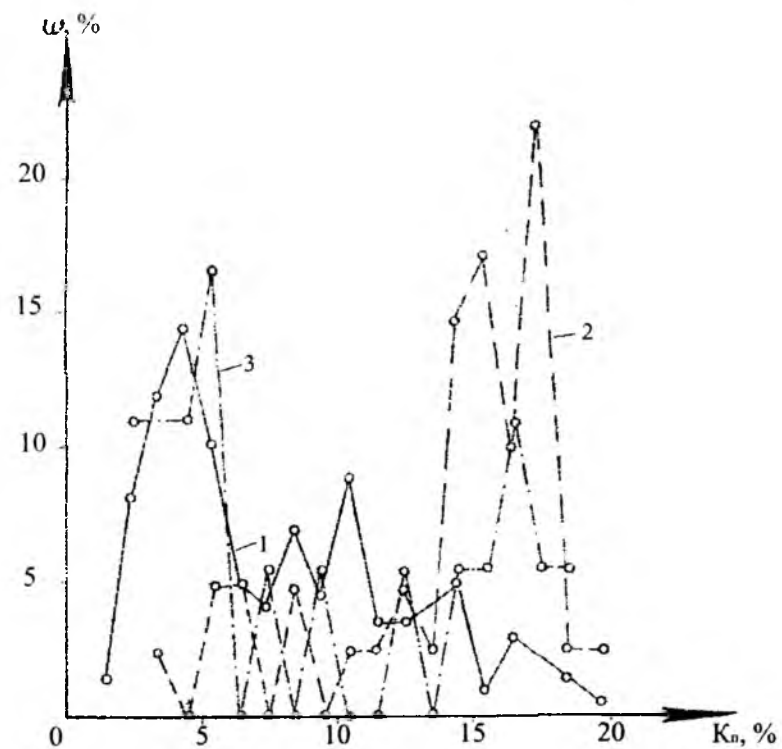


Рис. 4. Диференціальні криві розподілу відкритої пористості родовищ: Битків, 1-нижньоменілітова підсвіта; Старуня, 2-нижньоменілітова підсвіта; Гвізд, 3-середньоменілітова підсвіта

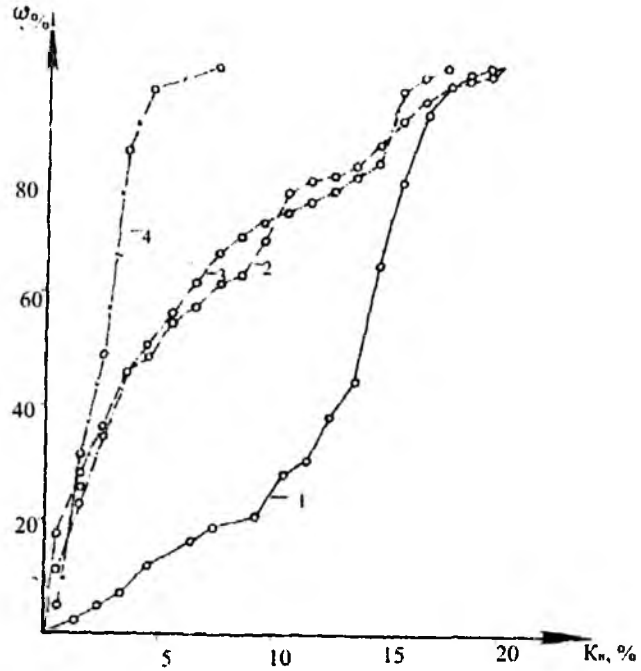


Рис. 5. Інтегральні криві розподілу відкритої пористості для менілітових відкладів родовищ: Старуна-Гвізд, 1 – нижньоменілітова підсвіта; Битків, 2 – нижньоменілітова підсвіта, 3 – середньоменілітова підсвіта; Росільна, 4 – менілітова підсвіта

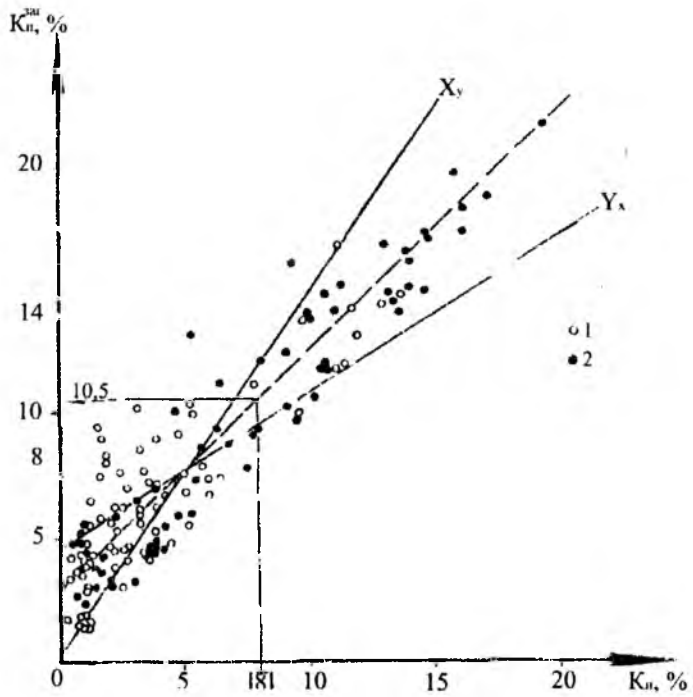


Рис. 6. Графік зв'язку загальної і відкритої пористості складки Глибинна: 1 – середньоменілітова підсвіта; 2 – нижньоменілітова підсвіта

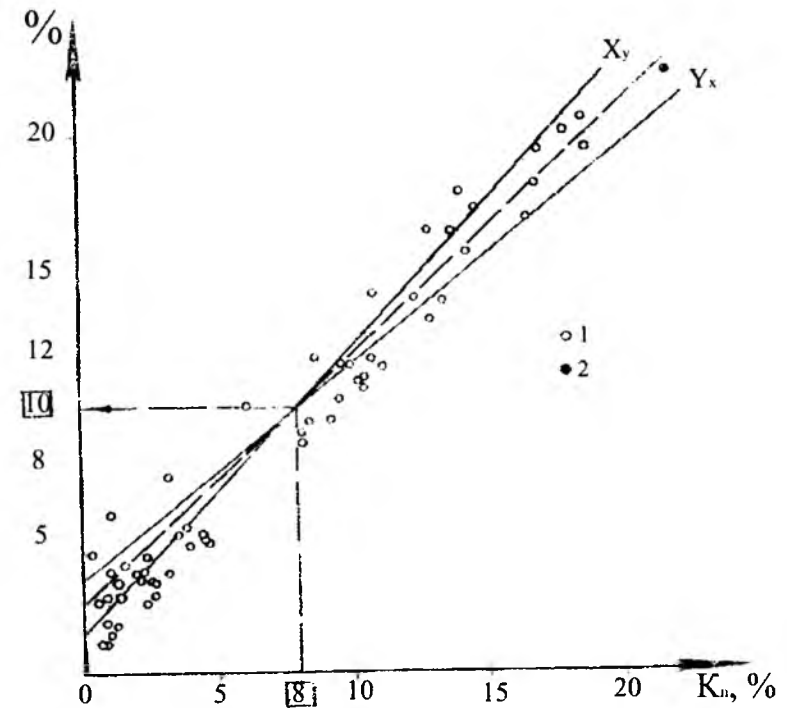


Рис. 7. Графік зв'язку загальної і відкритої пористості складки Глибинна: 1 – манявська світа; 2 – яменська світа

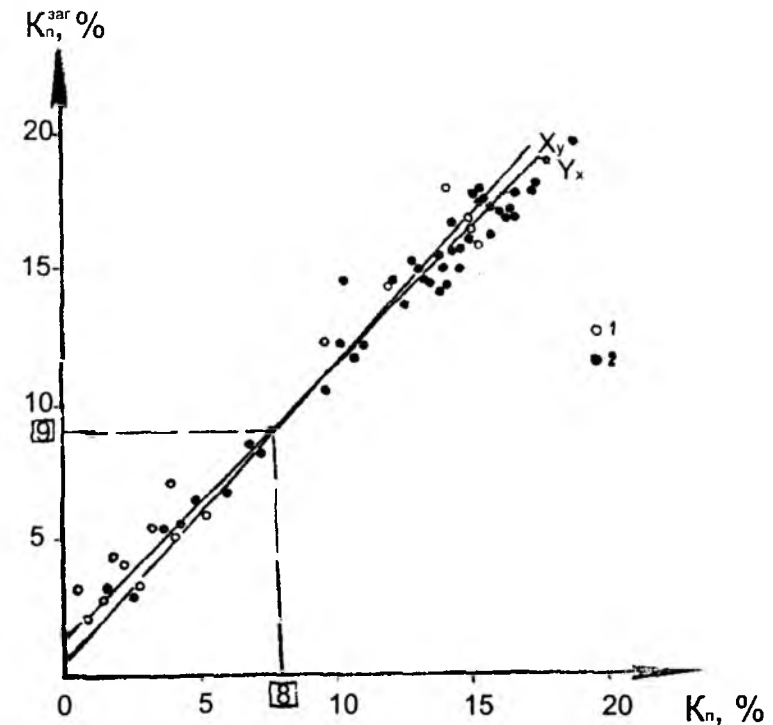
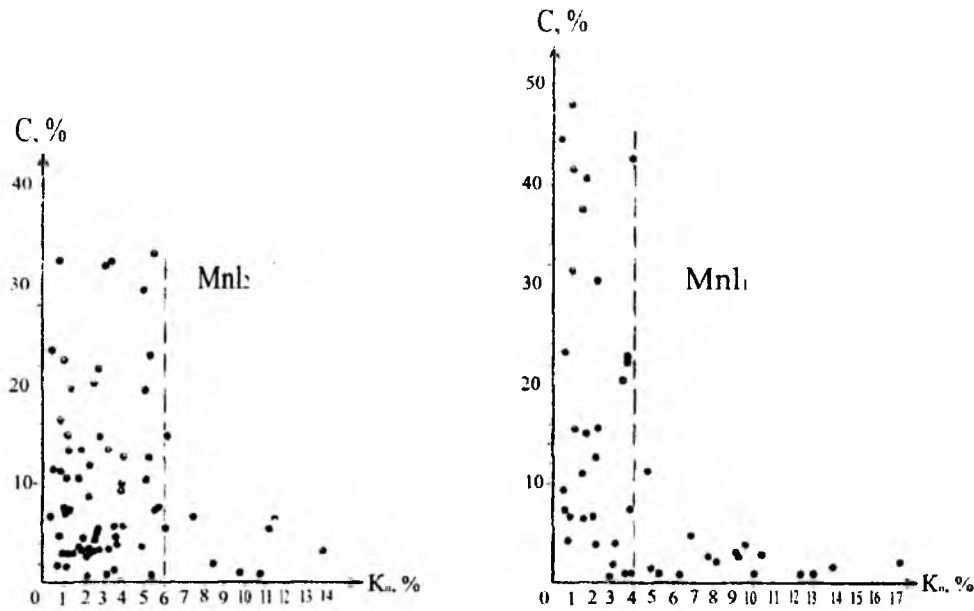
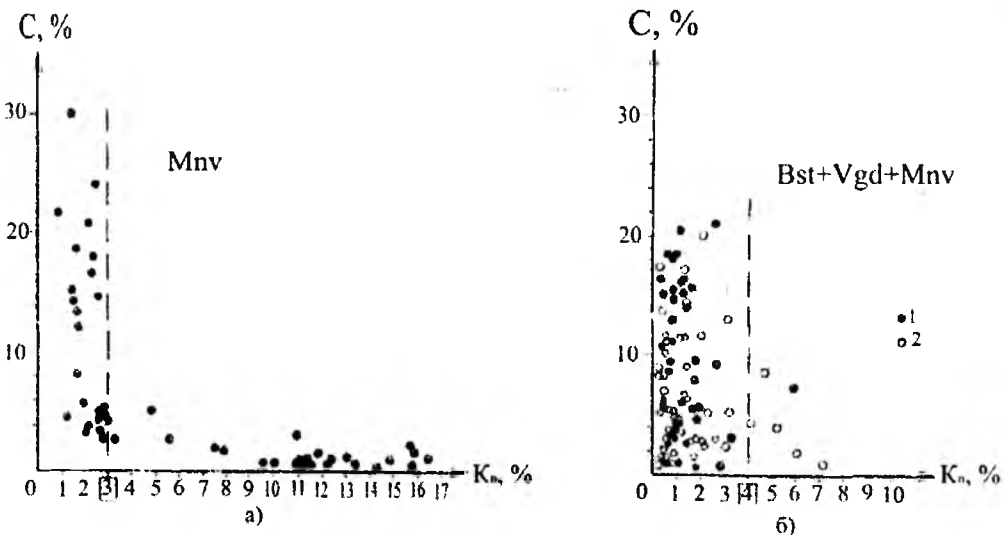
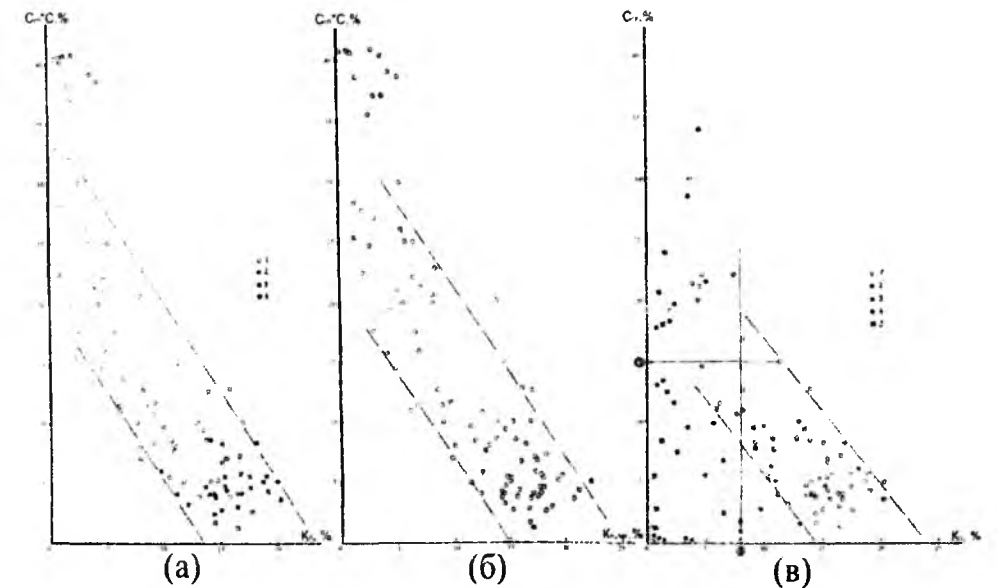


Рис. 8. Графік зв'язку загальної і відкритої пористості складки Глибинна: 1 – середньоменілітова підсвіта; 2 – нижньоменілітова підсвіта

Рис. 9. Залежність K_p від карбонатності відклади, складки ГлибиннаРис. 10. Залежність K_p від карбонатності.
а) менілітова світа, б) еоценові відклади пл.Космач

Частотні графіки розподілу пористості піщано-алевролітових порід менілітової світи Битківської Глибинної складки, складок Старуня і Гвізд, площі Росільнянської і газоконденсатного родовища Космач (рис. 1-5) свідчать про наявність у цих відкладах відкритої пористості від часток % до 21,7%. Зіставлення відкритої і загальної пористості по цих площах (рис. 6, 7, 8) свідчать про значну розбіжність цих величин в діапазоні низьких значень і більш тісного зв'язку в діапазоні пористості понад 7-8%. Це обумовлено, по-перше, наявністю змішаного цементу в низькопористих пісковиках, а також поганою відсортованістю кластичного матеріалу і присутністю різних мінералів у породі. Про це свід-

чать графіки залежності пористості з карбонатністю (рис. 9, 10). Як видно з рисунків, на окремих площах в діапазоні низьких пористостей ($K_p < 7\%$) спостерігається підвищений вміст карбонатного цементу, і навпаки незначна карбонатність ($C_k = 3-4\%$) або повна її відсутність в діапазоні підвищеної пористості ($K_p \geq 7-8\%$). Як бачимо з рисунків, на родовищі Старуня-Гвізд у менілітових відкладах підвищеною карбонатністю володіють піщано-алевролітисті породи з відкритою пористістю нижче 3-4%. У породах з більшою пористістю карбонатність відсутня. Майже подібна характеристика в менілітових відкладах площ Космач, Росільна і в нижньоменілітовій підсвіті складки Глибинна (Битковське родовище). Середньоменілітова підсвіта характеризується підвищеною карбонатністю в діапазоні пористості від 0 до 6% (рис. 9). Також спостерігається підвищена карбонатність деяких зразків ($C_k \leq 7\%$) в інтервалі величин пористості 6-12%.

Рис. 11 Графіки залежності відкритої пористості від загальної пористості з відсотковим вмістом цементуючої речовини.
а) 1 – $K_{пр}$ не визначається, 2 – $K_{пр} = 1-10$ мД, 3 – $K_{пр} = 10-100$ мД, 4 – $K_{пр} = 100-500$ мД;
б) зв'язок $K_p^{зар}$ з сумарним складом цементу;
в) зв'язок K_p з глинистістю: 1 – карбонатність відсутня; 2 – $C < 4\%$; 3 – $C = 4-6\%$; 4 – $C = 6-13\%$; 5 – $C > 13\%$.

Для з'ясування впливу карбонатності на проникність на графіку $K_p = f(C_{гл} + C_k)$ (рис. 11), побудованому для менілітових і еоценових відкладів, умовними позначеннями зазначені межі змінювання проникності, $\times 10^{-15} \text{ м}^2$. Як видно з рисунку, підвищеною проникністю ($K_{пр} > 1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$) володіють зразки з пористістю $K_p > 8\%$. Зразки з проникністю $(10-100) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ володіють відкритою пористістю $K_p = 8-15\%$, а для зразків з проникністю більшою $100 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ пористість змінюється від 12 до 21%. Незначна карбонатність в діапазоні ефективної пористості ($K_p > 8\%$) не

впливає на проникність, оскільки зразки з карбонатністю 2-3% характеризуються такою ж проникністю, як і зразки без карбонатності.

З метою з'ясування впливу цементу на колекторські властивості (пористість, проникність) побудовані залежності $K_p = f(C_{гл} + C_k)$, $K_p^{заг} = f(C_{гл} + C_k)$, $K_p = f(C_{гл})$ (рис. 11), а також залежності між глинистою і розчинною складовою цементної речовини в піщано-алевритистих породах (рис. 12).

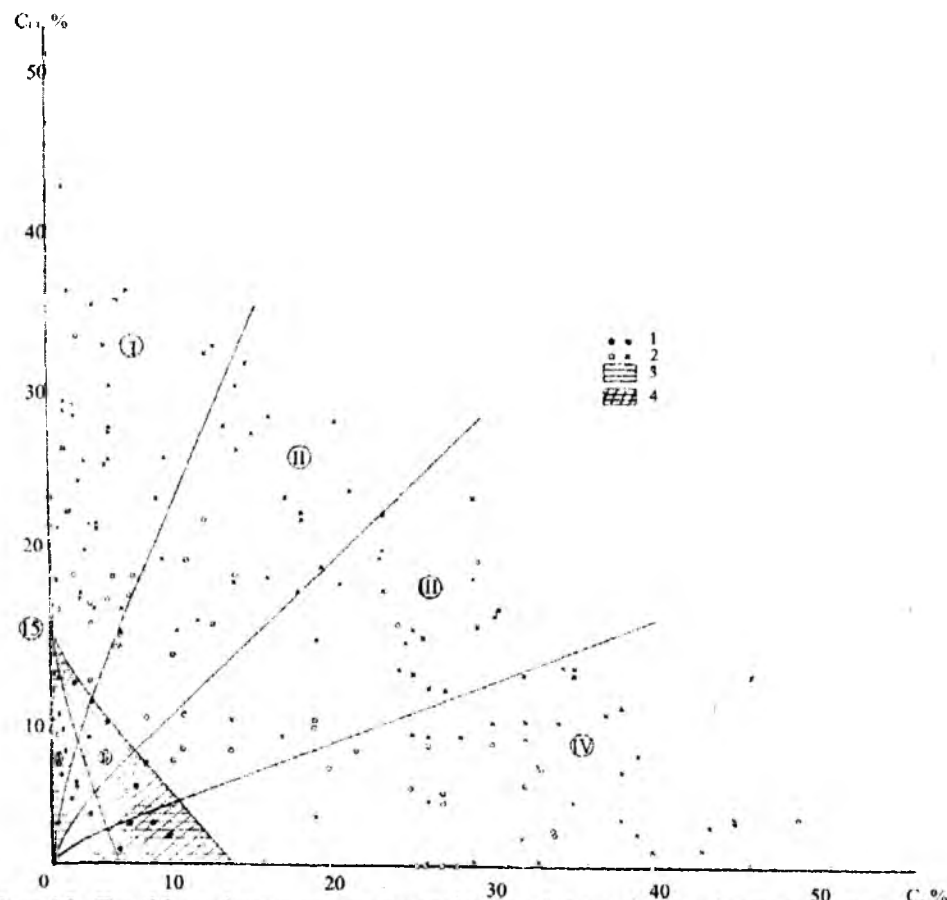


Рис.12. Графік зв'язку глинистості з карбонатністю піщаних порід.

- 1 – $K_{пр} > 0,1 \text{ мД}$;
- 2 – $K_{пр}$ не визначалось;
- 3 – $K_{пр} < 0,1 \text{ мД}$;
- 4 – $K_{пр} = 0,1 - 1 \text{ мД}$.

Як видно з рисунка 12, зв'язок між цементуючою речовиною ($C_{гл} + C_k$) і пористістю існує, але надто слабкий, оскільки на пористість впливає неоднорідність гранулометричного складу скелетної фракції породи. Гранулометричний аналіз свідчить, про погану відсортованість кластичного матеріалу, а вивчення шліфів – про різну окатність зерен.

Графік $K_p = f(C_{гл})$, побудований з урахуванням розподілу карбонатної речовини (рис. 11^б) свідчить про відсутність кореляційного зв'язку між пористістю і глинистістю в діапазоні пористості від 1-2 до 8%. Як

видно з цієї залежності, піщано-алевролітисті породи з пористістю менше 8% володіють змішаним складом цементу.

Зв'язок цементуючої речовини з проникністю також свідчить про домінуючий вплив структури скелетної фракції на фільтраційні властивості.

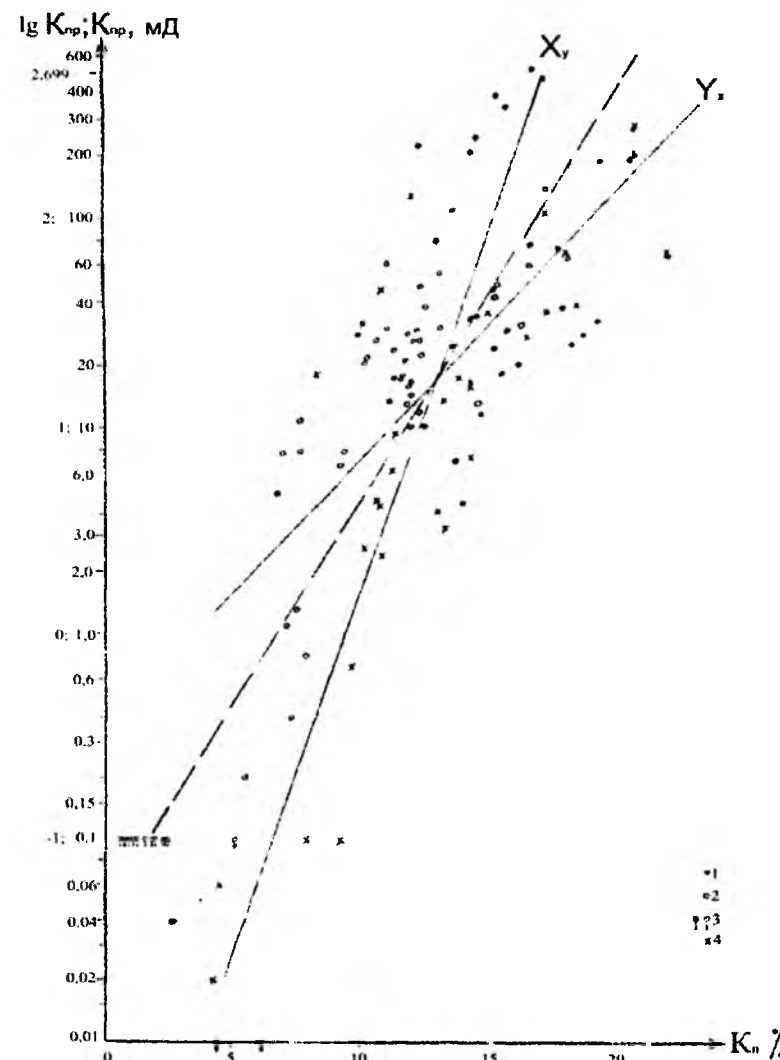


Рис.13. Зіставлення відкритої пористості з проникністю за даними ядра. 1 – родовище Старуння-Гвізд, 2 – родовище Космач, 3 – $K_{пр} < 0,1$ і $0,1 \text{ мД}$, 4 – родовище Битків

Для з'ясування зв'язку проникності з відкритою пористістю побудований графік залежності $K_{пр} = f(K_p)$ для колекторів палеогенових відкладів родовищ Космач, Битків, Старуння-Гвізд (рис. 13). У результаті статистичної обробки (кількість визначень 119) отримані такі рівняння регресії для напівлогарифмічної залежності:

$$Y_x = 0,2171 \cdot X - 0,3853; \quad r = 0,61 \pm 0,05;$$

$$X_y = 2,8908 \cdot Y + 9,3;$$

де $Y = \lg K_{пр}$, $X = K_p$.

Як видно з рисунка, тісного зв'язку між проникністю та пористістю не існує ($r=0,61$) і, особливо, в діапазоні величин від $10 \cdot 10^{-15}$ до $500 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Досліджуючи зв'язок між карбонатною і глинистою складовими цементуючої речовини піщано-алевритистих порід (рис. 12), спостерігаємо, що в колекторах з $K_{пр} > 1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ присутній, в основному, глинистий цемент, і лиш незначний відсоток припадає на змішаний цемент. Максимальна глинистість для таких колекторів не перевищує 15% від ваги. Мінімальне значення глинистості в колекторах у відсутності карбонатного матеріалу складає біля 1%. Пісковики з низькою глинистістю переважно володіють високою пористістю і проникністю. Пісковики, для яких сумарна величина глинистої і карбонатної речовини складає більше 15%, характеризується низькими колекторськими властивостями і, як правило, для них притаманний змішаний склад цементу.

Залежно від ступеня заглинизованості і карбонатизації піщано-алевритисті породи характеризуються різними величинами питомого електричного опору – низькими і пониженими при значній заглинизованості і, навпаки, високими при збільшенні карбонатної речовини в породі. В зв'язку з цим, нами розподілено піщано-алевролітисті породи на чотири типи: породи з глинистим (переважно з глинистим) цементом (I), глинисто-карбонатним (II), карбонатно-глинистим (III) і переважно з карбонатним цементом (IV) (рис. 12).

Для унормування колекторських властивостей піщано-алевролітових порід Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину з класифікаційними схемами інших геологічних районів, нами зіставлені дані літолого-петрофізичних властивостей порід і геолого-геофізичних параметрів внаслідок чого рекомендується нова схема розподілу піщанистих порід палеогенових відкладів на окремі групи.

Згідно з даною схемою піщано-алевролітові породи розрізів свердловин розділені на дві категорії: промислові колектори (група А) і непромислові колектори (групи Б). До групи промислових колекторів віднесені пласти пісковиків і алевролітів, здатних при застосуванні сучасних методів розкриття пластів і їх освоєння отримувати промислові припливи нафти, газу або рівнозначні за дебітом припливи пластової води (змішаної продукції).

До непромислових колекторів віднесені всі піщано-алевролітисті породи, які характеризуються низькою ефективною пористістю (субколектори) і за відповідних умов розкриття з них можна отримувати дуже незначні (непромислові) припливи пластового флюїду.

Промислові (А) і непромислові (Б) колектори діляться на окремі класи. Промислові розподілені на чотири класи, а непромислові – на два класи: важкопроникні і дуже слабо проникні (практично непроникні) (рис. 14).

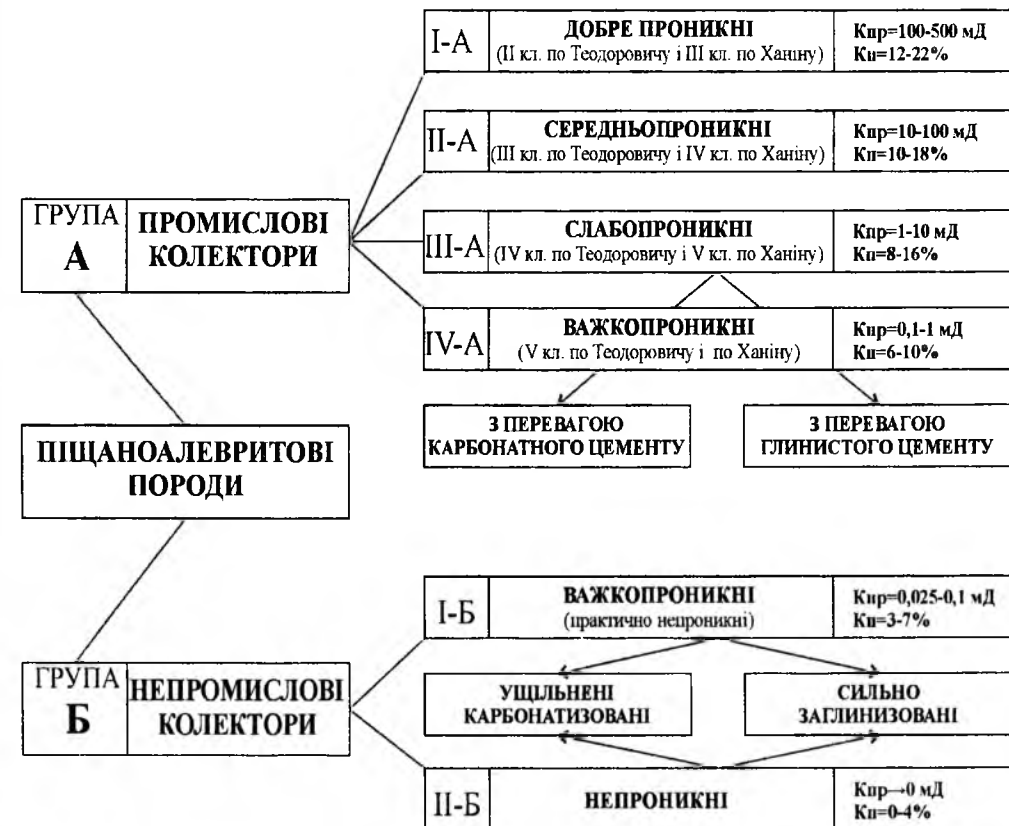


Рис.14. Схема розподілу на окремі групи піщанистих порід палеогенових відкладів Передкарпаття

Нижче наводимо літолого-петрографічну і промислово-геофізичну характеристику колекторів за окремими групами.

Промислові колектори (група А)

Клас I-A. До даного класу віднесені пісковики з проникністю $(100-500) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ і більше, і з відкритою пористістю – 12-22% (III кл. за А. А. Ханіним).

Пісковики кварцового складу (90-98%) з кутасто-округлою формою зерен добре відсортовані, дрібно-середньозернисті, середньо- і слабоцементовані. Цемент глинистий (2-10%), тип цементації – контактний, порово-контактний, контактово-поровий. Карбонатність відсутня або дуже незначна ($C_k \leq 1,5\%$). Відкрита пористість майже дорівнює абсолютній. Об'ємна густина $\delta_n = (2,1-2,35) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$. У фільтрації пластових флюїдів бере участь міжпорова ємність і проникність. Кислотна обробка не збільшує фільтраційних властивостей колекторів.

В нафтогазоносній частині розрізу питомі електричні опори пластів $\rho_n = 10-40 \text{ Ом} \cdot \text{м}$, іноді при високій нафтонасиченості (родовище Старуня-Гвізд, газове родовище Космач) питомий опір досягає декількох сотень Ом·м. Криві зондування – двошарові, проникнення фільтрату неглибоке ($D/d < 4$, де D – діаметр зони проникнення, d – діаметр свердловини).

У водоносній частині розрізу $\rho_n=0,5-2,5$ Ом·м; неглибоке проникнення фільтрату ($D/d \leq 4$), утворюється глиниста кірка. Формування зони триває 2-3 доби. Процес розформування зони є більш тривалим – 2-3 місяці.

На діаграмах методу ПС колектори відзначаються від'ємними амплітудами (при $\rho_f/\rho_v > 1$). Природна радіоактивність невисока – 3-4 мкР/год.

При розкритті продуктивних нафтових пластів одержують стабільні дебіти, які сягають десятків і сотень т/добу.

Клас II-A. До даного типу порід віднесені пісковики, які володіють проникністю $(10-100) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ при відкритій пористості $K_p=10-18\%$ (IV клас за А. А. Ханіним).

Пісковики дрібно- і різнозернисті, слабо- і середньозцементовані, кварцового складу, кластичний матеріал (85-90%) з кутасто-окатаною і напівокатаною формою зерен, цемент глинистий (10-15%) з невеликою домішкою карбонатної речовини ($C_k=0-2,5\%$). Тип цементації порово-контактний, контактно-поровий, контактний. Об'ємна густина $\delta_n=(2,26-2,4) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Фільтраційні властивості порового середовища даного класу залежать від характеру розподілу цементу в породі. За нерівномірного його розподілу в погано відсортованих різновидах проникності знижується при відповідно високій пористості. Під дією солянокислотної обробки карбонатний цемент розчиняється, і фільтраційні властивості можуть бути близькими до колекторів I класу. При високій пористості ефект від соляно-кислотної обробки є незначним або відсутнім.

В нафтогазоносній частині розрізу питомий електричний опір пластів $\rho_n=15-50$ Ом·м, іноді 150-200 Ом·м. Глибина проникнення фільтрату $D=(5-6)d$. Утворюється глиниста кірка. Формування зони триває декілька тижнів і місяців. Глибина зони у водоносній частині є трохи більшою, ніж у продуктивній і досягає 5-6, а іноді 8 діаметрів свердловини. Зона проникнення зберігається тривалий час після обсадки свердловини колоною.

На діаграмах ПС пласти-колектори відзначаються від'ємними аномаліями при $\rho_f > \rho_v$. Природна радіоактивність – 4-5 мкР/год.

Колектори даного класу поширені в розрізах усіх свердловин, які розкрили палеогенові відклади і є основними резервуарами нафтових і, значною мірою газових покладів у родовищах Бориславсько-Покутської зони Передкарпатського прогину.

При розкритті із пластів одержують дебіти в декілька десятків т/добу.

Клас III-A. До даного класу віднесені пісковики і алевроліти з проникністю $K_{пр}=(1-10) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, відкритою пористістю $K_p=8-16\%$ (V клас за А. А. Ханіним).

Пісковики дрібно- і різнозернисті, слабо- і середньозцементовані.

Алевроліти грубозернисті, піщані, щільні. Склад пісковиків і алевролітів кварцовий, кластична частина складає 85-90%. Цемент піс-

ковиків в основному глинистий, зустрічається карбонатний; в алевролітах цемент, в основному, глинистий. Тип цементації – плівковий, поровий, контактно-поровий. Відсоток цементуючої речовини в породі складає 10-15% від її ваги. Карбонатність пісковиків $C_k=0-5\%$, для алевролітів карбонатність відсутня. Об'ємна густина $\delta_n=(2,25-2,45) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Зниження фільтраційних властивостей колекторів обумовлено різнозернистістю кластичного матеріалу, збільшенням цементуючої речовини, збільшенням щільності упаковки зерен. Не дивлячись на значну пористість деяких піщаних різновидів, фільтраційні властивості породи можуть бути низькими; що залежить від характеру розподілу цементу в породі. Навіть при рівномірному розподілі цементу в погано відсортованих відмінностях фільтраційні властивості породи є низькими. Обумовлено це складною структурою порового простору. Власне, ця причина і є домінуючою в значній частині порід менілітової, вигодської і манявської світ. Пористість таких порід становить 10-15% [8].

Промислово-геофізична характеристика колекторів наступна.

Питомий електричний опір пісковиків в продуктивній частині коливається в межах від 30-80 до 150-250 Ом·м. Криві зондування – двохшарові. Проникнення фільтрату досить глибоке, про що свідчить також і понижувальне проникнення при розкритті порід на високомінералізованих промивальних рідинах. У водоносній частині розрізу опір пластів $\rho_n=5-10$ Ом·м при тришарових підвищувального типу кривих зондування. Глиниста кірка невеликої товщини. Формування зони проникнення триває декілька (2-2,5) місяців при перепаді тиску 10-20 МПа. Розформування зони після обсадження свердловини колоною триває близько одного року і більше.

Амплітуди ПС незначної величини, змінюються з часом (при $\rho_c=1,0$ Ом·м $\Delta U_{пс}=15-20 \text{ мВ}$). Природна радіоактивність при $d_n=0,10 \text{ м}$ – 5-7 мкР/год. Високі значення інтенсивності вторинного гамма-випромінювання (метод НГК).

Клас IV-A. До даного класу віднесені пісковики і алевроліти з проникністю $(0,1-1) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ і відкритою пористістю 6-10% (V клас за А. А. Ханіним).

Пісковики грубо- і середньозернисті, міцні, іноді окварцовані, цемент глинистий і карбонатний, карбонатно-глинистий. Тип цементації – поровий, базальний, рідше контактно-поровий. Відсоток цементуючої речовини складає 15-20%. Карбонатність – 5-7%. Об'ємна густина породи $\delta_n=(2,4-2,52) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Алевроліти дрібнозернисті, шаруваті, глинисті, міцні. Цемент, в основному, глинистий. Кількість цементу – 20-30%. Тип цементації такий, як і в пісковиках.

За даними геофізичних досліджень свердловин пісковики характеризуються високими значеннями питомих електричних опорів ($\rho_n=50-100$ Ом·м, іноді 150-350 Ом·м). У випадку збільшення глинистої складової в цементі, або й зовсім глинистого цементу, питомий опір у водоносній і продуктивній частинах порід майже однаковий. Криві зондування

двошарові. Проникнення фільтрату в пласти не спостерігається, хіба що в пласти з тріщинною проникністю. Незначні припливи нафти або газу спостерігаються в розрізах, де є розвинена ефективна тріщинуватість порід. Під дією солянокислотної обробки карбонатний цемент розчиняється, внаслідок чого звільнюється частина порового простору породи з карбонатністю 7-8% і спостерігається збільшення пористості в 2-3 рази [8]. На Битківському родовищі після кислотної обробки дебіти збільшувались на 33-47%, а в окремих випадках – в 3,5 рази. Різкому підвищенню дебітів сприяє також звільнення кальцитових тріщин від заповнювачів.

Значний вплив на фільтраційні властивості даного класу порід має глиниста речовина, яка внаслідок високої пластичності виповнює пори в породи і значно знижує її ємнісні і фільтраційні властивості. Дослідження показали [8, 9], що присутність у піщаних породах менілітової світи 30% частинок розміром менше 0,01 мм знижує пористість до 5%, проникність до $1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$ і нижче. Мікроскопічні дослідження алевролітів і аргілітів підтверджують присутність у них тонкодисперсного кремнезему, підвищений вміст якого зменшує поровий простір алевролітів і одночасно робить породи більш крихкими і твердими. Під час тектонічних рухів породи деформуються з утворенням тріщин.

На діаграмах ПС спостерігаються незначні амплітуди потенціалу, вторинна гамма-активність досягає максимальних значень ($I_{\text{пг}}=3,0-3,5$ ум.од.), гама активність більш висока, ніж у попередніх класах ($I_{\gamma}=6-9$ мкР/год. Іноді $I_{\gamma}=3-5$ мкР/год., що свідчить про перевагу карбонатної складової цементу в породи).

Непромислові колектори (група Б)

Клас І-Б. До цього класу віднесені ущільнені піщанисті і заглинизовані піщано-алевролітисті породи. Проникність $K_{\text{пр}}=(0,025-0,1) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$, відкрита пористість – 3-7%.

Пісковики грубо- і середньозернисті, міцні, щільні, цемент глинистого і змішаного складу, іноді кременистого. Тип цементації – поровий, базальний. Відсоток цементації речовини складає 25-35%, карбонатність 6-13%. Об'ємна густина породи $\delta_{\text{п}}=(2,5-2,6) \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Алевроліти дрібнозернисті, шаруваті, глинисті, міцні. Цемент глинистий, кількість цементу 30-40%. Тип цементації базальний.

Пісковики характеризуються високими значеннями питомих електричних опорів ($\rho_{\text{п}}=150-500 \text{ Ом} \cdot \text{м}$), алевроліти і заглинизовані пісковики – пониженими опорами (20-100 Ом·м).

Криві зондування двошарові. Амплітуда ПС відсутня або дуже незначна. Іноді, за наявності в розчині хімічних реагентів, навпроти високоомних пластів з підвищеною карбонатністю спостерігаються досить глибокі від'ємні амплітуди ПС, непостійні в часі, і пояснюються електрохімічною природою виникнення окислювально-відновного характеру.

Природна радіоактивність може бути різною – від низьких значень (пісковики з карбонатним цементом) $I_{\gamma}=4-6$ мкР/год. – до високих $I_{\gamma}=6-12$ мкР/год. Радіаційна гама-активність приймає також різні величини:

ни: для пісковиків з карбонатною складовою в цементі $I_{\text{пг}}=3,5-4,0$ ум.од., а для алевролітів зі значним вмістом водню, пов'язаним з підвищеною глинистістю, покази НГК понижені (1,5-2,0 ум.од.). На кавернограмі такі пласти характеризуються номінальним діаметром.

Клас ІІ-Б. Даний клас охоплює щільні і глинисті пісковики і алевроліти з дуже низькою відкритою пористістю ($K_{\text{п}}=0-4\%$) і відсутністю міжзернової проникності.

Літолого-петрографічна і геофізична характеристики такі ж як і в породах класу І-Б, тільки щільні пісковики більш карбонатизовані, а отже, і величини питомих електричних опорів досягають іноді декількох тисяч Ом·м. Дані пласти приймаються за опорні при визначенні подвійного різницевого параметра $\Delta I_{\text{пг}}$.

Вищенаведена характеристика піщано-алевролітових порід за даними керна, промислової геофізики і результатів випробувань дозволяє зробити висновок, що в розрізі відкладів палеогенового флішу поряд з низькопористими піщаними породами є пласти пісковиків з високими колекторськими властивостями (з відкритою пористістю від 8 до 22%, проникністю – від одиниць до $(10-500) \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$). Такі породи в регіоні є основними резервуарами нафти та газу.

Примітка: На рисунках проникність зображена в мД, в тексті – в $\text{м}^2 \sim 1 \cdot 10^{-15} \text{ м}^2$.

Література

1. Субботін С.І. Про будову глибинних зон Карпат / С.І. Суботіна // Праці ін-ту геології корисних копалин: матеріали з геології західних областей УРСР. – АН УРСР, 1960. – Т. II.
2. Богданов А.А. Основные черты тектоники Восточных Карпат / А.А. Богданов // Сов. Геология. – 1949. – Вып. 40.
3. Вялов О.С. Общис структурные подразделения западных областей УРСР / О.С. Вялов // Изв. АН СССР. – 1969. – Вып. 5.
4. Ладыженский Н.Р. Геологическое строение и нефтегазоносность Северного Предкарпатья / Н.Р. Ладыженский, В.И. Антипов. – Гостоптехиздат, 1961.
5. Бортницкая В.М. Коллекторы нефти палеогена Внутренней зоны Предкарпатского прогиба и методика их исследования: автореф. канд. дисс. / В.М. Бортницкая. – Ленинград, 1966.
6. Бортницкая В.М. Характеристика коллектирующих пород нефтяных месторождений Предкарпатья. Геология и нефтеносность Советских Карпат / В.М. Бортницкая, Д.В. Кутовая, Э. Алешкина. – М.: Гостоптехиздат, 1963.
7. Вульчин Е.И. Породы-коллекторы нефти менилитовой серии в свете детального петрографического исследования (глинистые породы) / Е.И. Вульчин // В кн. "Геология и геохимия ископаемых". – К.: Наукова думка, 1969. – Вып.20.

8. Бортницкая В.М. Связь коллекторских свойств терригенных пород Предкарпатья с вещественным составом / В.М. Бортницкая // Нефтяная и газовая промышленность. – К., 1969. – Вып.1.
9. Павловський Е.В. Литофациальні особливості отложений менилітової серії юго-восточної частини Внутренньої зони Предкарпатського прогибу в межах Долинського і Битківського нафтопромислових районів / Е.В. Павловський, В.К. Сельський, Л.В. Григорчак // Нефтегазовая геология и геофизика. – М.: Недра, 1966. – Вып.9.
10. Характеристика коллекторов Оров-Уличнянского нефтяного месторождения / В.И. Грицишин, Р.М. Новосилецкий, Н.С. Претеченская, Г.П. Федорович и др. // Нефтяная и газовая промышленность. – 1968. – Вып.1.
11. Курилец И.И. Тектоника и нефтегазоносность Внутренней зоны Прекарпатского прогиба в междуречье Сукуля и Прута и перспективы нефтяных и газоконденсатных месторождений. Автореферат канд. дисс. / И.И. Курилец. – Львов, 1970.
12. Копистянський Р.С. Значення тріщинуватості порід у формуванні нафтових родовищ Радянських Карпат / Р.С. Копистянський. – К.: Вид-во АН УРСР, 1959.
13. Линецкий В.Ф. Трещиноватые коллекторы нефтяных месторождений Восточных Карпат / В.Ф. Линецкий // Тр. совещания по трещинным коллекторам нефти и газа. – М.: Гостоптехиздат, 1966.
14. Шишигин С.И. О трещинных коллекторах нефти и газа в Восточных Карпатах / С.И. Шишигин // Научные записки Львовского политех. ин-та, серия геолого-разведочная. – Львов, 1956.
15. Бортницкая В.М. Изучения трещиноватости коллекторов палеогена нефтяных месторождений Предкарпатского прогиба / В.М. Бортницкая, Д.В. Кутовая // Тр. УкрНИГРИ. – М.: Гостоптехиздат, 1963. – 4.
16. Гурьба П.К. Коллекторы нефти палеогеновых отложений Внутренней зоны Предкарпатского прогиба. Дисс. ... канд. наук. – Борислав, 1961.
17. Сафаров И.П. Физические параметры коллекторов нефти и газа Внутренней зоны Предкарпатского прогиба / И.П. Сафаров // Труды НТС по проблеме нефтеносности Украины, К., 1959.
18. Гнатюк Р.А. Исследование вопросов повышения нефтеотдачи на месторождениях Предкарпатья: дисс. ... канд. наук / Гнатюк Р.А. – Ивано-Франковск, 1966.
19. Иванюта М.М. Коллекторские свойства продуктивных горизонтов Бориславского, Битковского и Долинского нефтяных месторождений / М.М. Иванюта, Н.Р. Ковальчук, В.Ф. Малахов // Геология и геохимия нефтяных и газовых месторождений. – К.: Наукова думка, 1965. – №1.

*Стаття поступила в редакційну колегію 23.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Бойком В.С.*

PHYSICAL – PETROGRAPHIC PARAMETERS OF COLLECTORS OF OIL AND GAS DEPOSITS OF THE CARPATHIANS NAFTOGAZONOSNOGO REGION

V. I. Grytsyshyn

*Carpathians management of geophysical works;
76011, Ivano-Francovsk, vool. I.Blavatscogo, 22;
e-mail:kugr@ttk.if.ua*

The question of study of physical-petrography parameters of breeds-collectors of deposits Palaeogene of the Borislavsk-Pocutsk area (south-east part) of the Pre-Carpathians bending with the use of data of kern, selected in mining holes during the boring drilling, results of test of oil and gas objects taking into account the results of geophysical researches of mining holes, is examined. Confronted data of litologo-petrofizichnih properties of breeds with geological-geophysical parameters, that allowed to divide sandstones and alevroliti on two categories: industrial collectors (group And) and non-commercial (group). Ill.14. Bibl.19.

Key words: collector, geophysical parameters, deposits Palaeogene, specific electric resistance, neutron properties of breeds, speed of resilient vibrations, porosity, permeability.

МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ ГІДРОПІСКОСТРУМИННОЇ ПЕРФОРАЦІЇ ЧЕРЕЗ ДЕКІЛЬКА КОЛОН

Ю. Д. Качмар

Науково-дослідний і проектний інститут ВАТ "Укрнафта";
м. Івано-Франківськ, Південний бульвар ім. Пушкіна, 2;
тел. +380 (342) 77-61-40, 77-61-49; e-mail: grp@ndpi.ukrnafta.com

Проводиться розрахунок довжини каналу, що утворився внаслідок дії струменя рідини з піском у пласті за декількома зацементованими колонами. Колони, цементні кільця та порода пласта розглядаються як послідовно розміщені перегородки заданої товщини з притаманною їм початковою швидкістю руйнування матеріалу. Середня осьова швидкість струменя в кожній перегородці визначається з урахуванням її віддаленості від насадки та товщини. Наводиться приклад розрахунку параметрів перфорації, виконаної у свердловині.

Ключові слова: гідропіскоструминна перфорація, свердловина, колона.

Вторинне розкриття пласта гідропіскоструминною перфорацією (ГПП) забезпечує створення каналів значно більших розмірів порівняно з іншими способами перфорації. Під час проведення ГПП канали, утворені внаслідок дії кінетичної енергії сформованим у насадках струменем рідини з піском (пульпою), проходять через колону, цементне кільце і після цього заглиблюються в породу. Однак, методу розрахунку довжини каналу, що проходить через декілька колон з цементними кільцями навколо них ще не існує.

На базі праць Г. Н. Абрамовича, Р. В. Брауна і Дж. Лопера та своїх досліджень С. В. Фалькович і В. П. Гончаров запропонували [1] формулу для розрахунку довжини каналу ГПП, що виробляється в пласті через одну обсадну колону осесиметричною затопленою струминою рідини з піском у вигляді:

$$l = d_o C \left[(u_o / u_{on}) f_o(t) - 1 \right], \quad (1)$$

де l – довжина каналу, виробленого за час різання t , м; d_o – діаметр насадки, м; C – константа умов перфорації; u_o – швидкість витікання пульпи з насадки, м/с; u_{on} – початкова швидкість різання (руйнування) породи (металу, цементу), м/с; $f_o(t)$ – функція часу, що характеризує розвиток каналу в залежності від умов його вироблення.

Нагадаємо, що вироблення каналу в породі починається тоді, коли осьова швидкість струменя на дні каналу більша за початкову швидкість різання, а закінчується, коли вона знизиться до величини початкової швидкості різання.

Похибка розрахункової довжини каналів за формулою (1) порівня-

но з їх довжиною, визначеною за результатами стендових випробувань, становить не більше 12 %, тому розрахунки довжини каналу є досить надійними [2, 3, 4].

Слід зазначити, що у сучасній нафтопромисловій практиці існує потреба в проведенні вторинного розкриття пластів через дві-три обсадні колони, що зустрічається під час переходу з нижніх продуктивних пластів до верхніх. Наприклад, якщо перша колона з товщиною стінки 12 мм, товщина цементного кільця 27 мм, друга з товщиною стінки 11 мм, товщина цементного кільця 35 мм, то наявність другої колони суттєво вплине на зменшення довжини каналу.

Слід нагадати, що умови вироблення каналу через одну і дві колони суттєво відрізняються, здебільшого тим, що під час вироблення отвору перша колона перебуває на початковій ділянці струмини $\Delta l_0 = 2-4 d_o$, де швидкість останньої – u_o , а з переходом в основну ділянку струмини її швидкість інтенсивно знижується, тобто $u_x < u_o$.

За даними Р. В. Брауна, Дж. Лопера одержаними під час стендових випробувань і доповненими С. В. Фальковичем, В. П. Гончаровим [1] початкова швидкість руйнування сталі $u_{on} = 25$ м/с, цементу та пісковиків – $u_{on} = 7,5$ м/с при міцності на стиск $\sigma_{ст} = 50$ МПа, пісковиків – $u_{on} = 5,0-6,0$ м/с при $\sigma_{ст} = 20...30$ МПа, вапняків – $u_{on} = 10$ м/с при $\sigma_{ст} = 100$ МПа.

Як бачимо, якщо значення u_{on} цементу та породи відрізняються не набагато, то для металевих труб і породи – суттєво. Вплив різниці значень початкової швидкості різання різних матеріалів на довжину і час вироблення каналу слід очікувати тоді, коли струмінь зустрічає другу колону, різання якої відбувається вже на його основній ділянці там, де швидкість струменя – u_x в точці зустрічі з матеріалом труби значно менша від початкової. Наприклад, орієнтовно, швидкість його на віддалі $l/d_o = 10$ може дорівнювати $u_x = 0,5 u_o$, а для $l/d_o = 20$ вже $u_x = 0,3 u_o$ (далі буде наведено приклад розрахунку швидкості струменя для свердловини 1-Любіджниська). Тому, якщо формула (1) добре прогнозує розвиток каналу в умовах одноколонної конструкції свердловини, то для прогнозування його розвитку в умовах двоколонної задача ще потребує вирішення.

Для одержання такого розв'язання формула (1), виражена відносно функції часу, з урахуванням того, що осьова швидкість струменя u_o в точці x зіткнення з перегородкою (колоною, цементним кільцем чи породою) зменшиться до u_x , матиме вигляд:

$$f_o(t) = (u_{on} / u_x) \cdot (1 + \Delta l_x / d_o \cdot C), \quad (2)$$

де Δl_x – частина каналу, вироблена за час, що дорівнює Δt_x .

Нами запропоновано [3, 4, 5] залежність функції часу розвитку каналу невеликою затопленою струминою за тиску, більшому за критичний

$$f_o(t) = \Delta t_x / (6,5 + \Delta t_x). \quad (3)$$

Прирівнявши вирази (6) і (7) і розв'язавши їх відносно часу різання знайдемо величину Δt , потрібну для вироблення частини каналу Δl_x

крізь матеріал із заданою величиною початкової швидкості різання

$$\Delta t_x = 6,5 \cdot W_x / (1 - W_x), \quad (4)$$

де

$$W_x = (u_{0n} / u_x) \cdot (1 + \Delta l_x / d_o \cdot C). \quad (5)$$

Розрахунки за формулою (4) справедливі за умови $W_x > 1$, в іншому випадку відрізок часу $\Delta t < 0$, що свідчить про зупинку розвитку каналу по довжині, тоді як розширення поперечного перерізу може продовжуватися.

Для визначення зміни осьової швидкості струменя по довжині каналу використаємо результати досліджень ГПП для визначення коефіцієнта структури затопленого струменя води з піском – a_{cm} . Коефіцієнт структури струменя визначається як тангенс кута розширення його зовнішньої границі. Автором [5] побудовано графік залежності a_{cm} від числа Рейнольдса (Re_{cm}), визначеного під час руху води з додаванням 42 кг/м^3 піску в порожнині гідропіскоструминного апарату (ГПА), за яким нами знайдено такий зв'язок

$$a_{cm} = 0,05 + 0,003 \cdot 10^{-4} \cdot Re_{cm}. \quad (6)$$

Для розрахунку безрозмірної осьової швидкості затопленого струменя в залежності від коефіцієнта якості струменя і безрозмірної віддалі від насадки використаємо емпіричну формулу, запропоновану Є. Б. Соловкіним [6]:

$$u_x / u_0 = 0,35 / (a_{cm} \cdot l_x / d_o)^{0,67}, \quad (7)$$

де u_x – швидкість струменя за насадкою, на основній ділянці струменя.

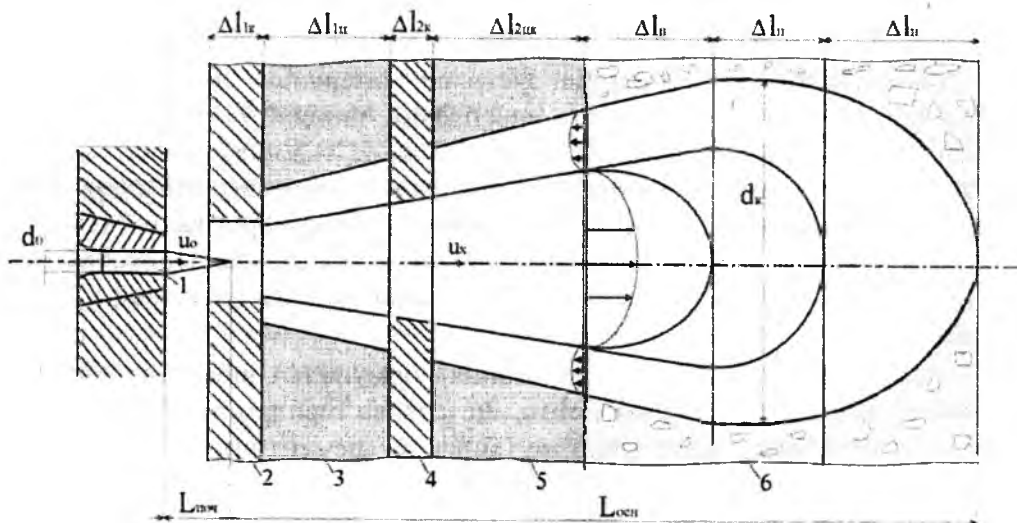


Рис. 1. Схема різання каналу ГПП через дві колони (на прикладі свердловини 1-Любіннянська)

1 – насадка, 2 – перша колона, 3 – перше цементне кільце, 4 – друга колона, 5 – друге цементне кільце, 6 – порода пласта

Тож, узагальнюючи викладене, рекомендуємо таку методику розрахунку часу різання перегородок на різній віддалі від насадок, для проектування довжини каналу ГПП через декілька колон, як описано на прикладі проектування двох колон у свердловині 1-Любіннянська (рис. 1):

– побудувати схему поперечного перерізу свердловини в зоні перфорації, вказавши на ній безрозмірні (як відношення $\Delta l_x / d_o$) розміри колон і цементних кілець навколо них, а далі – ділянки породи пласта. Вибрати ГПА, вказавши зовнішній і внутрішній діаметри поперечного перерізу його корпусу;

– побудувати розрахункову табл. 1, вказавши на ній розміри колон і цементних кілець навколо них (лінійні і безрозмірні), а далі – задані ділянки породи пласта довжиною Δl_x ;

– вибрати рідину із заданою густиною і в'язкістю та кварцовий пісок, вказавши його фракційний склад, густину і концентрацію в рідині;

– задати або визначити з урахуванням умов перфорації значення

u_{0n} , u_0 , C , d_o ;

– розрахувати число Рейнольдса в порожнині ГПА (за методикою Ю. В. Желтова [3, 4]);

– розрахувати a_{cm} за формулою (6), відношення u_x / u_0 за формулою (7), за яким визначити значення u_x при відомому u_0 ;

– розрахувати W_x за формулою (5) і час Δt_x різання чергової перегородки Δl_x за формулою (4);

– після перерізання всіх перегородок (колон і цементних кілець) розрахувати поступове заглиблення каналів у породу, нарощуючи довжину каналу ділянками Δl_x в пласті;

– знайти суми Δl_x і Δt_x , які відповідають збільшенню глибини каналу зі зростанням часу різання і вибрати їх величини як проектні для плану робіт.

Описана схема розрахунку прийнята і для більшої кількості колон та породою різної міцності на стиск. Застосування запропонованої методики розрахунку вироблення каналу перевірено на прикладі ГПП свердловини 1-Любіннянська.

За описаною методикою проведено розрахунок режимів ГПП. Різання каналів проводиться через ГПА з внутрішнім діаметром 160 мм і зовнішнім – 200 мм, оснащеним двома насадками діаметром 6,0 мм, спрямованими в протилежні боки. ГПП проводиться водою густиною 1000 кг/м^3 , з додаванням 0,1 % КМЦ за концентрації піску 40 кг/м^3 , тому густина такої суміші – 1030 кг/м^3 . Початкова швидкість різання металу труб $u_{0n} = 25 \text{ м/с}$, цементу і пісковиків $u_{0n} = 7,5 \text{ м/с}$ при $\sigma_{cr} = 50 \text{ МПа}$, перепад тиску на насадках $\Delta P = 27,5 \text{ МПа}$, початкова швидкість струмнини на виході з насадки $u_0 = 202 \text{ м/с}$, витрата рідини $q_p = 0,0114 \text{ м}^3/\text{с}$; $C = 1,5$ для незаякореного ГПА. Число Рейнольдса під час руху рідини з піском $Re = 6,2 \cdot 10^4$, для якого $a_{cm} = 0,07$.

Зауважимо, що під час розрахунку u_x / u_0 за формулою (7) на основній ділянці струменя замість l_x прийнято $l_x + \frac{1}{2} \Delta l_x$ для визначення середньої швидкості струменя в матеріалі перегородки товщиною Δl_x .

Далі розраховано збільшення довжини каналу, для чого визначено W_x , час різання Δt_x чергової перегородки Δl_x (колони, цементного кільця, породи).

Результати розрахунків, проведених згідно з описаною методикою, наведено в табл. 1, згідно з якими для прийнятих параметрів за 55 хв різання довжина каналу у двоколонній конструкції свердловини становить 175 мм.

Цікаво, що розрахована за пропонуваною методикою і для тих самих умов різання довжина каналу в свердловині з одноколонною конструкцією становить 195 мм за 60 хв різання, а за формулою (1) за 60 хв – 207 мм. Виявлені різниці розрахунків довжини каналу пояснюються наявністю іншої колони (з більшою опірністю різанню), а також врахуванням властивостей матеріалів всіх перегородок за пропонуваною методикою. Різниці розрахунків будуть зростати за наявності більших відмінностей між властивостями металу, породи і цементу.

Табл. 1. Розрахунок вироблення каналу через дві колони

Об'єкт (тип перегородки)	Розмір перегородки		Відношення u_x / u_0	Осьова швидкість u_x , м/с	W_x	Час різання, Δt_x , хв	Повна довж. каналу, мм	Перфорований матеріал
	Δl , мм	$\Delta l / d_0^*$						
–	10	2	1	202	0	0	0	Відстань між ГПА і колоною
Перша колона	12	2	0,91	184	0,32	3,2	12	Метал 12мм
Перший цемент	27	5; 2+5/2=4,5	0,76	154	0,25	1,6	39	Цемент 27мм
Друга колона	11	2; 7+1=8	0,51	103	0,62	10	50	Метал 11 мм
Другий цемент	35	6; 9+3=12	0,39	79	0,49	7	85	Цемент 35 мм
Всього	85	15				22	85	
1 ділянка породи	30	5; 15+2,5=17,5	0,30 6	62	0,52	7	30	Порода 30 мм
Всього		20				29**	115	
2 ділянка породи	30	5; 20+2,5=22,5	0,26	52	0,63	11	30	Порода 30 мм
Всього		25				40	145	
3 ділянка породи	30	5; 25+2,5=27,5	0,22 6	46	0,70	15	30	Порода 30 мм
Всього		30				55	175	
4 ділянка породи	30	5; 30+2,5=32,5	0,20 2	40	0,81	28	30	Порода 30 мм
Всього		35				83	205	

Примітка. *) Цифра перша – розмір перегородки, друга – віддаль до середини перегородки від початку каналу у безрозмірному вигляді;

***) час різання, достатній для вибраної довжини каналу.

Аналізуючи дані таблиці 1 вибрано режими ГПП через дві колони 245 x 324 мм. На глибині 885 м прорізано чотири канали в двох положеннях перфоратора, протягом 30 хв при $\Delta P = 28$ МПа і 30 хв $\Delta P = 30$ МПа для переміщення насадок вниз на 2,0-2,2 см внаслідок видовження НКТ, щоб зменшити опори зворотного потоку струменя з каналу щоб сприяти зростанню довжини каналу приблизно на 30%.

Після промивання свердловини випробували на приймальність водою з витратою 0,2-0,3 м³/хв за тиску на усті 14 МПа. Коефіцієнт приймальності становив 20-30 м³/(д·МПа). Під час ГПП відібрано проби уламків цементу і світло-сірих пісковиків, темно-сірих і чорних уламків аргілітів, що виносилися зі свердловини – приблизно по одній літрі шламу після кожного різання.

Установлено цементний міст із 5,2 м³ цементного розчину, з якого 2,2 м³ запомповано в за колонний простір. Міст розбурено до 865 м і обпресовано тиском 15 МПа.

Для відновлення зв'язку з вигодським пластом 06.11.2008 р. проведено сім різань ГПП в інтервалі 850,5-844,5 м при $\Delta P=28-32$ МПа (на усті 30–35 МПа). Після промивання свердловини випробували на приймальність, яка становила 0,4 м³/хв за тиску на усті 12 МПа. Коефіцієнт приймальності вигодських відкладів дорівнює 48 м³/(д·МПа), що значно більше ніж у непродуктивній зоні. Отже, зв'язок з пластом через дві колони та за колонним простором встановлено, тому вважаємо це підтвердженням наявності каналу, виробленого через дві обсадні колони, з розрахованою довжиною 115-145 мм, в тому числі у пласті – 30-60 мм.

Таким чином, вперше вирішено задачу розрахунку довжини каналів ГПП через дві колони, достовірність розв'язків перевірено на практиці, тому розроблену методику рекомендовано для застосування.

Література

1. Фалькович С.В. О механизме вскрытия пластов абразивной гидроспектоструйной перфорации / С.В Фалькович, Г.П. Севастьянов, Л. В. Акатов // Промысловая геоло-гия: Тр.НВНИИГГ. – Саратов: Изво Саратов.университета, 1969. – Вып.12. – С. 213-230.
2. Качмар Ю.Д. Повышение качества проектирования гидроспектоструйной перфорации / Ю.Д. Качмар // Нефтяное хозяйство.– 1982. – №10. – С. 39-40.
3. Яремійчук Р.С. Освоєння свердловин / Р.С. Яремійчук, Ю.Д. Качмар. – Львів: Світ, 1997.– 256 с.
4. Інтенсифікація припливу вуглеводнів у свердловину. В 2-х кн. / Ю.Д. Качмар, В.М. Світлицький, Б.Б. Синюк, Р.С. Яремійчук. В 2-х кн. – Львів: Центр-Європи, 2004. – Кн.1. – 351 с.
5. Соловкін Е.Б. О динамике затопленной осесимметричной струи жидкости, несущей абразивный материал / Е.Б. Соловкін // Науч.-техн. сборник по добыче нефти. – М.: Недра, 1967. – Вып. 31. – С. 115-120.

Стаття поступила в редакційну колегію 02.07.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Яремійчуком Р.С.

TECHNIQUE OF DESIGN HYDRO-SAND-STREAM PERFORATION THROUGH SEVERAL COLUMNS

Yu. D. Kachmar

Scientific-research and design institute of JSC "Ukrnafta";

Ivano-Frankivsk, Pivdenny bulvar Pushkina, 2;

tel/fax +380 (342) 77 61 40, 77 61 49; e-mail: grp@ndpi.ukrnafta.com

The problem of calculating of length channel which produced by jet fluid with sand in formation through several cemented columns is decided. Columns, cement rings and formation rock considered as consistently placed partitions of given thickness with their initial velocity of material destruction. Middle axial velocity of jet in each partition defined with due regard for distance from the nozzle and thickness. An example of calculating the parameters of carrying perforation of well are described.

Key words: *hydro-sand-stream perforation, well, column.*

УДК 622.692.4

ДОСЛІДЖЕННЯ РИЗИКІВ НЕБЕЗПЕКИ ПІД ЧАС ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАГІСТРАЛЬНИХ НАФТОПРОВІДІВ

М. П. Возняк, Л. В. Возняк, Г. М. Кривенко

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;

76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;

тел. +380 (3422) 4-00-98; e-mail: gidro@nung.edu.ua

Розроблено схему дослідження трубопроводів для прогнозування ризиків. Характер розподілу тисків вздовж нафтопроводу дає змогу прогнозувати об'єм витікання нафти з дефектного отвору у випадку виникнення аварійної ситуації. Розроблено комп'ютерну технологію моделювання процесу витікання нафти. Наведено методику визначення ризиків небезпеки.

Ключові слова: *нафтопровід, прогнозування, ризик, тиск, моделювання.*

Територія України пронизана мережею нафтопроводів, які експлуатуються вже декілька десятків років, тому мають значну кількість корозійних пошкоджень та тріщин, що суттєво знижує їх екологічну безпеку.

Так, у випадку витікання нафти із пошкоджених трубопроводів відбувається взаємодія її з ґрунтово-рослинним шаром, гідросферою та атмосферою. Негативна дія на ґрунтово-рослинний шар зводиться до зниження біологічної продуктивності ґрунтів та пригнічення рослинного покриву.

Внаслідок просочування та фільтрації крізь ґрунти пафта і нафтопродукти можуть проникати у ґрунтові води, де через конвективне перенесення розповсюджуються на значні відстані, змінюючи якість останніх.

Забруднення атмосфери під час аварій на нафтопроводах відбувається внаслідок випаровування летких фракцій нафти, самовільного її займання. Найбільш небезпечними є окис вуглецю, метан, етан, пропан тощо.

Виходячи зі сказаного впливає, що дослідження ризиків небезпеки під час експлуатації нафтопроводу є актуальним і допоможе проводити відповідні заходи щодо запобігання забрудненню довкілля.

З цією метою розроблено схему дослідження трубопроводів для прогнозування ризиків, яка чітко вказує на необхідність розгляду технічного та екологічного ризиків у їх взаємозв'язку [1].

Оскільки головним чинником у ході експлуатації є перепад тиску в трубопроводі, шляхом коригування режимів роботи можливо забезпечити надійність даної системи.

На величину екологічного ризику впливає прогнозована кількість нафти, яка може витекти з дефектного отвору, і площа забрудненої території.

Для дослідження трубопроводів з метою прогнозування ризиків необхідно мати характеристику стану як внутрішньої, так і зовнішньої поверхні нафтопроводу. Сучасні методи діагностування поверхні трубопроводів за допомогою інтелектуальних поршнів дають змогу з високою точністю визначити місце розташування дефектів у тілі труби та їх розміри, що потрібно знати в процесі прогнозування можливих витікань нафти під час розриву труби в дефектних місцях та моделюванні ореолу розтікання. Тому вихідною ланкою для проведення дослідження є дані внутрішньотрубного діагностування, одержані за допомогою інтелектуальних поршнів. Статистичне оброблення результатів діагностування дає можливість визначити найбільш небезпечні дефекти, що можуть призвести до аварійної ситуації.

Для визначення прогнозованої витрати з дефектного отвору необхідно знати характер розподілу тиску вздовж трубопроводу. Також потрібно враховувати, що в процесі заміщення легкої нафти важчою, в яких суттєво відрізняються густини, виникає стрибкоподібна зміна тиску, що є причиною виникнення аварійних ситуацій на початковій ділянці трубопроводу. Це вимагає спрощення аналітичної реалізації задачі, що пов'язана з стрибкоподібною зміною тиску в трубопроводі у процесі експлуатації [2]. Отже, за характером розподілу тисків вздовж трубопроводу з урахуванням його стрибкоподібної зміни можна знайти тиск над прогнозованим дефектним отвором для визначення кількості нафти, що може витекти. Проте для повного дослідження розглядати нафтопровід без прив'язки до місцевості, де він прокладений, недостатньо.

Для цього використана геоінформаційна система (ГІС), що дозволяє на принципово новому рівні розв'язувати задачі з моделювання наслідків аварійних розливів нафти і ранжувати ділянки магістральних трубопроводів за екологічним ризиком для розроблення планів проведення ремонтних робіт та обслуговування трубопроводів. Оскільки велика частина інформації, що потрібна для управління процесом транспортування нафти, характеризує географію розташування об'єктів, то використання ГІС дасть змогу розв'язати різноманітні виробничі проблеми. Отже, геоінформаційне моделювання є методологічною основою прогнозування екологічних та соціальних наслідків аварій на магістральних нафтопроводах.

Комп'ютерна технологія, що створена у вигляді програмного продукту Vityk для Windows, дає змогу моделювати траєкторію витікання нафти з дефектного отвору, прогнозувати величину площі забруднення території та її конфігурацію в залежності від рельєфу місцевості (рис. 1) [3]. Слід зауважити, що комп'ютерна технологія дозволяє слідкувати за заповненням улоговин під час розливання нафти (рис. 2).

За результатами комп'ютерного моделювання можна спрогнозувати екологічний ризик і провести необхідні заходи щодо зменшення не-

безпеки для довкілля в результаті витікання нафти через виникнення аварійної ситуації.

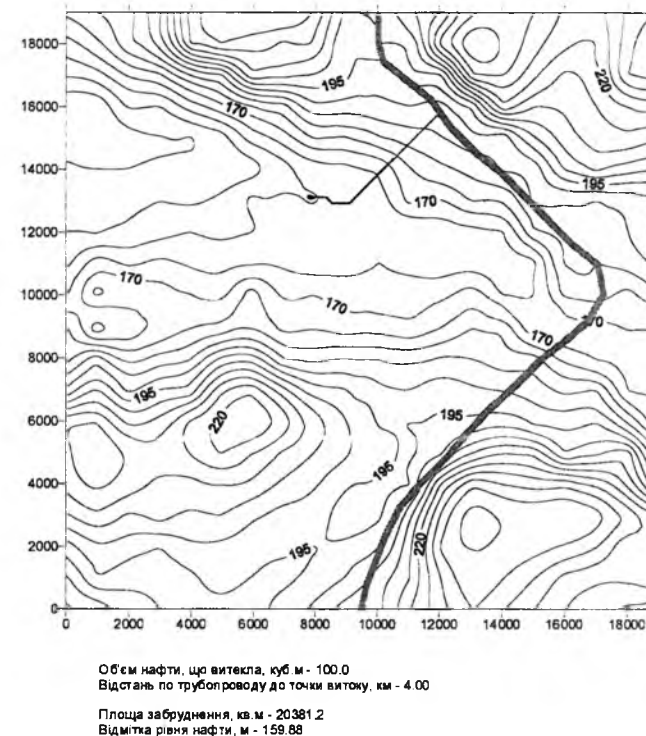


Рис. 1. Результат комп'ютерного моделювання витіку нафти з трубопроводу та прогнозування забруднення території

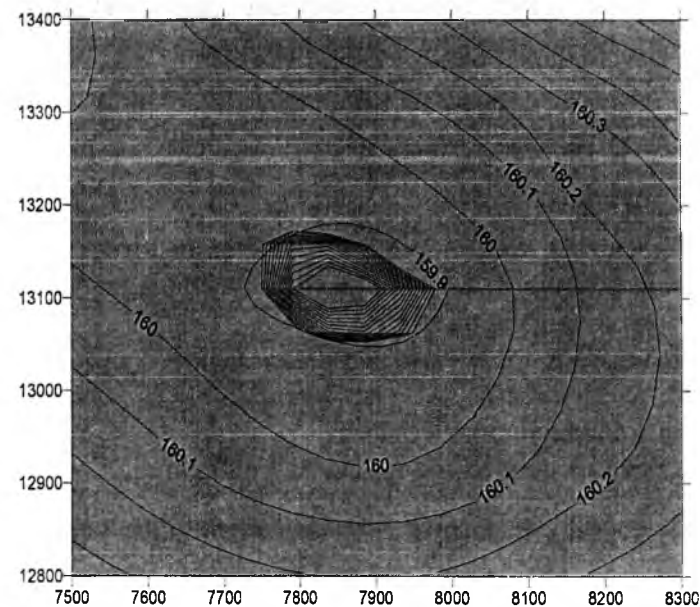


Рис. 2. Заповнення улоговин при розтіканні нафти

Величина екологічного ризику у ході експлуатації магістральних нафтопроводів залежить від ймовірності виникнення аварії (ймовірність

події A) на відрізку трубопроводу довжиною Δl протягом деякого часу (наприклад, протягом року) та від ймовірності нанесення екологічних збитків (подія D – наявність негативного впливу на навколишнє середовище) [4].

Оскільки ці події є залежними, то

$$R_{ек} = P(A) \cdot P_A(D), \quad (1)$$

де $P(A)$ – ймовірність виникнення аварії;

$P_A(D)$ – ймовірність появи екологічних збитків за умови, що аварія відбулася.

Величина екологічних збитків, у свою чергу, залежить від того, який об'єм нафти потрапляє в довкілля (подія B), та яка площа при цьому забруднюється (подія C), тому

$$P_A(D) = P_A(B) \cdot P_{AB}(C), \quad (2)$$

де $P_A(B)$ – ймовірність витікань за умови, що подія A відбулася;

$P_{AB}(C)$ – ймовірність забруднення території за умови, що події A і B відбулися.

Отже,

$$R_{ек} = P(A) \cdot P_A(B) \cdot P_{AB}(C). \quad (3)$$

Оскільки кількісна оцінка рівня екологічного ризику (або абсолютне значення екологічного ризику) не дає вирішення питання про його прийнятність чи неприйнятність, то вводиться поняття відносного екологічного ризику $R_{ек.в}$, який уможливорює порівняння реального значення ризику $R_{ек.дійсне}$ з його максимально допустимим значенням $R_{ек.дон}$ (при цьому для розрахунків береться середня частота відмов на магістральних нафтопроводах, щоб не нівелювався вплив екологічних показників):

$$R_{ек.в} = \frac{R_{ек.дійсне}}{R_{ек.макс.дон}} = \frac{\lambda}{\lambda_{сер}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{макс}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{макс}} \cdot n, \quad (4)$$

де λ – частота відмов, $1/(\text{рік} \cdot \text{км})$;

$\lambda_{сер}$ – середня частота відмов на магістральних нафтопроводах;

n – кількість дефектів у тілі труби (за результатами діагностування);

Q_i – прогнозоване витікання нафти;

$Q_{макс}$ – максимальний допустиме витікання нафти;

S_i – площа забруднення під час витікання Q_i , визначена у ході комп'ютерного моделювання витікань;

$S_{макс}$ – максимальна допустима площа забруднення;

$\sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_{макс}} \cdot n$ – ступінь навантаження на навколишнє середовище, (ви-

значений шляхом порівняння значення прогнозованого витікання нафти з максимальним прийнятним витіканням), який згідно з [5] становить 1300 м^3 ;

$\sum_{i=1}^n \frac{S_i}{S_{макс}} \cdot n$ – ступінь навантаження на навколишнє середовище, (ви-

значений шляхом порівняння прогнозованої площі забруднення зі значенням прийнятної площі забруднення) – 5 га [5].

Результати розрахунків за формулою (4) свідчать, що екологічний ризик для ділянки трубопроводу складає $R_{ек.в} = 0,041$.

Якщо максимальний відносний екологічний ризик прийняти $R_{ек(max).в} = 1$, то досліджувану ділянку трубопроводу можна віднести до сприятливої в екологічному відношенні.

Аналогічні міркування були проведені для визначення відносного технічного ризику у ході експлуатації трубопроводу, що оцінюється за такою залежністю

$$R_{Т.В} = \frac{\lambda}{\lambda_{сер}} \cdot \sum_{i=1}^n \frac{P_{експ.i}}{P_{n,i}} \cdot n, \quad (5)$$

де $p_{експ}$ – експлуатаційний тиск;

p_n – значення пониженого тиску з урахуванням втрат металу.

Значення пониженого тиску обчислювалося за методикою, що використовується фірмою Pipetronix згідно американського стандарту ASME B31G.

Для ділянки трубопроводу $R_{Т.В} = 0,235$. На початку трубопроводу значення технічного ризику буде більшим.

Отже, прогнозна оцінка відносного екологічного та технічного ризиків дає змогу порівняти реальне значення ризику з його максимально допустимим.

Розроблена система прогнозування ризиків дає змогу ранжувати заходи за їх пріоритетами, підвищенню екологічної безпеки у ході експлуатації магістральних нафтопроводів.

Література

1. Вплив чинників на технічний ризик у ході експлуатації нафтопроводів / Г.М. Кривенко, Я.М. Семчук, М.П. Возняк, Л.В. Возняк // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. – 2008. – 4(29). – С. 108-111.
2. Кривенко Г.М. Прогнозування технічних ризиків з'єднаних трубопроводів підземних сховищ / Г.М. Кривенко // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2004. – 2(8). – С. 190-191.
3. Кривенко Г.М. Комп'ютерне моделювання розтікання нафти та зони забруднення / Г.М. Кривенко // Науковий вісник Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2005. – 2(11). – С. 82-85.
4. Енергоекологічна безпека нафтогазових об'єктів / [Р.М. Говдяк, Я.М. Семчук, Л.Б. Чабанович та ін.]. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2007. – 556 с.

5. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Міністерство праці і соціальної політики. № 637 від 4.12.2002 р. – 29 с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 21.09.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Середюк М.Д.*

THE INVESTIGATION OF DANGER RISK BY OPERATE THE MAIN OIL PIPELINE

M. P. Vozniak, L. V. Vozniak, Kryvenko G. M.

*Ivano-Frnkivs'k National Technical University of Oil and Gas;
Carpats'ka street, 15, Ivano-Frnkivs'k, 76019, Ukraine;
ph. +380 (3422) 4 00 98; e-mail: gidro@nung.edu.ua*

The diagram of investigation pipeline for forecast the risk is given.

The distribution of pressure across the length of the pipeline gives the forecast volume rate of oil.

Computers model the flow of oil through the orifices gives the direction and covered of oil area.

Calculate of danger risk is given.

Key words: *oil pipeline, forecast, risk, pressure, model.*

УДК 622.691.4.004.67

ОСНОВИ РОЗРОБКИ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ РЕЖИМУ РОБОТИ СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ

Д. Ф. Тимків, Р. Г. Онацко, О. Т. Михалевич

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (422) 4-93-58; e-mail: public@ifdtung.if.ua*

Побудовано модель газотранспортної системи, призначеної для аналізу газових потоків та керування процесом транспортування газу.

Ключові слова: *газотранспортна система, режим роботи, компресорна станція, газорозподільна станція, підземне сховище газу.*

Україна володіє великою і складною газотранспортною системою, від ефективної роботи якої залежить економіка всієї країни. Вміння оцінювати неефективні режими транспортування газу, оптимізувати його потоки – основа наукової концепції ефективного використання систем газопостачання. Можливість оптимізації режимів роботи ГТС пояснюється багатовартісністю системи, задані режими роботи якої можуть забезпечуватися численними варіантами роботи газопроводу.

Газотранспортна система, здебільшого, має складну геометричну структуру: наявність кількох ниток, з'єднаних перемичками, лупінгів, численні прості та складні за структурою відгалуження до споживачів тощо. Енергетичними об'єктами є компресорні станції (КС), до складу яких входять цехи з різними типами ГПА. Внаслідок реконструкції системи у 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 існує велика кількість варіантів роботи і широке коло можливостей для оптимізації самої системи.

Окрім того, різке збільшення чи зменшення забору газу призводить до неусталеності його течії трубопроводом. До аналогічних наслідків призводить і зменшення чи збільшення об'єму підкачування 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.

Щоб побудувати модель ГТС, призначену для аналізу газових потоків та керування процесом транспортування газу, необхідно побудувати її топологічну та геометричну моделі, сформулювати рівняння, що

описують рух газу через кожен елемент ГТС, встановити моделі механічної та теплової взаємодії газу з кожним таким елементом, встановити умови спряження параметрів термодинамічного стану та руху газу, на межах сусідніх елементів. У рамках такої моделі можна формулювати ті чи інші задачі аналізу газових потоків у ГТС чи оптимального керування її роботою, а відтак, використовуючи відповідні методи розв'язування таких задач, здійснювати їх числову реалізацію.

ГТС складається великої кількості елементів декількох різномірних типів, з'єднаних між собою. Для опису з'єднань ГТС кожен такий елемент, крім підземних сховищ газу, можна розглядати з топологічної точки зору як відрізок прямої, що своїми кінцями (обом чи лише одним) з'єднаний із кінцями деякої множини інших відрізків, котрі репрезентують інші елементи цієї ГТС. Таким чином, отримуємо топологічну модель ГТС, яка має вигляд графа (рис.2). Розрізнятимемо ребра графа двох типів: внутрішнє ребро, кожен кінець якого з'єднаний принаймні з одним кінцем іншого елемента, і кінцеве (термінальне) ребро, під'єднане до графа лише одним кінцем. Серед термінальних вирізнятимемо орієнтовані ребра: вхідні, які відповідають входам ГТС, та вихідні, що відповідають її виходам, а також глухі ребра. Такі глухі ребра необхідно враховувати в математичній моделі, оскільки, хоч газ через них і не перетікає, вони виконують акумулюючі функції, і тому опосередковано впливають на газові потоки в ГТС.

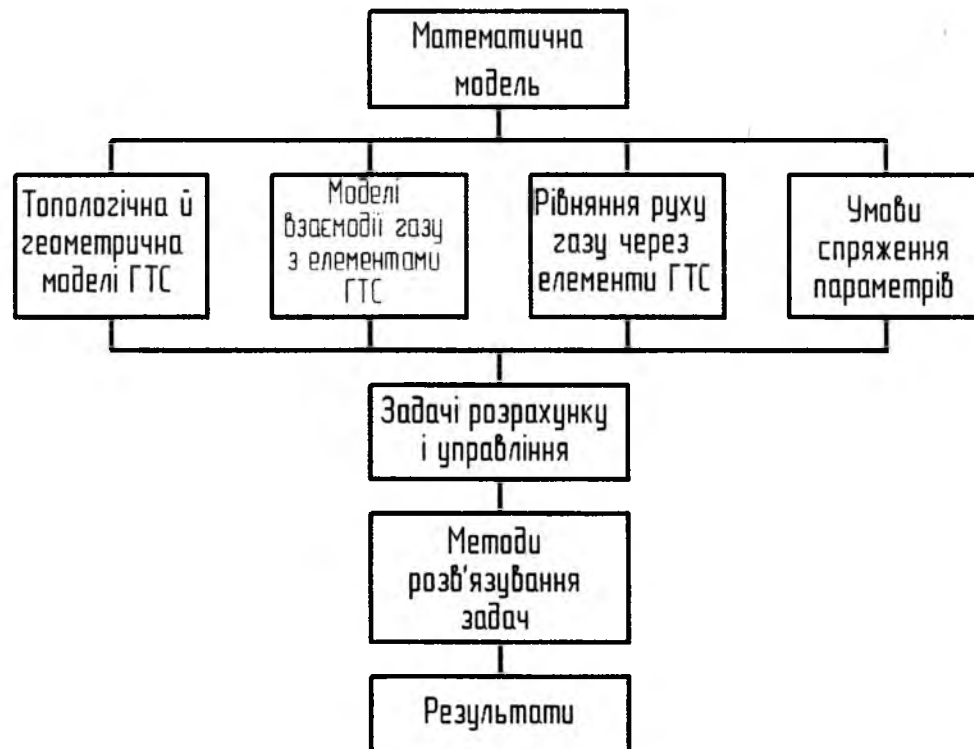


Рис. 1. Структура моделі ГТС

Аналізуючи роботу споруд ГТС доходимо до можливості класифікації їх з точки зору врахування в математичній моделі геометричних розмірів цих об'єктів. Для цього введемо поняття часу τ проходження газу через об'єкт ГТС. Нехай w – характерна швидкість руху газу в межах деякого об'єкта, а l – його характерний розмір у напрямку руху газу. Тоді характерний час проходження газу через цей об'єкт визначиться як

$$\tau = l/w. \quad (1)$$

Тож, очевидно, що вивчаючи поведінку ГТС на проміжках часу Δt , можна не брати до уваги в математичній моделі скінченність розмірів тих об'єктів, для яких виконується умова

$$\tau \ll \Delta t. \quad (2)$$

Із огляду на це поділятимемо математичні моделі об'єктів, що входять до складу ГТС, на три типи:

- 1 тип: об'єкти зі зосередженими параметрами;
- 2 тип: одновимірні об'єкти з розподіленими параметрами;
- 3 тип: дво- та тривимірні об'єкти з розподіленими параметрами.

У задачах моделювання процесу транспортування газу, керування газотранспортною мережею та оптимізації режимів її роботи до об'єктів зі зосередженими параметрами будемо відносити компресорні станції, газорозподільні станції, перемички, запірну арматуру, вузли редукування тиску. До одновимірних об'єктів із розподіленими параметрами в таких задачах відноситимемо магістральні трубопроводи та переходи. Підземні сховища газу слід розглядати як тривимірні або двовимірні об'єкти з розподіленими параметрами.

Таким чином, топологічну модель ГТС можна представити у вигляді дискретно-континуальної системи, що схематично складається з графа і кількох три- чи двовимірних областей простору (рис.2). Ребра цього графа являють собою одновимірні об'єкти з розподіленими параметрами (магістральні трубопроводи та переходи), а вузли – об'єкти зі зосередженими параметрами (розгалуження, компресорні станції, об'єкти запірної арматури, редуктори тощо). Тривимірні та двовимірні області репрезентують у цій моделі підземні сховища газу, вони пов'язані з графом ГТС відповідними ребрами.

Рух газу в ГТС відбувається згідно із фізичними законами, котрі виражають збереження маси, імпульсу та енергії, а також законами термодинаміки, що описують термодинамічні властивості газової суміші, якою є природний газ.

Беручи до уваги, що до складу ГТС входять елементи, в яких відбувається одно- дво- та тривимірний рух транспортованого газу, запишемо систему рівнянь газової динаміки спочатку для загального тривимірного випадку. Основу цієї системи складають балансові рівняння, котрі виражають закони збереження речовини, імпульсу та енергії.

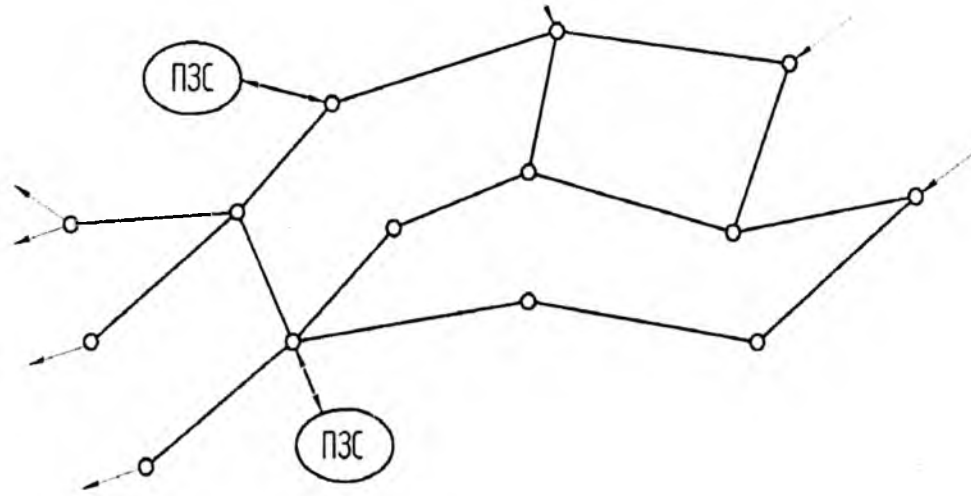


Рис. 2. Топологічна модель ГТС

Рівняння балансу маси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot V_i) = 0, \quad (3)$$

де t – час, x_i – декартові координати ($i = 1, 2, 3$), V_i – компоненти локальної швидкості руху газу, ρ – густина газу.

Рівняння балансу імпульсу

$$\frac{\partial \rho \cdot V_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot V_i \cdot V_j + p \cdot \delta_{ij}) = -\rho \cdot F_i^{\text{тр}} - \rho \cdot g \frac{\partial h}{\partial x_i}, \quad (4)$$

де p – тиск газу, δ_{ij} – дельта Кронеккера, $\delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$, $F_i^{\text{тр}}$ – декар-

тові компоненти сили тертя, розраховані на одиницю маси газу, g – прискорення вільного падіння, h – висота точки над рівнем моря.

Термодинамічні властивості газу c_v , c_p , k_p є функціями параметрів стану за сталого складу газової суміші. Це співвідношення виду:

$$c_v = f_{c_v}(T, \rho), \quad c_p = f_{c_p}(T, \rho), \quad k_p = f_{k_p}(T, \rho). \quad (5)$$

Функції $f_{c_v}(T, \rho)$, $f_{c_p}(T, \rho)$ та $f_{k_p}(T, \rho)$ для реальних газів можна визначати експериментально застосовуючи відомі методики.

На підставі цих співвідношень можемо записати вираз для повного диференціалу внутрішньої енергії як функції змінних T і ρ :

$$du = c_v \cdot dT + \left(\frac{c_p - c_v}{k_p} + \frac{p}{\rho^2} \right) d\rho. \quad (6)$$

Виходячи із відомих співвідношень отримуємо наступне рівняння теплопровідності для газу

$$\rho \cdot c_v \frac{dT}{dt} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) = - \left(\frac{c_p - c_v}{k_p} \right) \rho \frac{d\rho}{dt} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{тр}} + Q^{\text{зовн}}, \quad (7)$$

де Q – приплив ($Q > 0$) або відтік ($Q < 0$) тепла в об'ємі, обумовлений теплообміном газу з об'єктами ГТС та доквіллям, наприклад, крізь стінки труби або з пористим середовищем у ПСГ.

Використовуючи оператор субстанціональної похідної за часом рівнянню (5) надаємо вигляду

$$\rho \cdot c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_v \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left(\frac{c_p - c_v}{k_p} \right) \cdot \rho \left(\frac{\partial \rho}{\partial t} + V_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right) + \rho V_i F_i^{\text{тр}} + Q^{\text{зовн}}. \quad (8)$$

Беручи до уваги рівняння нерозривності (3), рівнянню теплопровідності (8) можна надати вигляду

$$\rho \cdot c_v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_v \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left(\frac{c_p - c_v}{k_p} \right) \cdot \rho^2 \frac{\partial V_i}{\partial x_i} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{тр}} + Q^{\text{зовн}}. \quad (9)$$

При заданих функціях $f_p(T, \rho)$, $f_\kappa(T, \rho)$, $f_{c_v}(T, \rho)$, $f_{c_p}(T, \rho)$ та $f_{k_p}(T, \rho)$ диференціальні рівняння в частинних похідних (3), (4), (9) утворюють ключову систему рівнянь для опису процесів перенесення маси, імпульсу та енергії в транспортованому через ГТС газі. Для формулювання задач розрахунку та оптимізації транспортування газу та оптимального керування роботою ГТС до рівнянь (3), (4), (9) слід додати початкові та граничні умови, а також інші умови, що визначають взаємодію транспортованого газу зі спорудами ГТС та доквіллям. Необхідно також виразити через параметри стану та руху газу силу тертя $F_i^{\text{тр}}$ і параметр $Q^{\text{зовн}}$, котрий визначає теплообмін транспортованого газу з доквіллям.

Наведені рівняння газової динаміки, які описують перенесення маси, імпульсу та енергії в газотранспортній мережі, пов'язують параметри термодинамічного стану і руху газу. Параметрами термодинамічного стану є: густина ρ [кг/м³], тиск p [Н/м²], температура T [К], питома ентропія s [Дж/кгК], масові концентрації компонент газової суміші ξ_1, \dots, ξ_n та їх хімічні потенціали μ_1, \dots, μ_n [Дж/кг]. Окрім того важливими параметрами є термодинамічні потенціали газу: питома внутрішня енергія u [Дж/кг], вільна енергія $f = u - Ts$ [Дж/кг], ентальпія $i = u + p\rho^{-1}$ [Дж/кг]. Тиск p і питомий об'єм $v = \rho^{-1}$, температура T

і питома ентропія s , хімічні потенціали μ_1, \dots, μ_n та відповідні їм масові концентрації компонент газовой суміші μ_1, \dots, μ_n утворюють пари спряжених термодинамічних параметрів стану газовой суміші. Якщо відомі функції (10), (11), (12)

$$u = u(s, v, \xi_1, \dots, \xi_n), \quad (10)$$

$$f = f(T, v, \xi_1, \dots, \xi_n), \quad (11)$$

$$u = u(s, v), \quad f = f(T, v), \quad (12)$$

які виражають термодинамічні потенціали через відповідні параметри стану, то за допомогою рівнянь (13), (14), (15), (16)

$$T = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_{v, \{\xi_i\}}, \quad p = - \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_{s, \{\xi_i\}} = \rho^2 \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_{s, \{\xi_i\}}, \quad \mu_i = \left(\frac{\partial u}{\partial \xi_i} \right)_{s, v, \{\xi_i\}}, \quad (13)$$

$$s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_{v, \{\xi_i\}}, \quad p = - \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_{T, \{\xi_i\}} = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_{T, \{\xi_i\}}, \quad \mu_i = \left(\frac{\partial f}{\partial \xi_i} \right)_{T, v, \{\xi_i\}}, \quad (14)$$

$$T = \left(\frac{\partial u}{\partial s} \right)_v, \quad p = - \left(\frac{\partial u}{\partial v} \right)_s = \rho^2 \left(\frac{\partial u}{\partial \rho} \right)_s, \quad (15)$$

$$s = - \left(\frac{\partial f}{\partial T} \right)_v, \quad p = - \left(\frac{\partial f}{\partial v} \right)_T = \rho^2 \left(\frac{\partial f}{\partial \rho} \right)_T \quad (16)$$

можна виразити половину параметрів стану через спряжені їм параметри, вибрані як незалежні. Ключова система рівнянь (3), (4), (9) залежить від термодинамічних параметрів стану – густин ρ , тиску p , температури T та масових концентрацій компонент газовой суміші ξ_1, \dots, ξ_n . Зокрема, якщо під час транспортування склад газовой суміші не змінюється, то таких параметрів є три, а в якості незалежних параметрів стану можна вибрати одну із двох пар – густину ρ та температуру T або ж тиск p та температуру T . Тоді третій параметр (у першому випадку – це тиск, а другому – густина) слід виразити у цих рівняннях через інші два за допомогою рівняння стану

$$s = s(T, v), \quad p = p(T, v). \quad (17)$$

Рух газу в ГТС можна визначати компонентами вектора швидкості V_i або компонентами потоку маси $J_i = \rho \cdot V_i$. Для опису руху газу в трубопроводах часто використовують також пов'язані з цими параметрами технічні величини – масову витрату M [кг/с] та комерційну витрату q [м³/доб].

Таким чином, у рамках описаної математичної моделі задачі розрахунку та оптимізації режимів транспортування газу, а також оптимального керування роботою ГТС можна розділити на такі групи визначальних параметрів (ρ, V_i, T) , (p, V_i, T) , (ρ, J_i, T) , (p, J_i, T) . Від вибору ключових параметрів істотно залежить характер нелінійності ключових рівнянь.

Параметри стану та руху газу (ρ, p, V_i, J_i, T) загалом є функціями часу t та просторових координат x_i , $i = 1, 2, 3$.

$$\rho = \rho(t, x_1, \dots, x_3), \quad p = p(t, x_1, \dots, x_3), \quad T = T(t, x_1, \dots, x_3), \\ V_i = V_i(t, x_1, \dots, x_3), \quad J_i = J_i(t, x_1, \dots, x_3). \quad (18)$$

Рух газу, за якого визначальні параметри його стану залежать від координат x_i і часу t , називатимемо нестационарним. Якщо параметри, котрі визначають термодинамічний стан та рух газу, залишаються незмінними в часі, тобто

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial T}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial V_i}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial J_i}{\partial t} = 0, \quad (19)$$

то такий рух є стаціонарним.

У стаціонарному випадку ключові рівняння спрощуються, оскільки визначальні параметри в них залежні лише від просторових координат

$$\frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \cdot V_i) = 0;$$

$$\frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \cdot V_i \cdot V_j + p \cdot \delta_{ij}) = -\rho \cdot F_i^{\text{TP}} - \rho \cdot g \frac{\partial h}{\partial x_i}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\kappa \frac{\partial T}{\partial x_i} \right) + \rho \cdot c_v \cdot V_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = - \left(\frac{c_p - c_v}{k_p} \right) \cdot \rho \cdot V_i \frac{\partial \rho}{\partial x_i} + \rho \cdot V_i \cdot F_i^{\text{TP}} + Q^{\text{зовн}}.$$

Отримана аналітична залежність є теоретичною основою для подальшої розробки методів контролю та регулювання режиму роботи складних ГТС. Встановлено параметри, характер зміни яких дає можливість приймати реальні рішення, спрямовані на найбільш ефективну їх експлуатацію.

Література

1. Прялов С.Н. Повышение адекватности моделирования транспортирования газа по трубопроводам / С.Н. Прялов // Газовая промышленность. – 2007. – №1. – С.66-69.
2. Юкин Г.А. Оптимизация параметров работы компрессорных станций многониточных газопроводов / Г.А. Юкин // Актуальные проблемы современной науки. – 2002. – №5. – С.243-244.

3. Селезнев В.Е. Методы и технологии численного моделирования газо-проводных систем / В.Е. Селезнев, В.В. Алешин, Г.С. Клишин. – М.: КомКнига, 2005. – 327с.

*Стаття поступила в редакційну колегію 21.07.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Грудзом В.Я.*

BASES OF DEVELOPMENT OF METHODS OF ADJUSTING OF OFFICE HOURS OF THE DIFFICULT GAS-TRANSPORT SYSTEMS

D. F. Timciv, R. G. Onatsco, O. T. Mihalevich

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
tel. +380 (322) 4-93-58; e-mail: public@ifdtung.if.ua*

The model of the gas-transport system intended for the analysis of gas streams and process control of transporting of gas is built.

Keywords: *gas-transport system, office hours, compressor station, gas-distributing station, dug-out of gas.*

Інформаційні технології

УДК 681 3(075.8) 378.16

ЗАСТОСУВАННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО НАВЧАННЯ ПРИ ОРГАНІЗАЦІЇ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ У ВИЩІЙ ШКОЛІ

Л. М. Заміховський¹, Л. М. Ходак²

¹*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (432) 4-80-00, e-mail: ktsu.nung@gmail.com*

²*Галицька Академія; 76006, м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 227;
e-mail: academy@imega.edu.ua*

З використанням елементів діяльнісного і проблемно-орієнтованого підходу подана концепцію створення електронних дистанційних курсів на прикладі створення дистанційного курсу дисципліни “Сучасні технології програмування”.

Ключові слова: *навчальний процес, електронні курси з елементами дистанційного навчання, системи управління навчанням.*

На сучасному етапі постіндустріального суспільства широке впровадження новітніх інформаційних технологій викликає проблему швидкого передавання знань та навичок у різних сферах людської діяльності. До однієї з таких сфер діяльності належить освітянська. При цьому виникає проблема в навчанні студентів за напрямками: комп'ютерна інженерія, системна інженерія тощо, вивчення сучасних інформаційних, телекомунікаційних, комп'ютерних технологій (так звані АТ технології) і систем, що розвиваються надшвидкими темпами, і встигати за змінами тенденцій їх розвитку та доносити ці зміни студентам за короткий проміжок часу є достатньо складним як педагогічним, так і технічним завданням.

Одним із основних напрямків вирішення вказаної проблеми є побудова електронних курсів з елементами дистанційного навчання (ДН), що володіють такими перевагами, як необмежена аудиторія, можливість проведення діагностування рівня знань та навичок студентів, повторювання лекційного матеріалу, що не був засвоєний. Обов'язковими елементами таких курсів є наявність проблемного та дієвого навчання, що уможливорює розвиток самостійного мислення, творчого пошуку та орієнтації на кінцевий результат. Цього, як правило, немає в типових кур-

сах, формулюванням завдань яких займається, в основному, лектор, в той час як студент також повинен вміти самостійно сформулювати завдання для вирішення існуючої проблем.

Такі дистанційні курси (ДК) для спеціальності “система управління та автоматики” можна застосувати для таких дисциплін, як “Сучасні технології програмування”, “Об’єктно-орієнтоване програмування”, “Бази даних” та інших, особливістю яких є швидке старіння інформації і потреба у новій, а також ті дисципліни, що мають інструменти для виконання лабораторних та практичних завдань. Це означає, що дерево знань, яке буде закладене в основі курсу, повинне бути гнучким, щоб уможливити легку заміну застарілих технологій на нові, а також розвиток курсу у міру розвитку ІТ технологій.

Створення такого дистанційного курсу розглянемо на прикладі дисципліни “Сучасні технології програмування”.

На першому етапі слід створити структуру курсу. Для цього необхідно створити модель студента, який буде залучений до курсу, та модель, яку ми повинні отримати на виході. Під час розроблення курсу було враховано, що студент повинен володіти елементами структурного програмування (вміти написати просту лінійну програму) та бути звичайним користувачем операційної системи (ОС) Windows [1].

Вихідна модель являтиме собою студента, який володіє конкретними навичками і вміє виконувати практичні завдання. Під поняттям “виконувати практичні завдання” розуміється вміння студента вирішувати задачі автоматизації роботи малого підприємства із застосуванням можливостей ОС Лінукс, Perl, PHP та Web технологій (HTML, CSS, Javascript).

Першим кроком у розробці курсу є побудова дерева знань, в основу якого будуть покладені розділи, що вивчатимуться в межах дисципліни. Для того, щоб побудувати дерево знань, необхідно, спочатку проаналізувати існуючі мови програмування, визначити їхнє відсоткове використання на ринку, а також потребу в спеціалістах, які спеціалізуються саме на таких технологіях (рис. 1):

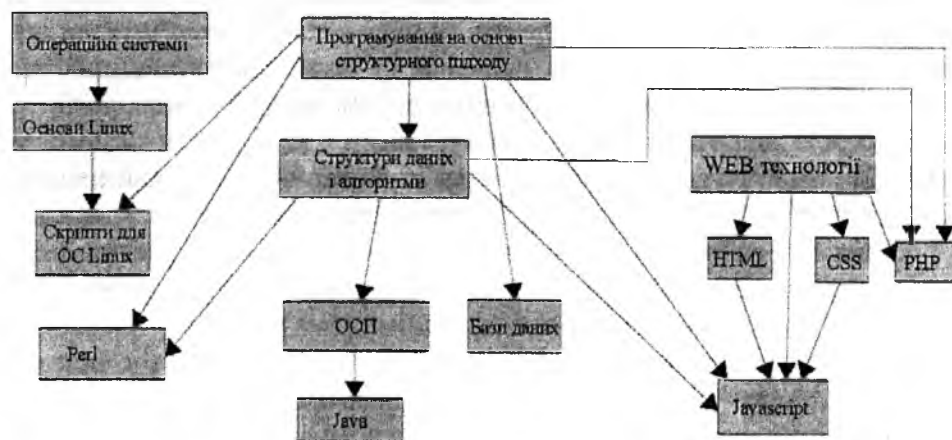


Рис. 1. Дерево знань дисципліни “Сучасні технології програмування”

Необхідними умовами для допуску студента до вивчення дисципліни є такі:

- студент повинен бути користувачем персонального комп’ютера (ПК) і володіти хоча б базовими знаннями про будь-яку операційну систему;
- студент повинен володіти на понятійному рівні основними елементами структурного програмування, а саме знати, що таке цикл, послідовне виконання і умова.

В даному курсі вивчаються елементи операційної системи Linux, яка є надзвичайно популярною в середовищі як програмістів, так і системних адміністраторів через свою стійкість, а також написання автоматизаційних скриптів. Для того, щоб написати скрипт, як бачимо з дерева знань (рис.1), необхідно знати команди операційної системи, для якої він пишеться, і володіти елементами структурного програмування (умовні оператори, цикли, і послідовне виконання – це ті елементи, з яких складаються скрипти).

За аналогією ми можемо також розглянути вивчення скриптової мови Javascript і сказати, що її вивчення немає сенсу без базових знань з HTML, CSS, властивостями яких вона оперує.

Другий крок – це побудова специфічних електронних лекцій для студента. Відразу слід наголосити, що навіть в межах електронної лекції студент повинен взаємодіяти з персональним комп’ютером для засвоєння основних елементів і, таким чином, система дистанційного навчання повинна повертати студента до питань того розділу електронної лекції, з якого він дав невірні відповіді. Крім того, елементи лекції обов’язково повинні включати в себе практичні завдання, які студент повинен виконувати. Мінімум теорії, максимум практики – це девіз таких лекцій. Розвиток теоретичних знань відбувається на основі вирішення деякої проблеми, розв’язок якої неможливий без наявності відповідних знань.

Практичні завдання повинні формулюватися з задач, що використовуються на практиці, і їхньою особливістю є застосування отриманих знань в конкретному середовищі та в тестах, які студент буде проходити.

Для виконання практичних завдань використовується віртуальна машина VMWare, за допомогою якої студент може виконати практичне завдання, володіючи мінімумом знань та використовуючи додаткові джерела. Після вивчення електронної лекції студент проходить тестування, а відтак, отримує певний бал за лекцію. Розглянемо блок-схему процесу проходження лекції (рис. 2):

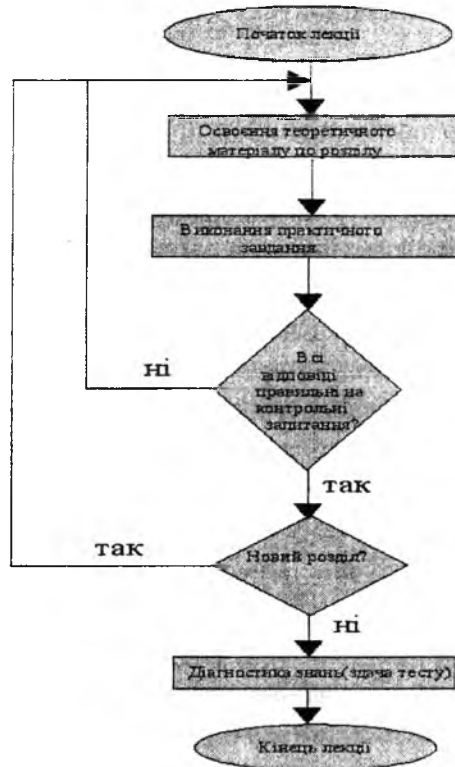


Рис. 2. Блок схема роботи студента на лекції

Слід звернути увагу на особливості побудови тестів, що використовуються для оцінювання матеріалу лекції. Тести повинні включати знання та навички, які студент набув в процесі виконання практичних завдань [2]. Як свідчить практика, цей момент буде слугувати додатковим стимулом, оскільки студенти в процесі навчання можуть як пропускати заняття, так і недбало виконувати практичні завдання. Тестові задачі повинні містити мінімум теоретичних запитань і максимум запитань з практичних аспектів курсу. Це дає змогу виявити, чи розуміє студент роботу команд на різноманітних мовах програмування (адже відповіді на теоретичні або практичні запитання можна списати), а також аспекти застосування тих чи інших парадигм, які вимагають глибокого розуміння проблеми.

Лекційний матеріал дозволяє студенту сформувати набір необхідних знань та навичок для виконання практичних завдань. Проте для того, щоб оцінити справжній рівень знань студента, необхідно застосувати проблемно-орієнтований підхід та поставити студента в умови, близькі до реальних, і подивитися, яким чином він буде вирішувати практичну задачу. Використання проблемного підходу дає змогу студентам використовувати елементи творчого пошуку для вирішення проблеми. З метою збільшення мотивації студента доцільно створити лабораторні роботи, які були б пов'язані між собою. Тобто захист 2-ї лабораторної роботи є неможливим без захисту 1-ої, а результатом виконання всіх лабораторних робіт повинен бути програмний продукт для автоматизованого розв'язання конкретного набору задач деякого підприємства. Особливістю виконання даної роботи є відсутність так званого типового

“Ходу виконання роботи”, який визначає послідовність виконання роботи і позбавляє студентів можливості самостійно визначати хід власних думок. За такого підходу студенти виконують лабораторні роботи, збираючись у команди, і середньоарифметичний бал команди виставляється кожному з учасників [3].

Для реалізації електронного ДК було обране середовище дистанційного навчання Moodle [4], так як воно найкраще підходить для реалізації вищеприписаної концепції взаємодії студента із викладачем. Загальна ідея побудови полягає у створенні електронного курсу та розміщення в ньому елементів дерева знань, як опорних пунктів під час вивчення предмету.

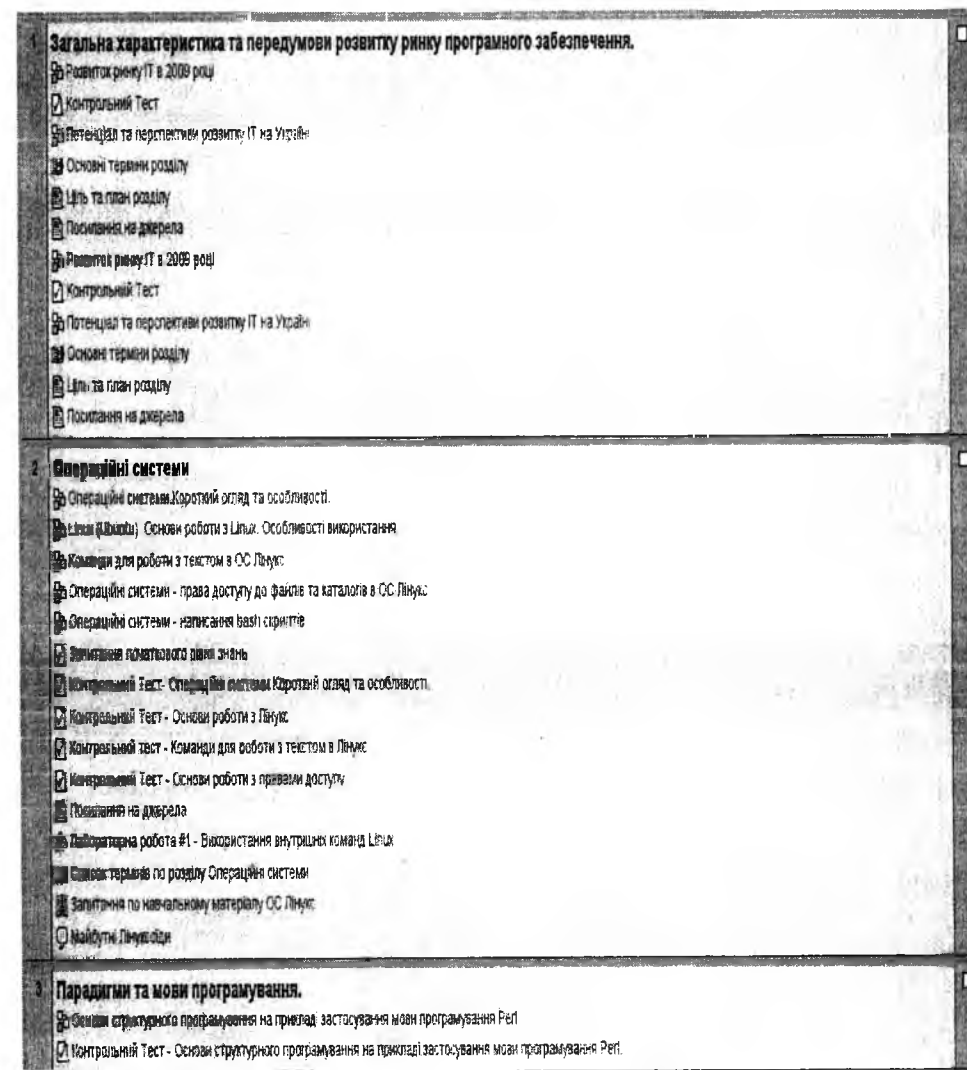


Рис. 3. Відображення елементів дерева знань в електронному курсі Moodle.

Розглянемо елемент дерева знань «Операційні системи» (рис. 3). Перші 5 пунктів являють собою електронні версії лекцій. Пункти, що містять в собі послідовність «Контрольний тест», – це тести, що використовуються для оцінювання роботи студента упродовж лекції.

Розглянемо структуру типової електронної лекції:

Page title	Page type	Actions
Команди для роботи з текстом в ОС Linux	Branch Table	# 4 % X Add a page... 1
Команди grep	Branch Table	# 4 % X Add a page... 2
Висячені команди grep	Multiple Choice	# 4 % X Add a page... 3
Складні команди grep	Matching	# 4 % X Add a page... 4
Регулярні вирази	Branch Table	# 4 % X Add a page... 5
Використання регулярних виразів	Matching	# 4 % X Add a page... 6
Приклади застосування регулярних виразів	Branch Table	# 4 % X Add a page... 7
Глобальні опції розширення роботи регулярних виразів	Multiple Choice	# 4 % X Add a page... 8
Ідентифікатори метасимволів	Branch Table	# 4 % X Add a page... 9
Приклади використання ідентифікаторів	Branch Table	# 4 % X Add a page... 10
Параметри імена базисних метасимволів команди sed	Multiple Choice	# 4 % X Add a page... 11
Розширені метасимволи sed	Branch Table	# 4 % X Add a page... 12
Приклади використання розширених метасимволів	Branch Table	# 4 % X Add a page... 13
Розширені метасимволи sed	Multiple Choice	# 4 % X Add a page... 14
Значні команди sed для роботи з базисними метасимволами	Matching	# 4 % X Add a page... 15

Рис. 4. Структура типової лекції



Рис. 6. Контрольне запитання з розділу



Рис. 5. Розділ електронної лекції

Q#	Question text	Answer's text	partial credit	% Counts	R3%	% Correct Faculty	SD	Disc. Index	Disc. Coeff.
263	Простір шрифтів: Вибрати найбільш підходяще визначення: Простір шрифтів - це	Рядок, куди ведуть дані в файлі	0.50	10/15	(67%)	63%	0.481	0.81	0.60
		Місце, куди команди sed звертаються за даними, коли виконують операції вставки та модифікації тексту	0.50	10/15	(67%)				
		Простір в текстовому редакторі чи іншій версії відображення	0.00	0/15	(0%)				
248	Модифікатори sed: В команді sed 's/color/colour/g' testFile.txt Як модифікувати g, щоб вона заміняла тільки перше виникнення шрифту color	Забрати модифікатор g	1.00	10/15	(67%)	53%	0.518	0.98	0.82
		Забрати команди s на команди c	0.00	0/15	(0%)				
		Нічого заміняти не треба	0.00	0/15	(0%)				
		Забрати команди s на команди p	0.00	0/15	(0%)				
248	Заміна в шрифті sed: Вставьте команду нагомось ... яка змінить sed змінити всі виникнення teacher на student sed 's/teacher/student/g' testFile.txt	s	1.00	9/15	(60%)	59%	0.502	0.99	0.68
230	Параметри шрифту sed: Вставьте код, який дозволяє з допомогою команди grep відобразити кількість виходів шрифту 'alias': grep "alias" /bin/ls/tester/ls.txt	c	1.00	0/15	(0%)	53%	0.518	1.00	0.88
		-c	1.00	8/15	(53%)				
		!c#	0.00	1/15	(7%)				
254	Знаючи метасимволи регулярних виразів Створіть символічний рядок, який виведе:	Початок строки: ^	1.00	9/15	(60%)	58%	0.485	1.00	0.90
		Альтернатива:	1.00	8/15	(53%)				
		Групування: ()	1.00	9/15	(60%)				
		Будь-яка цифра: \d	1.00	8/15	(53%)				

Рис. 7. Результати тестування

Кожна лекція складається з листків, що містять теоретичні відомості та контрольних запитань, що визначають рух студента структурою лекції в залежності від того, чи правильно відповів студент на контрольні запитання (рис. 4). Кожен розділ, як правило, містить мінімальні теоретичні відомості та практичне завдання, яке пов'язане з теоретичними відомостями даного розділу. Практичне завдання може включати в

себе елементи попередніх електронних лекцій та розділів, що дає змогу фактично повторно закріпити попередньо пройдений матеріал (рис. 5).

Після виконання практичного завдання студент повинен відповісти на контрольне запитання (рис. 6). Таких запитань може бути декілька, а їх основним завданням є якомога щільніше покрити основні теоретичні викладки розділу.

Після вивчення електронної лекції студент повинен пройти тестування [5]. Результати тестування є доступними для аналізу викладачем, і за їх результатами можна буде визначити загальний рівень групи, найбільш складне запитання, кількість правильних відповідей у відсотковому співвідношенні тощо. Одним з основних завдань викладача є визначити складні та прості запитання в результаті тестування та зрозуміти причину надзвичайно хороших або надзвичайно поганих результатів, а також здійснити відповідні дії щодо покращення ситуації. Наприклад, надзвичайно погані результати можуть свідчити про таке:

- студенти не засвоїли практичний та теоретичний матеріал;
- більшість запитань у тесті є неправильно сформульованими;
- існування помилки в самому тесті.

Створений електронний ДК з дисципліни «Сучасні технології програмування» впроваджений на кафедрі «Комп'ютеризовані технології в системах управління та автоматики». Слід зауважити, що такий ДК був сприйнятий студентами дуже позитивно, адже можна було отримати оцінку під час лекції, і у їхній свідомості відклалося, що кожна лекція є важливою, оскільки завжди оцінюється. Матеріал теж був сприйнятий з великою цікавістю, і більшість студентів захотіла повторного проходження лекцій в домашніх умовах. Як свідчить практика практика, виконання лабораторних робіт для студентів є досить важким. Основна причина полягає в тому, що типовому українському студенту привили звичку, що він у всьому залежить від викладача, і лише деякі студенти здатні самі упоратися з проблемою. На даний момент ведеться робота щодо залучення студентів до участі у форумі, адже форум – одне з джерел підтримки зворотного зв'язку зі студентами та ознайомлення з їхньою точкою зору на проблему та формування списку запитань, таких як FAQ (Frequently Asked Questions).

Висновки

Використання електронного дистанційного курсу значно покращує швидкість та якість навчання, адже студент може активно взаємодіяти з навчальною системою та отримувати від неї зворотній зв'язок.

Структура курсу «Сучасні технології програмування» та можливості системи Moodle дають змогу змінювати елементи електронного курсу, що сприяє швидкому оновленню курсу в цілому і є реакцією навчальної системи на зміну інформаційних технологій на ринку.

Існує можливість комбінування окремих елементів курсу та їх використання в інших курсах, які можуть відрізнятися за складністю, що уможливило зробити градацію між студентами та застосування персонального підходу до навчання, що є темою для окремої статті.

Слід зауважити, що електронні ДК такого типу можна застосовувати як до технічних дисциплін, так і до ряду гуманітарних, в яких існує можливість виконання практичних завдань з використанням прикладних інструментів.

Література

1. Фокин Ю.Ф. Теория и технология обучения: Деятельностный подход: учебное пособие для студ.высш.уч.заведений / Ю.Ф. Фокин. – М.: Академия, 2006. – 240 с.
2. Аванесов В.С. Композиция тестовых заданий / В.С. Аванесов. – М.: Из-во Центра тестирования Минобразования РФ, 2002. – 239 с.
3. Новые педагогические и информационные технологии в системе образования: учеб. пособие для студ. пед. вузов и системы повыш. квалиф. пед. кадров. 2-е изд. / Е.С. Палат, М.Ю. Бухаркина, М.В. Моисеева, А.Е. Петров; под ред. Е.С. Палат. – М.: Академия, 2005. – 272 с.
4. Ходак Л.М. Розширення функціональних можливостей системи управління навчанням Moodle / Л.М. Ходак, О.Л. Заміховська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2008. – Вып.2/2 (32). – С. 51-53.

Стаття поступила в редакційну колегію 09.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Семенцовим Г.Н.

APPLICATION OF ELEMENTS OF THE CONTROLLED FROM DISTANCE STUDY DURING ORGANIZATION OF EDUCATIONAL PROCESS AT HIGH SCHOOL

L. M. Zamihovsky¹, L. M. Hodac²

¹Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivsk, Carpat'ska street, 15;
tel. +380 (432) 4-80-00, e-mail: ktsu.nung@gmail.com

²Glitsca Academy; 76007, Ivano-Frankivsk, Vovchynets' street, 227;
e-mail: academy@imega.edu.ua

This work presents theory of creating distance electronic courses with elements of behavioural learning and problem-oriented approach by using electronic course for subject "Modern technologies of software development."

Key words: educational process, electronic courses with the elements of the controlled from distance study, control system by a study.

МОДЕЛІ І МЕТОДИ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСТАНЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ РІВНЯ ЗНАНЬ

Ю. В. Безгачнюк

*Івано-Франківський національний технічний університет;
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
тел. +380 (342) 4-80-00; e-mail: yurkovskiy@au.nung.if.ua*

Розглядаються моделі і методи статистичної обробки результатів дистанційного діагностування рівня знань студентів, а також реалізація відповідного апарату в системі d-tester, яка використовується на кафедрі КТіСУ ІФНТУНГ впродовж п'яти років

Ключові слова: навчальний процес, дистанційне діагностування рівня знань студентів, статистична обробка результатів досліджень.

Вступ

Історія педагогіки налічує достатню кількість форм і методів оцінки знань, вмінь та навичок тих, хто навчається (далі по тексту – студенти), частина яких прийшла до нас з глибокої старовини і з середніх століть. Серед них виділяються іспити, що стали традиційною формою контролю знань.

Іспит – це випробування, що проводиться відповідно до встановлених правил; іспит відображає ідею перевірки, випробування, при успішному результаті яких підтверджуються певні права особи. У кожній країні світу іспити є свідомством офіційного схвалення результатів закінчення навчального закладу, вони є незамінними для мотивації до серйозної і постійної роботи в процесі навчання [1].

В якості альтернативного методу педагогічних вимірювань слід розглядати використання тестів, при цьому ставиться питання про створення докімології (від грец. dokime) – науки про організацію та реалізацію контролю знань.

Сьогодні відносно тестів затвердилась норма рефлексії обов'язкової перевірки їх якості, найбільш суттєвої вимоги до даного методу педагогічного контролю.

Можна виділити три головні ознаки якості тестового контролю якості знань:

1. Якість – це визначеність.
2. Визначеність повинна бути тотожна з буттям, невід'ємною від існування об'єкта тестування.
3. Визначеність повинна бути зовнішньою, вона є границею, що виділяє певний об'єкт серед інших, породжує його своєрідність, специфіку, індивідуальність.

Якість тестів, з моменту їх появи, стала об'єктом серйозних наукових досліджень. Ще до початку ХХ століття з'явилися перші вказівки на необхідність підвищення точності тестових оцінок і їх адекватності. З часом якість тестів стала основним об'єктом загальної теорії тестів. У цій теорії виділяються два основні критерії якості тестів – надійність і валідність.

На додаток до двох цих відомих критеріїв якості тестів виникла необхідність у дослідженні третього критерію – ефективності тестів. Існує математико-статистичний апарат, який дозволяє кількісно оцінити рівень ефективності як тесту в цілому, так і кожного завдання окремо.

Ефективність тестового контролю є категорією, ширшою за надійність. Надійність є необхідною умовою забезпечення заданого рівня ефективності тесту. Ефективність функціонування складної системи тестування повинна оцінюватися фахівцем, що володіє системою в цілому, який знає її призначення і вимоги до неї.

За кордоном у ХХ столітті гостро відчувалася необхідність у створенні методів оцінки рівня складності кожного завдання тесту, які не залежать від складу оцінюваної групи. Зрозуміло, що якщо на певне завдання j відповідає частина добре підготовлених студентів, то частка правильних відповідей на це завдання (p_j) буде значно вищою, ніж у групі слабо підготовлених.

Багаторічні спроби пошуку відповідей на питання про визначення рівня складності завдань систем тестового контролю призвели до двох наступних результатів:

1. Рекомендації щодо збільшення вибірки випробовуваних до тих пір, поки ймовірність p_j не стане достатньо близькою до значення параметра складності на генеральній сукупності. Метод виявився тривіальним і марнотратним, його важко визнати ефективним для вирішення поставленого завдання.

2. Другий результат, отриманий в 1943 р. Д. Н. Лавли, був спробою отримати показник складності завдання тестового контролю, безвідносно до рівня конкретної групи студентів [2]. Як виявилось, інваріантною властивістю володіють, так звані, характеристичні криві тестових завдань і тесту загалом. Побудувавши за емпіричними даними криві, де на осі абсцис відкладаються тестові бали, а вздовж осі ординат – ймовірність або відсоток правильних відповідей, можливо виявити, що для студентів групи слабкої підготовки “працює” нижня частина характеристичної кривої, а для студентів групи сильної підготовки – верхня. Таким чином, для оцінки вірогідності правильної відповіді студента залежно від рівня його підготовленості (q_i) почала використовуватися функція логістичного вигляду, з фіксованим рівнем складності завдання. Дану ідею пошуку оцінки ефективності складності завдання тесту пізніше розвинув і довів до комп'ютерної технології Ф. М. Лорд і його колеги.

Ефективний тест не може складатися з неефективних завдань. Тому необхідно поставити питання про ознаки, які відрізняють ефективне завдання тестового контролю. Ефективне завдання перевіряє важливий

елемент змісту учбової дисципліни, який нерідко називають ключовим для необхідної структури знань студентів. У тест, відповідно, включаються тільки такі завдання, які експерти визнають як ключові елементи навчальної дисципліни.

Спеціалістами в області тестового контролю вже давно досліджується один з показників якості завдання – так званий індекс диференціюючої (дискримінанта) здатності завдання (ДЗЗ). У новій теорії тестів (Item Response Theory) з поняттям ДЗЗ асоціюється значення параметра крутизни характеристичної кривої тестового завдання, що дозволяє істотно уточнити і збагатити поняття ДЗЗ. Таким чином, відкривається можливість введення в науковий обіг таких понять, як компоненти ефективності, локальна ефективність тесту, локальна ефективність завдання, порівняльна ефективність двох і більшої кількості завдань, з'являється можливість конструювання ефективного тесту за рахунок відбору ефективних завдань. Математичним аналогом значення інформативності, а отже, ефективності кожного завдання, на відповідній ділянці складності є поняття “Інформаційна функція”.

Це поняття і відповідний математичний апарат в науковий обіг для оцінки диференційованої точності педагогічних вимірювань введені Г. Рашем та згодом А. Бернбаумом [3]. Згідно даної теорії, тест не може бути ефективним на всьому діапазоні підготовленості студентів. Він може бути ефективним на одному діапазоні рівня знань студента і менш ефективним на іншому.

1. Теоретичні основи статистичної обробки результатів діагностування рівня знань студентів

Актуальним науковим і педагогічним завданням є проведення контролю знань студентів дистанційно з використанням комп'ютерної техніки і відповідного програмного забезпечення. Тестування є невід'ємною частиною дистанційного навчання, оскільки являє собою зворотній зв'язок в колі “викладач – студент”. При цьому в очному тестуванні викладачем студента виникають проблеми, пов'язані із суб'єктивністю оцінок викладачів, неможливістю протестувати одним викладачем значний потік студентів тощо. У зв'язку з цим в рамках розвитку інформаційних технологій існує актуальна проблема автоматизації процесу тестування – створення інформаційних систем тестування знань, які б не тільки забезпечували значну економію часу викладача і студента, але й дозволяли швидко і об'єктивно оцінити знання студента, а також дозволяли б студенту проводити самоконтроль своїх знань з метою усунення “прогалин” у них [4].

Для забезпечення якісного аналізу результатів проходження тестового контролю, а також визначення якості (ефективності) тестових завдань необхідно використовувати методи статистичної обробки результатів.

На етапі статистичної обробки та інтерпретації результатів дистанційної діагностики (ДД) слід застосовувати результати Item Response Theory, що перекладається на українську мову, як математич-

но-статистична теорія оцінки латентних параметрів завдань тесту та рівня підготовленості студентів. На цьому етапі уточнюється зміст змінної, яка цікавить дослідника, визначається шкала вимірювання, застосовується комп'ютерна обробка результатів тестування.

Латентними називаються позитивні та негативні якості особистості, які неможливо безпосередньо виміряти – рівень підготовки студентів, знання учбової дисципліни, здатність сприймати інформацію, інтелектуальний розвиток особистості та багато інших чинників. Спроби виміряти дані якісні показники на рівні буденної свідомості закінчуються словесними або чисельними оцінками, що містять значні похибки.

На відміну від класичної теорії тестів для IRT характерно спрямування до фундаментального теоретичного підходу і одночасно до коректного вирішення низки практичних задач педагогічного тестування. В практичному плані це спрямування пов'язано з деякими труднощами, які, до речі, не завжди усвідомлюються відомими тестологами – створювачами сучасної теорії тестування. Необхідно застосовувати доволі складний математико-статистичний апарат, використовувати потужну комп'ютерну техніку, необхідно розробляти спеціалізоване програмне забезпечення.

Очевидно, що логіка повинна бути така: латентні параметри, вірніше взаємодія двох множин їх значень, породжує спостережувані результати виконання тесту. Елементи першої множини – це значення латентного параметра, який визначає рівні знань N студентів Θ_i , де $i = 1, 2, \dots, N$. Друга множина утворюють значення латентного параметра B_j , $j = 1, 2, \dots, n$, рівні складності n завдань тесту. Однак на практиці формулюється зворотня задача: за відповідями студентів на завдання тесту оцінити значення латентних параметрів Θ і B . Для її вирішення необхідно відповісти щонайменше на два питання.

Перший пов'язаний з вибором співвідношення між латентними параметрами Θ і B . Данський математик Георг Раш (George Rasch) запропонував ввести це співвідношення у вигляді різниці $\Theta - B$, вважаючи, що параметри Θ і B оцінюються за однією і тією ж шкалою.

Значення параметра Θ_i можна розглядати як положення i -го студента, а значення B_j – як положення j -го завдання на одній і тій же осі змінних Θ , B . У такому разі ідея введення різниці параметрів одержує цікаву геометричну інтерпретацію. Абсолютна величина різниці $|\Theta_i - B_j|$ – це відстань, на якій знаходиться студент з рівнем знань Θ_i від завдання складністю B_j . Якщо ця різниця велика за модулем і негативна, то завдання даремне для вимірювання рівня знань i -го студента. Студент, напевно, не зможе виконати його правильно. З іншого боку, великі позитивні значення цієї різниці теж не ефективні ані для процесу контролю, ані для навчання i -го студента. Завдання такої складності давно ним засвоєне. З погляду підходу, пропонованого в IRT, такі завдання неефективні для оцінювання даного значення Θ .

Відповідь на друге питання, яке є центральним в IRT, пов'язане із вибором математичної моделі. Слідуючи за основним припущенням IRT, можна стверджувати, що існує деяка математична модель взаємозв'язку між емпіричними результатами тестування і значеннями латентних змінних Θ і B .

Під час вибору моделі слід враховувати, що в реальних умовах на спостережувані результати здійснюють вплив як випадкові, так і не випадкові чинники. Не зважаючи на всю "випадковість" окремих результатів тестування, виявляється відносна інваріантність значень латентних змінних від конкретного випробування або від ряду випробувань. Наприклад, певна стійкість частот появ значень змінних $\Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_N$ спостерігається при багатократному тестуванні групи N студентів паралельними тестами. Ця стійкість є підставою для використання поняття вірогідності події як міри можливості його появи. За таку подію зазвичай вибирається правильна відповідь i -го студента на j -е завдання тесту. Умовну ймовірність правильного виконання студентами завдань тесту виражають за допомогою тієї або іншої математичної моделі.

Можна розглядати умовну ймовірність правильного виконання i -м студентом з рівнем знань Θ_i різних за складністю завдань тесту, вважаючи Θ_i параметром i -го студента, а β — незалежною змінною. В цьому випадку умовна ймовірність буде функцією латентної змінної β :

$$P_i \{x_{ij} = 1 | \Theta_i\} = f(\Theta_i - \beta), i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

Аналогічно вводиться умовна ймовірність правильного виконання j -го завдання, складністю β_j будь-якими студентами групи. Тут незалежною змінною є Θ , а β_j — параметр, який визначає складність j -го завдання тесту:

$$P_i \{x_{ij} = 1 | \beta_j\} = f(\Theta - \beta_j), j = 1, 2, \dots, n, \quad (2)$$

де

$$x_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{якщо } i\text{-ий студент правильно виконав } j\text{-е завдання;} \\ 0, & \text{якщо } i\text{-ий студент неправильно виконав } j\text{-е завдання;} \end{cases}$$

N — число студентів; n — кількість завдань в тесті.

Однопараметрична модель Г. Раша

Однопараметрична модель, яку часто називають простою логістичною моделлю, є однією із сімейства логістичних кривих, описаних Г. Рашем в статті "On general laws and the meaning of measurement in psychology". Аналітичне задання моделі представлено формулами (3) і (4).

$$P_j(\theta) = \{1 + \exp[-1.7(\theta - \beta_j)]\}^{-1}; \quad (3)$$

$$P_i(\beta) = \{1 + \exp[-1.7(\theta_i - \beta)]\}^{-1}. \quad (4)$$

Підхід Г. Раша до побудови моделі вимірювання та інтерпретації результатів тестування (*Rasch Measurement*) є апріорним, теоретичним, спрямованим на створення такої моделі та одиниці педагогічного

вимірювання, за допомогою яких можна за однією шкалою порівнювати рівень знань студента із рівнем складності завдання.

Практичні переваги даного досягнення в області педагогічних вимірювань останніх років важко переоцінити.

Перша перевага полягає у стандартизованому характері отриманої одиниці вимірювання рівня знань студентів. Як і будь-яка стандартизована одиниця вона є результатом перетворення вихідних даних, що надає можливість об'єктивно порівнювати досягнення різних студентів за різними дисциплінами.

Значення рівня знань студента (латентна змінна) θ_i та рівень складності j -го завдання тесту, що вимірюється на латентному континуумі знань, β_j на першому етапі створення ефективного набору тестових завдань можуть бути апроксимовані з матриць тестових результатів, які згідно з моделлю Г. Раша зведені програмним шляхом у таблиці, приклад структури яких наведений на рис. 1.

№ Студент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	$\gamma(i)$	$p(i)$	$q(j)$	$p(i)/q(j)$	$\ln(p(i)/q(j))$
1 Бабюк Володимир	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	5	0.33	0.67	0.49	-0.71
2 Беззаженок Юрій	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	12	0.8	0.2	4	1.39
3 Бурій Ігор	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	0.2	0.8	0.25	-1.39
4 Василь Ігор	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	5	0.33	0.67	0.49	-0.71
5 Восвода Владислав	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	7	0.47	0.53	0.89	-0.12
R_j	5	2	3	2	3	0	1	0	2	2	4	1	2	3	82					
W_j	0	3	3	2	3	2	5	4	5	3	3	1	4	3	2					
$p(i)$	1	0.4	0.4	0.6	0.4	0.6	0	0.2	0	0.4	0.4	0.8	0.2	0.4	0.6	6.4				
$q(j)$	0	0.6	0.6	0.4	0.6	0.4	1	0.8	1	0.6	0.6	0.2	0.8	0.6	0.4					
$p(i)q(j)$	0	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0	0.16	0	0.24	0.24	0.16	0.16	0.24	0.24					
$q(j)/p(i)$	0.01	1.5	1.5	0.67	1.5	0.67	0.01	4	0.01	1.5	1.5	0.25	4	1.5	0.67					
$\ln(q(j)/p(i))$	-4.61	0.41	0.41	-0.4	0.41	-0.4	-4.61	1.39	-4.61	0.41	0.41	-1.39	1.39	0.41	-0.4					

Рис. 1. Матриця тестових результатів (за теорією Г. Раша)

У таблицю зведені наступні статистичні дані:

p_i — кількість вірних відповідей студента на завдання всього тесту; q_i — кількість хибних відповідей того самого студента на завдання даного тесту; p_i/q_i — потенціал i -того студента; $\ln(p/q)$ — логіт знань (за Г. Рашем); p_j — кількість студентів, що вірно відповіли на j -те завдання даного тесту; q_j — кількість студентів, які не справились з поставленим завданням; $\ln(q/p)$ — логіт складності j -того завдання даного тесту.

Логарифмічні оцінки рівня знань студентів та рівня складності тестових завдань дали можливість порівнювати їх між собою, що обумовило значний вплив на розвиток закордонної педагогічної теорії і практики. Вперше з'явився інструмент для безпосереднього зіставлення будь-якого завдання тесту з будь-яким випробовуваним, і на основі цього зі-

ставлення обчислити імовірність вірної відповіді.

2. Переваги використання параметричної теорії Г. Раша

1. На основі теорії Г. Раша і програмного алгоритму його реалізації ЕОМ самостійно добирає студентів завдання в системах адаптивного навчання та діагностування знань. Якщо імовірність вірної відповіді є низькою, то обирається завдання меншої складності, у протилежному випадку – навпаки. Загальний принцип підбору завдань відповідає 50% імовірності отримання вірної відповіді.

2. Перевага даного методу вимірювання рівня знань заснована на специфічних особливостях моделі Г. Раша. Отримані з її допомогою оцінки рівня знань студентів, через відносну незалежність від конкретного підбору того або іншого завдання, набувають характеру достатньо об'єктивних результатів тестування, що також позитивно відбивається на якості оцінок, що використовуються під час педагогічної діагностики.

3. Ця ідея перетворилась у нове для науки положення про специфічну об'єктивність, як основу отримання вірних оцінок рівня знань суб'єктів, що не залежать ні від конкретного набору тестових завдань, ні від підбору групи студентів та самого викладача. Не випадково у західній літературі вимірювання за Г. Рашем ще називають *model based measurement*.

4. Перевага даної теорії пов'язана із можливостями отримання шкали інтервалів. *Rasch Measurement* володіє всіма достатніми ознаками фундаментальної теорії, яка має досить просту аксіоматику, що зводиться до простих тверджень: властивість суб'єкта діагностики знань, що цікавлять викладача, існує у латентному стані, воно є нестійким, і тому, вимірюється з деякою похибкою. Імовірність вірної відповіді випробовуваного залежить від співвідношення рівня його підготовки і від рівня складності завдань.

5. Теорія Г. Раша виявилась несуперечливою, ефективною та має підтвердження у тисячах практичних застосувань. Висунутий нею принцип *reparability of estimates* дозволяє звільнитися від нестійких статистик на вибірках завдань і вибірках студентів для отримання необхідних параметрів діагностування.

6. Перевагою моделі Г. Раша є порівняльна стійкість розрахованих значень рівня знань та складності тестових завдань. Це дає підстави стверджувати, що однопараметричні моделі вдало оцінюють якості особистості, що цікавлять педагога, і є недоступними для безпосереднього вимірювання.

Висновки

Можна говорити про можливість використання методології *Rasch Measurement* в практиці дистанційного діагностування рівня знань та проектуванні систем адаптивного контролю рівня знань, вмінь та навичок студентів, яка базується на філософії об'єктивного пізнання, має власний метод фундаментального вимірювання із власною одиницею та властивостями шкали інтервалів. Дана методологія відповідає всім ви-

могам, що висувалися видатними вченими до психологічних і педагогічних вимірювань:

1. Лінійність, що припускає можливість застосування арифметичних властивостей та операцій.
2. Взаємна незалежність параметрів завдань та суб'єктів випробування.
3. Відносна простота методу вимірювання параметрів діагностування рівня знань.
4. Одновимірність вимірюваного об'єкта.
5. Монотонність відображення властивостей у числовій шкалі вимірювання.

Слід наголосити на особливості процесу і культури теорії *Rasch Measurement*. Процес складається із етапів, культура включає у себе філософські, теоретичні і метрологічні основи вимірювання. В центр даної культури можна покласти такі головні ідеї:

1. Модель *Model-based measurement*, що можна трактувати як принципово інший підхід до аналізу статистичних даних діагностування рівня знань студентів. Якщо, зазвичай, намагаються знайти математичну модель для найкращого опису даних, то у теорії Г. Раша, навпаки, дані повинні відповідати моделі вимірювання. Багато західних спеціалістів надавали цій вимозі особистісно-психологічне тлумачення неадекватності позиції автора. В той же час, тут має місце інша дослідницька методологія та інша, більш просунута культура вимірювання.

2. Ідея залежності імовірності вірної відповіді студентів, яка виражається відповідною функцією імовірності вірної відповіді студента на завдання, у залежності від різниці двох значень – рівня підготовленості до тестування і міри складності завдання.

3. Одновимірність, що відображається у намаганні вимірювати лише одну важливу властивість особистості (латентність). В існуючих на сьогоднішній день тестових системах намагаються вимірювати рівень знань тільки за одною учбовою дисципліною.

4. Ідея локальної незалежності результатів, яка формулюється як аксіома для випробовуваних однакового рівня підготовленості: імовірність вірної відповіді на одне завдання не повинна залежати від імовірності вірної відповіді на будь-яке інше завдання.

5. Параметри завдань і випробовуваних не повинні бути взаємозалежними.

Модель педагогічних вимірювань *Rasch Measurement* має відомі переваги побудови лінійної шкали інтервалів вимірювання, із достатньою статистикою, а також ефективні математичні обґрунтування. Тому можна стверджувати, що *Rasch Measurement* є не просто спрощеною однопараметричною моделлю *Item Response Theory*, як це вважається у Західних наукових колах, а зовсім іншою культурою вимірювання рівня знань студентів та їх діагностики.

Література

1. Анастаси А. Психологическое тестирование. Кн.1 / А. Анастаси. – М.: Педагогика, 1982. – 320 с.
2. Аванесов В.С. Основы теории педагогических заданий / В.С. Аванесов // Педагогические Измерения. – 2006. – №2. – С. 26-62
3. Чельшкова М. Б. Разработка педагогических тестов на основе современных математических моделей: уч. пособие / М.Б. Чельшкова. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов, 1995. – 32 с.
4. Безгачнюк Ю.В. Структура системи дистанційного діагностування рівня знань студентів / Ю.В. Безгачнюк, Л.М. Заміховський, Л.О. Сав'юк // Наукові вісті Івано-Франківського ІМЕ “Галицька академія”. – 2005. – №2(8). – С.40-49.

*Стаття поступила в редакційну колегію 09.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Заміховським Л.М.*

**MODELS AND METHODS OF STATISTICAL TREATMENT
OF RESULTS OF THE CONTROLLED FROM DISTANCE
DIAGNOSTICS OF LEVEL OF KNOWLEDGES**

YO. V. BEZGACHNYUC

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
phl. +380 (342) 4-80-00; e-mail: yurkovskiy@au.nung.if.ua*

Models and methods of statistical treatment of results of the controlled from distance diagnostics of level of knowledges of students are considered in the article, and also realization of the proper vehicle in the system of d-tester, which is used on a department CT and SU IFNTOUNG during five years

Key words: educational process, controlled from distance diagnostics of level of knowledges of students, statistical treatment of results of researches.

УДК 378: 339.922

**РОЛЬ УНІВЕРСИТЕТІВ У РОЗВИТКУ ТА ТРАНСФОРМАЦІЇ
РЕГІОНАЛЬНОЇ ОСВІТИ**

Л. О. Сав'юк

*Галицька академія, Філіал кафедри Юнеско “Нові інформаційні технології в освіті для всіх”;
76007, м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 227;
e-mail: lorasavuk@rambler.ru*

Проаналізовано сучасний стан, проблеми і перспективи розвитку системи регіональної шкільної та спеціальної середньої освіти та її зв'язку з університетами. Наведені результати статистичних досліджень рівня знань студентів, які навчаються на кафедрі комп'ютерних технологій в системах управління та автоматизації Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу. Проведені дослідження дають можливість обґрунтувати необхідність запровадження регіональної програми дистанційної підтримки шкіл Прикарпатського регіону в області підвищення рівня знань з інформаційно-комунікаційних технологій.

Ключові слова: статистичні дослідження рівня знань студентів, інформаційно-комунікаційні технології, інноваційні методи навчання.

Вступ

Аналіз сучасного стану регіональної освіти в Україні вказує на те, що сьогодні відбуваються процеси відриву рівня знань випускників сільських шкіл від однолітків, які проживають і навчаються в містах і населених пунктах міського типу. Зазначені в статті факти давно вже переросли масштаби окремо взятої країни на просторі колишнього СНД.

Ще в 2006 році Володимир Кафарський, народний депутат України, секретар Комітету Верховної Ради з питань науки і освіти піднімав питання про допомогу школам сільських регіонів України з боку органів влади, науково-дослідних установ, керівництва вищих навчальних закладів (ВНЗ) [1].

Сільська освіта в Україні сьогодні [2] – це майже чотирнадцять з половиною тисяч загальноосвітніх навчальних закладів та близько сотні спеціальних загальноосвітніх шкіл та шкіл-інтернатів, в яких навчаються більш ніж два мільйони школярів.

Школа у селі повинна стати системним утворюючим чинником, активно впливати на відродження українського села, на формування людського капіталу, економіки, соціальної інфраструктури. Очевидно, що сільську школу потрібно зберегти, а освіта для сільських дітей повинна бути доступною і якісною.

Сільська шкільна освіта має відношення не тільки до держави, а й до народу, теперішнього і майбутнього нашої країни, адже саме в цьому віці формуються психологічні, інтелектуальні та моральні основи особистості. Якими будуть діти, таким буде в майбутньому держава, бо хто, як не село, наповнює цю державу національним духом.

Держава може повести себе по-батьківськи, якщо питання освіти будуть вирішувати мудрі та відповідальні державні люди. І, відповідно, як мачуха, коли буде дивитися на регіони з позиції забезпечення країни трудовими ресурсами – в кращому випадку, або з точки зору раціонального використання та економії бюджетних коштів, що взагалі є неприпустимими в цивілізованому суспільстві.

Але, мабуть, найголовнішим є те, що суб'єктами сільського шкільної освіти є неповноправні громадяни нашої країни, які з ряду об'єктивних причин, не мають рівного доступу до системи вищої освіти на батьківщині і за кордоном. Якщо випускникам сільських шкіл навіть вдається потрапити на студентську лаву, вони не в змозі отримати якісну професійну освіту внаслідок неповноцінності знань, отриманих в середній школі.

На нашу думку, школа – не тільки гарант розвитку села, а й надійне джерело поповнення студентського потенціалу ВНЗ України в умовах демографічної кризи, яка припадає на наступні кілька десятків років. Але, самостійне вирішення таких проблем місцевими і державними органами влади та управління освітою без допомоги з боку ініціативних і досвідчених колективів професорсько-викладацького складу найкращих університетів нашої країни є неможливим.

У [3] було вказано на те, що університет, будучи продуктом європейської культури, з самого початку прагнув не тільки до знань заради знань, але й до формування знань з метою зростання і зміцнення благополуччя суспільства, тобто завжди був соціально орієнтованим і вкоріненим.

Сучасні інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ), інноваційні підходи до навчального процесу вже сьогодні якісно перетворюють саму суть діяльності університетів в області створення, збереження і передачі знань. Інноваційні підходи до навчання дають змогу університетам стати помічниками і наставниками для вчителів і школярів віддалених регіонів, допомогти їм у досягненні рівня знань і умінь міських шкіл. Тим забезпечується активний притік досвідчених студентів у стіни ВНЗ та підготовка кваліфікованих кадрів для всіх галузей діяльності в нашій країні [4].

1. Основні причини відставання рівня сільської освіти:

1. Хронічне недофінансування освіти і поширення бідності. Але навіть за таких умов сільська сім'я продовжує забезпечувати процес відтворення населення та соціалізації підростаючих поколінь у домашніх господарствах.

2. Вимушена (через вкрай низьку зарплату) додаткова зайнятість вчителів та учнів у підсобних господарствах.

3. Підвищення витрат на шкільну і подальшу освіту. Це призвело до того, що в селах стає все більше дітей, які залишили навчання або формально вважаються учнями і відвідують школу, але вже не навчаються. У Київській і Житомирській областях в окремі дні на уроці були відсутні більш ніж половина учнів, або вони одержали незадовільні оцінки [1]. У заможних сім'ях витрати на освіту вже давно виділяються окремим рядком сімейного бюджету, який забезпечує іноді якісну університетську освіту, а іноді й “липову”.

4. Сільська влада не має реальних повноважень, грошей і є повністю залежною від волі районного начальства, яке фактично виявилось відірваним від нагальних потреб мешканців села. Звідси кричущі факти, коли суспільство хоче мати в селі школу, а сільська влада, виконуючи волю районної державної адміністрації, робить все, щоб її закрити.

5. Сільська громада, навчена за роки радянської влади бути мовчазним статистом дій влади, ще не відчула себе господарем на своїй території.

Села поставлені в нерівні умови щодо отримання освітянських послуг порівняно з містами. Про нерівні умови для навчання і розвитку сільських та міських дітей свідчить той факт, що майже в половині сіл України (48 відсотків) діти не можуть навчатися за місцем проживання, оскільки там відсутні загальноосвітні навчальні заклади. Наприклад, у Дніпропетровській області з 1 тисячі 383 населених пунктів загальноосвітні навчальні заклади функціонують лише у 477, що складає 35,5% [2].

На сьогодні в Україні в основному сформована необхідна нормативно-правова база щодо забезпечення функціонування навчальних закладів у сільській місцевості. Потрібно зауважити, що функціонування навчальних закладів (дошкільних, загальноосвітніх, позашкільних) на селі по-різному відображено в 14 законах України, 7 постановах Верховної Ради України, 6 указах Президента України, 14 постанов уряду і десятках наказів Міністерства освіти і науки України. У 1999 році Постановою Кабінету Міністрів України № 1305 «Про розвиток сільської загальноосвітньої школи» навіть було затверджено Комплексний план заходів щодо розвитку загальноосвітніх навчальних закладів у сільській місцевості на 1999-2005 роки. На основі цієї постанови місцеві органи виконавчої влади та органи місцевого самоврядування протягом останніх років розробляли і впроваджували власні регіональні програми в області освіти.

Проте ситуація із забезпечення доступною, якісною освітою дітей мешканців сільських регіонів та молоді залишається вкрай складною, мережа сільських шкіл не відповідає реальним потребам учнів і побажанням батьків.

Щорічно в малих населених пунктах зменшується кількість учнів однієї вікової групи (до 5 осіб), що за чинними нормативними документами не дає підстав для відкриття окремого класу. За таких умов навчання здійснюється за індивідуальними планами, що, зрозуміло, не може сприяти підвищенню якості освіти, адже на вивчення всіх навча-

льних предметів виділяється лише 7-8 годин на тиждень. В окремих областях України за п'ять останніх років кількість дітей, які навчаються за індивідуальною формою, зросла на 3-4,5 відсотки.

Науковці Академії педагогічних наук пропонують негайно розглянути пропозиції щодо розробки та фінансування державної програми “Дистанційна освіта сільських школярів” з подальшим прийняттям закону про дистанційну освіту в системі загальної середньої освіти та підготовки інших нормативно-правових документів, перш за все, положення про дистанційну освіту, які будуть визначати організаційні, змістовні та технологічні аспекти індивідуального навчання школярів у сільській місцевості.

Безперечно, завдання щодо забезпечення якісною освітою в сільській місцевості неможливо вирішити без головної діючої особи в цьому процесі – вчителя. А проблем у цьому питанні більш ніж достатньо. Сьогодні відчувається нестача педагогічних кадрів у сільських навчальних закладах. Станом на перше вересня минулого року існували вакансії більш ніж на 1 тисячу 200 посад.

Таким чином, університетам варто покласти початок широкомасштабного експерименту з пошуку нових підходів до інформаційної підтримки та патронування рівня освіти сільської школи як особливого соціокультурного явища в умовах змін, пов'язаних з підготовкою до майбутньої адміністративної реформи формування багатоукладної економіки в агропромисловому комплексі з перебудовою демократичного суспільства.

Для порівняння наведемо приклад організації регіональної участі університетів США в підтримці рівного доступу різних верст населення до вищої освіти [5]. Вища освіта з'явилася на території США зусиллями емігрантів-європейців, які в 1636 р. створили Гарвардський коледж, за зразком якого надалі формувалися заклади місцевого значення і невеликим контингентом студентів з багатих верств населення.

На даний момент уряд встановлює лише загальні рамки вимог для навчання, тому програми середньої освіти відрізняються в різних штатах, містах, округах і школах. Батьки і діти мають більшу свободу вибору суттєвої частини дисциплін та змісту тих предметів, які є обов'язковими. Останнім часом в США постійно зростає кількість спеціалізованих шкіл з поглибленим вивченням частини предметів, де знайшли роботу частина тих вчителів, які емігрували з екс-соціалістичних країн. Заяви до вищих закладів освіти учні США подають у віці 17 років за рік до закінчення середньої школи. Для зарахування необхідно успішно скласти відповідні тести й отримати атестат – High School Diploma. Останній рік школи частина учнів присвячує поглибленому вивченню тих дисциплін, які вони планують обрати в закладах вищої освіти. Успішне складання заключних тестів може дати право почати заняття у ВНЗ відразу з другого курсу.

Система вищої освіти США є надзвичайно об'ємною і різноманітною. На відміну від інших країн світу, у США велику популярність

отримали програми 2-3-річної спеціалізованої підготовки у місцевих і молодших коледжах, які надають можливість порівняно дешево і швидко готувати до ефективної практичної роботи широкі контингенти молоді. Завдяки цьому США у XX ст. постійно перебували і тримаються в даний момент в числі світових лідерів з охоплення населення різними видами навчання після середньої освіти.

Особливістю США є і те, що, крім освітніх і наукових функцій, їхні заклади вищої освіти виконують важливі соціально-культурні завдання (програми безперервного навчання, перепідготовки безробітних, консультаційні та експертні послуги, надання курсів різного змісту і тривалості всім, хто цікавиться новим і прагне самовдосконалення).

До окремої групи можна винести нетрадиційні заклади вищої освіти, які широко використовують надсучасні засоби трансляції інформації та організації не традиційного заочного, а дистанційного навчання.

Складність організаційних завдань керівників вищих ланок вищих заочних і дистанційних закладів є настільки великою, що ними все частіше доручають керувати не професорам-науковцям, а досвідченим менеджерам, які не мають досвіду у сфері наукових досліджень, але отримали диплом доктора в області наук про управління або систему освіти.

Американська вища освіта належить до відкритих, тому що створює досить сприятливі умови для вступу до вищих заочних та дистанційних закладів тим, хто висловив хоча б середнє бажання продовжити навчання після школи, яка має 12 класів. При цьому університети постійно підтримують школи віддалених регіонів, організовуючи дистанційні курси підвищення кваліфікації та перепідготовки вчителів, курси підвищеного рівня з дисциплін, які обирають учні.

Таким чином, нами пропонується запровадити регіональну програму дистанційної підтримки шкіл Прикарпатського регіону в сфері підвищення рівня знань вчителів та учнів з інформаційно-комунікаційних технологій на основі світового досвіду та проведення статистичного обґрунтування необхідності розвитку даної програми.

Кафедра ЮНЕСКО “Нові інформаційні технології в освіті для всіх” та центр дистанційного навчання Галицької академії впродовж останніх двох років проводили дослідження, моніторинг, збір статистичних даних і їх обробку для порівняльного аналізу рівня знань студентів, які є випускниками міських та сільських шкіл, з дисциплін, які передбачають комп'ютерну інформаційну грамотність. Виявилось, що при загальному падінні рівня знань з природничих дисциплін, знання з ІКТ випускників сільських шкіл є набагато нижчими у порівнянні з випускниками міських шкіл. Крім того, під час приватних розмов, студенти з віддалених регіонів зізнаються в тому, що навіть на 3-5 курсах їм не вдається наздогнати досвідчених в ІКТ студентів, вони продовжують просто побоюватися комп'ютера і завдання, які пов'язані з програмуванням, імітаційним моделюванням, проектуванням комп'ютеризованих систем самостійно виконати не можуть.

На рис. 1 наведена діаграма проведених статистичних досліджень

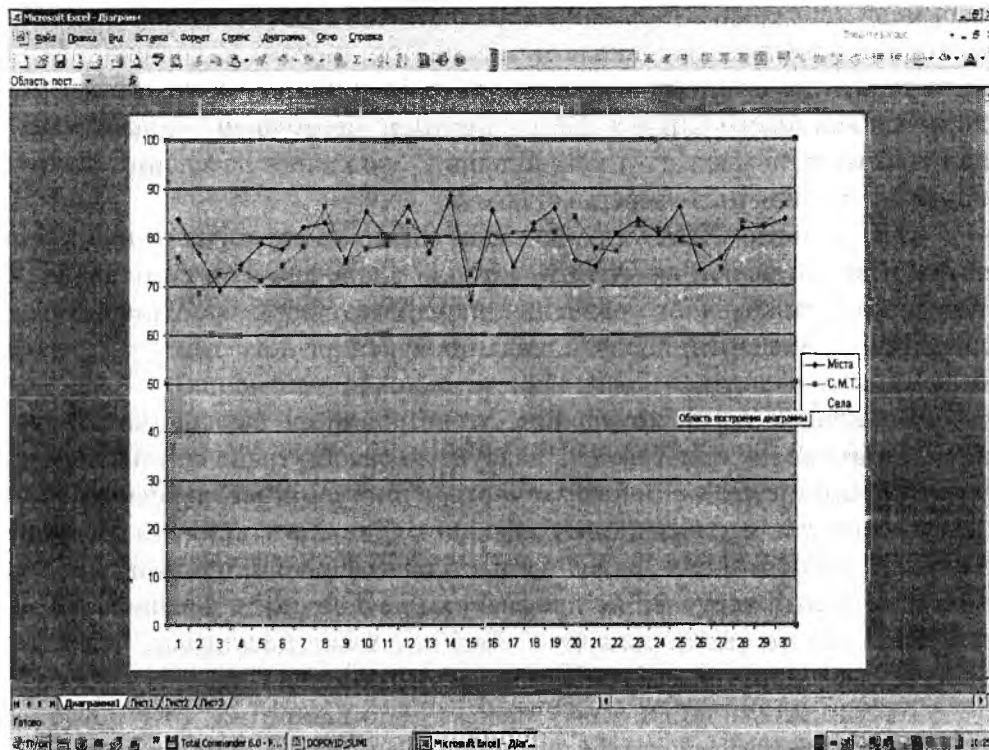


Рис. 1. Діаграма розподілу рівня знань студентів, які навчалися в школах міст, селах міського типу та селах Прикарпатського регіону

Висновки

1. Одночасно з рухом до якісно нової інститутської університетської освіти, повинні значною мірою відновлюватися знищені традиції класичного вищого навчального закладу як вільного і автономного співтовариства.

2. Сучасні ВНЗ повинні сьогодні виконувати політичну та ідентифікаційну роль, виступати у якості співтовариства, де формується відповідне соціальне середовище і засоби демократичної участі у суспільстві, засновані на знаннях.

3. Якісна освіта і престижний диплом – це найбільш важливі умови успішного кар'єрного і професійного зростання, надійні інвестиції у майбутнє. Вони повинні бути однаково доступними всім мешканцям нашої країни.

Основна роль в досягненні вказаних завдань повинна бути притаманна найкращим ВНЗ України.

Література

1. Кафарський В. Хто допоможе сільській школі? / В. Кафарський // Голос України. – 2006. – 24 січ. (№ 13). – С. 8-9.
2. Кафарський В. Проблеми реалізації законодавства у сфері освіти : [стат. дані] / В. Кафарський // Голос України. – 2005. – 31 серп. (№ 162). – С. 8-9.

3. Сав'юк Л.О. Роль університетів у впровадженні технологій навчання на основі сучасних педагогічних теорій та всесвітнього освітянського досвіду / Л.О. Сав'юк // Матеріали конференції "Іноваційний розвиток суспільства за умов кросс-культурних взаємодій". – Суми, 2008. – Ч.2. – С. 82-86.
4. Іванюк Н.І. Модели и системное решение проблем интеграции систем дистанционного обучения в высшее образование Украины / Н.І. Іванюк, Л.О. Сав'юк // Матеріали конференції "Іноваційний розвиток суспільства за умов кросс-культурних взаємодій". – Суми, 2009. – Т.3. – Ч.1. – С. 34-37.
5. Освіта за кордоном. Освітня мережа України. – http://www.ednu.kiev.ua/StudyAbroad/usa/edu_sys.htm.

Стаття поступила в редакційну колегію 09.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Заміховським Л.М.

ROLE OF UNIVERSITIES IN DEVELOPMENT AND TRANSFORMATION OF REGIONAL EDUCATION

L. O. Sav'iuk

Glitsca academy, Branch of department of UNESCO
 "New information technologies in education for all";
 76007, Ivano-Frankivs'k, Vovchynets' street, 227;
 e-mail: lorasavuk@rambler.ru

In the article are analysed modern being, problems and prospects of development of the system of regional school and special secondary education and its communication with universities. Resulted results of statistical researches of level of knowledges of students which study on the department of computer technologies in the control systems and automation of the Ivano-Frankivs'k national technical university of oil and gas. The conducted researches allow the necessity of introduction of the regional program of the controlled from distance support of schools of the Precarpathian region in the region of increase of level of knowledges from of informative-communication technologies.

Key words: statistical researches of level of knowledges of students, of informative-communication technologies, innovative methods of study.

УДУ 378.14.004

ЗАСТОСУВАННЯ СУЧАСНИХ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИКЛАДАННІ ДИСЦИПЛІН ДЛЯ СТУДЕНТІВ ЗАОЧНОЇ ФОРМИ НАВЧАННЯ

С. В. Зікратий

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
Україна, 76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська, 15;
тел. +380 (3422) 4-80-00; e-mail: zikratiy@ukr.net*

Розглянуто перспективи використання Інтернет-технологій Web 2.0 організації навчального процесу. Подано схему інформаційної системи підтримки навчального процесу з використанням функцій соціальних мереж.

Ключові слова: освіта, інформаційні технології, інтерактивність, синдикація, соціалізація.

Однією з ознак інформаційного постіндустріального суспільства є масове впровадження комп'ютерів у ділове і повсякденне життя та поява мережі Інтернет. Якщо ресурси мережі Інтернет першої хвили обслуговували здебільшого інформаційні та виробничі потреби по вертикалі “Викладач – Студент”, то Інтернет ресурси другої хвили, які прийнято називати Web 2.0, характеризуються розвитком горизонтальних відносин і наголосом на соціальні зв'язки та відносини.

В чому ж суть технологій Web 2.0? У якості її базових принципів, як правило, виділяють інтерактивність, синдикацію й соціалізацію [1]. Дані принципи можна описати так:

Інтерактивність. Web 2.0 – це платформа, тобто така технологія наповнення сайту змістом (контентом), коли він стає тим кращим, чим більше людей ним користуються – відвідувачі активно формують сайт, наповнюючи й багаторазово редагуючи його зміст. У Web 1.0 зміст сайту (принаймні значної його частини) визначався творцями сайту, а не користувачами; сайт був, в основному, носієм інформації, подібно паперовій книжці. Платформи ж Web 2.0 виступають лише посередниками між користувачами в обміні їх онлайнним досвідом, тобто їх особистими живим знаннями.

Синдикація (mash-up) – повне або часткове використання як джерела інформації інших сервісів Інтернет (наприклад, RSS-каналів), за рахунок чого користувачеві надається нова функціональність для роботи. Сервіс, що використовує mash-up, може також ставати джерелом інформації для інших mash-up сервісів. У такий спосіб формується мережа залежних один від одного сервісів, інтегрованих один з одним.

Соціалізація – використання технологій, за якими можливе створення співтовариств. У це поняття зазвичай включаються: можливість

індивідуальних налаштувань сайту й створення особистої зони для користувача з метою реалізації його унікальності; заохочення, підтримка й довіра “колективному розумові”; технології, які уможливають саморегулювання співтовариства й ставлять перед користувачами додаткові цілі присутності на сайті (наприклад, система репутацій).

Ці нові можливості, які надаються сучасними інтернет-технологіями, можуть бути спрямовані як на обслуговування потреб тіла – розважальні й ігрові портали та сервіси, так і вдосконалювання духу, формування особистості та надання освітніх послуг.

У галузі освіти нові інформаційні технології можуть слугувати як забезпеченню класичного навчального процесу, так і виходу на новий оберт діалектичної спіралі, а саме, перехід від усного діалогу “Викладач–Студент” через сучасну організаційну освітню структуру, із сильним бюрократичним компонентом в організації навчального процесу, до навчання, побудованому від Викладача як Носія Знань.

Даний підхід передбачає наявність трьох рівнів інформаційної підтримки навчального процесу (рис. 1):

- сайт навчального закладу (візитна картка – загальна інформація про навчальний заклад та кафедри);
- сайт кафедри, який забезпечує реєстрацію студентів, надання навчальних матеріалів, можливість зворотного зв'язку, блогове обговорення навчальних матеріалів та елементи дистанційного навчання (наприклад, можливість тестування);
- контент-сайт Викладача, на якому зосереджені навчальні матеріали стосовно курсів, що читаються викладачем, який виступає одним із джерел знань.

Чільне місце в даному випадку займає сайт кафедри як платформа для організації співтовариств за дисциплінами кафедри та забезпечує зв'язок між всіма сторонами навчального процесу. Близькі за змістом дисципліни можуть об'єднуватися в спільні співтовариства.

Даний підхід дозволяє застосувати технології очного навчання для організації навчального процесу заочної форми навчання, побудувати навчальний процес від Викладача – Носія Знань та забезпечити породження нового навчального контенту за рахунок обміну думок, літературних джерел між учасниками навчального процесу.

Переваги застосування даного підходу:

- ефективність процесу передачі знань;
- маркетингові конкурентні переваги й можливість боротьби за коло бажаючих навчатися за даним напрямком;
- у соціальній сфері – формування Співтовариства, можливо, професійної соціальної мережі.



Рис. 1. Схема інформаційної системи підтримки навчального процесу

Таким чином, формування соціальних співтовариств осіб задіяних у навчальному процесі, а це – викладачі та студенти, дає змогу організувати тісний контакт між ними з метою кращого засвоєння інформації та спільним зусиллями формувати навчальний контент. Інтернет-технології дозволяють стерти територіальний бар'єр між учасниками співтовариств, що є актуальним для заочної форми навчання.

Специфікою навчання на заочній формі навчання є саме відсутність постійного контакту між викладачем і студентом, а також, в багатьох випадках, їх територіальна відокремленість. Цей недолік легко усувається впровадженням технологій дистанційного навчання. Але, на жаль, на даний час впровадження технологій дистанційного навчання відбувається досить повільно, і заочна форма навчання є основною формою отримання знань без відриву від виробництва. Якщо доступ до навчальних матеріалів можна легко задовільнити, оскільки більшість навчальних матеріалів, таких як підручники, посібники, методичні вказівки до занять, вже переведені в електронну форму, то відсутність живого спілкування між викладачем і студентами можливо забезпечити за допомогою соціальних мереж.

Ще однією технологією, що забезпечує можливість безпосереднього живого спілкування, є технологія VoIP (передача голосу через IP – мережі). Найбільш поширеним програмним додатком з даної сфери є Skype, який дозволяє організувати безкоштовне спілкування між окремими користувачами мережі Інтернет. Skype заснований на технології

P2P (мережа типу “точка–точка”), що прийшла з файлообмінних мереж. Завдяки її застосуванню обробка всієї інформації ведеться на комп'ютерах користувачів, які в цей момент спілкуються, а для її передачі використовується прямий шлях від абонента до абонента. Не використовуються ніякі спеціальні сервери, що й забезпечує безкоштовність спілкування.

До числа переваг Skype варто віднести класичну властивість P2P-архітектури – самодостатність. У той час, як централізовану систему доводиться обновляти й модернізувати у міру зростання числа клієнтів, ресурси P2P-мережі автоматично збільшуються з підключенням нових учасників. Безпека зв'язку, що здійснюється за прямої участі певної кількості приватних посередників, досягається за рахунок шифрування потоків даних за алгоритмом AES. З широким розповсюдженням широкополосного доступу до мережі Інтернет з'явилася можливість не тільки голосового спілкування, але і передавання відео між учасниками розмови. Ще однією з переваг використання Skype є можливість обміну навчальними матеріалами у вигляді файлів. Єдине, що на даний момент Skype не підтримує – це організація відеоконференцій, доступні лише голосові конференції.

Водночас за потреби проведення on-line лекцій, їх можна провести на базі програмного забезпечення для вебінарів. Вебінар це особливий тип веб-конференцій [2]. Зв'язок, як правило, односторонній (зі сторони лектора), і взаємодія зі слухачами обмежена, наприклад, як у вебкастах. Вебінари можуть бути спільними й містити сеанси голосувань і опитувань, що забезпечує повну взаємодію між аудиторією та лектором. У деяких випадках лектор може говорити через телефон, коментуючи інформацію, що відображається на моніторі слухача, а слухачі можуть йому відповідати, переважно у вигляді текстового чату. На ринку також присутні технології, у яких реалізована підтримка VoIP аудіо-технологій, що забезпечують повноцінний аудіозв'язок через Мережу.

Таким чином, сучасні інтернет-технології Веб 2.0 повною мірою можуть бути застосовані в освітній сфері і бути хорошим підґрунтям для організації дистанційного навчання та підтримки концепції “Навчання протягом всього життя”.

Література

1. Веб 2.0 [Електронний ресурс] // Википедія – свободная энциклопедия. – URL: http://ru.wikipedia.org/wiki/Веб_2.0
2. Онлайн-семинар [Електронний ресурс] // Википедія – свободная энциклопедия. – URL: <http://ru.wikipedia.org/wiki/Онлайн-семинар>

*Стаття поступила в редакційну колегію 09.11.2009 р.
Рекомендовано до друку д.т.н., професором Заміховським Л.М.*

APPLICATION OF MODERN INFORMATION
TECHNOLOGIES IN TEACHING OF DISCIPLINES FOR
STUDENTS OF EXTRA-MURAL FORM OF STUDY

S. V. Zicratiy

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
tel. +380 (3422) 4-80-00; e-mail: zikratiy@ukr.net*

The prospects of the use of internet technologies of Web 2.0 organization of educational process are considered. The chart of the informative system of support of educational process is given with the use of functions of social networks.

Key words: *education, information technologies, interactive, syndication, socialization.*

**Економіка та
організація
виробництва**

УДК 338.24

ОЦІНКА ЕКОНОМІЧНОЇ ІНФОРМАЦІЇ

Я. С. Витвицький, О. М. Витвицька, Н. В. Балашова

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76000, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: econpid@nung.edu.ua*

Показано роль інформації у функціонуванні підприємств у сучасних умовах. Подано дефініцію інформаційного капіталу та виокремлено його характерні ознаки. Здійснено класифікацію видів економічної інформації з точки зору оцінки її вартості. Розглянуто методичні підходи до оцінки економічної інформації, яка пропонується споживачам як інформаційні послуги. Для оцінки економічної інформації, що застосовується в управлінні підприємством, запропоновано методичний підхід на основі концепції економічних вигод.

Ключові слова: *економічна інформація, інформаційний капітал, класифікація економічної інформації, оцінка, економічні вигоди.*

Актуальність проблеми. Інформація відіграє виключну роль у життєдіяльності людського суспільства. Відомий вчений М. Ф. Реймерс, ще у 60-ті роки минулого століття запропонував трактувати інформацію як “один із найважливіших природних ресурсів, і одночасно, суспільних надбань, оскільки весь розвиток людства є результатом переробки інформації, одержаної з навколишнього середовища і накопичуваного суспільством” [1]. Сучасне постіндустріальне суспільство часто називають ще інформаційним суспільством через виключну роль інформації, яка стала невід’ємним чинником виробництва та одним з найважливіших ресурсів поряд з трудовими, матеріальними та фінансовими [2, 3, 4, 5]. За незначних розмірів основного капіталу “віртуальним корпораціям”, що формують основи сучасної економіки, притаманні гігантські розміри капіталізації. Причиною цього є величезні накопичені ресурси нематеріального капіталу, який не відображений у бухгалтерській звітності. У складі нематеріального капіталу, безумовно, важливе місце займає інформаційний капітал, тому

важливим завданням є розробка методичних підходів до оцінки інформаційного капіталу, що дозволить об'єктивно відображати дійсний склад активів підприємства, характеризувати економічні результати його діяльності, успішно застосовувати концепцію вартісно-орієнтованого управління.

Аналіз досліджень і публікацій, у яких започатковано вирішення проблеми. У працях [3, 6, 7, 8] зазначалась актуальність цього важливого завдання і запропоновано принципові підходи до його вирішення. Однак, подані визначення інформаційного капіталу та його економічних ознак потребують уточнення; також не здійснено належної систематизації інформації та конкретизації методичних підходів до оцінки окремих її видів.

Результати дослідження. Поняття інформації походить від латинського «information», що означає викладення, повідомлення, пояснення факту, явища, події, тобто інформація ідентифікує сутнісні характеристики предметів, природних і суспільних явищ. Вона відноситься до групи загальнонаукових категорій і займає важливе місце у різних науках – математиці, фізиці, хімії, біології, економіці, соціології та інших.

В Україні прийнятий Закон «Про інформацію», що визначає галузі інформації – політичну, економічну, духовну, науково-технічну, соціальну, екологічну, міжнародну та види інформації – статистичну, масову, про діяльність державних органів влади та органів місцевого і регіонального самоврядування, правову, про особу, довідково-енциклопедичного характеру, соціологічну [9]. У даному дослідженні нас, насамперед, цікавить економічна інформація.

Економічна інформація кількісно характеризує стан виробничо-господарської та фінансової діяльності суб'єкта господарювання через систему натуральних і вартісних показників, що циркулюють у виробничій та невиробничій сферах, органах управління. За допомогою економічної інформації можна простежити взаємозв'язки між окремими ланками, напрями їх розвитку, здійснити необхідні коригування, підвищити якість окремих бізнес-процесів, оптимізувати використання всіх ресурсів.

Бачиться таке її визначення – *економічна інформація це засіб зниження невизначеності і ризику, здатний сприяти реалізації цілей суб'єкта господарювання та приносити економічні вигоди.* Це визначення економічної інформації відображає розуміння того, що вона стає домінуючим чинником виробництва тільки сумісно з усіма іншими ресурсами виробництва, у першу чергу, інтелектуальними, і тільки у разі її корисності, тобто здатності приносити економічні вигоди. Це дає підстави відкинути величезні масиви існуючої на даний час “зайвої інформації”, а також підводить до необхідності використання економічної категорії – інформаційного капіталу. Визначення сутності та видів інформаційного капіталу подано у роботі [6]. Погоджуючись з відзначеною автором важливістю цієї категорії і тим, що саме через

інформацію реалізуються основні види нематеріальних активів, органічно акумулюються і конвертуються у людський, культурний, соціальний та інший капітали, хочемо підкреслити доцільність чіткого виокремлення саме інформаційних ресурсів та їх оцінки. Виходячи з цього пропонується таке визначення інформаційного капіталу.

Інформаційний капітал – це сукупність функціонуючих у системі виробництва інформаційних ресурсів та засобів для їх накопичення, зберігання, обробки, передачі та відображення, що обслуговують процеси виробництва та управління на підприємстві і створюють умови для отримання доходів та створення доданої вартості.

Доцільно виокремити сутнісні характеристики інформаційного капіталу:

інформаційний капітал функціонує у економічній системі підприємства як єдине ціле з іншими ресурсами та розвивається разом з підприємством;

формування інформаційного капіталу потребує значного авансування у інформаційні ресурси та інформаційні технології;

ресурси, що формують інформаційний капітал, генерують додатковий дохід, що є вартісним виміром їх корисності;

для інформаційного капіталу притаманний двоїстий характер його корисності: з одного боку, він використовується як ресурс у процесі виробництва та реалізації продукції; з іншого, він може бути поданий у вигляді специфічного товару (інформаційних продуктів, послуг);

для інформаційного капіталу притаманною є висока невизначеність його корисності та залежність від можливості доставки інформації у місце де вона необхідна саме у даний момент часу;

домінантним чинником, що впливає на формування та синергію інформаційного капіталу є людський капітал;

інформаційний капітал має властивість до самозростання через постійну тенденцію до збільшення обсягів інформації та знань;

інформаційний капітал постійно змінюється, як за структурою ресурсів, так і за вартістю;

для інформаційного капіталу характерними є висока мобільність та швидкість морального старіння;

сучасні можливості тиражування, копіювання та розповсюдження інформації потребують її належного захисту на підприємстві, інакше існує висока ймовірність швидкої декапіталізації підприємства.

Для розробки методичних підходів до економічної інформації потрібна її класифікація. З точки зору оцінки економічну інформацію доцільно розділити на дві групи:

1) інформація, яка є товаром, інформаційним продуктом і призначена для реалізації стороннім споживачам у вигляді інформаційних послуг. Це: а) дані про суспільні економічні явища, процеси, події, стан економічного середовища, результати економічних досліджень тощо; б) науково-економічна інформація, що містить наукові знання, інформацію про управлінські ноу-хау фірм конкурентів;

в) нормативна інформація, що регламентує витрати матеріальних, трудових ресурсів, норми запасів, регламентні роботи та ін.; г) правова інформація про державне регулювання у певних сферах економічної діяльності; д) цінова інформація, що охоплює ціни, тарифи, розцінки; е) кон'юнктурна інформація про стан ринків різних видів продукції; є) економічні оцінки, які ґрунтуються на висновках провідних фахівців та експертів про економічні явища; ж) економічні прогнози, які базуються на використанні різних методів прогнозування, моделей, експериментів, розрахунків.

2) інформація призначена для управління підприємством. Відповідно до виконуваних функцій управління виділяють такі види інформації [5]: а) прогнозна інформація, що пов'язана з функцією прогнозування, вона відображає імовірнісні твердження про майбутній стан господарських процесів на підприємстві; б) планова інформація, пов'язана з функцією планування й описує господарські процеси, які можуть відбутися в заданому часовому періоді; в) облікова інформація, що пов'язана з функціями оперативного, бухгалтерського, статистичного обліку і відображає вже здійснені господарські процеси, а також фактичний стан виробництва; г) нормативна – пов'язана з функцією підготовки виробництва, що регламентує витрати матеріальних та трудових ресурсів, рівень запасів, послідовність технологічних процесів, вимоги щодо якості продукції та її контролю; д) цінова інформація – охоплює ціни, тарифи, розцінки (фактичні, договірні, преїскурантні, відпускні, оптові, роздрібні); е) довідникова інформація – призначена для деталізації господарських процесів, їх якісної характеристики, доповнення різними відомостями.

У сучасних умовах інформація, яка використовується у процесах управління виробництвом переважно функціонує у вигляді управлінських інформаційних систем. Управлінська інформаційна система – це комплекс пов'язаних між собою технічних та програмних елементів із приймання, накопичення, обробки, збереження, передавання інформації в певній функціональній сфері управління підприємства [4].

Управлінська інформація здебільшого існує у вигляді повідомлень, інформаційних масивів та інформаційних потоків.

Повідомлення – це сукупність інформації для вироблення судження про конкретний процес, явище, факт.

Інформаційний масив – структурна одиниця інформації, яка об'єднує певну номенклатуру інформаційних повідомлень, однозначних за формою, але різних за змістом, що стосуються виокремлених характеристик сутностей явищ, подій, господарських ситуацій.

Інформаційний потік – сукупність масивів, що стосуються конкретної управлінської функції і передаються певним інформаційним каналом. Інформаційні потоки циркулюють на підприємстві в горизонтальному і вертикальному напрямі. Горизонтальні інформаційні потоки забезпечують, в основному, процеси виробництва. Вертикальні –

процеси управління. Економічна інформація в управлінні є ефективною, коли вона існує, здебільшого, у вигляді інформаційних потоків.

Інформація практично реалізується у вигляді баз даних і баз знань, які складають основу сучасних інформаційних технологій управління [3].

Економічна інформація повинна відповідати певним вимогам. Вона повинна бути достовірною, повною, своєчасною, зрозумілою.

Інформація достовірна, якщо вона не спотворює існуючий стан справ. Недостовірна призводить до неправильного розуміння і прийняття некоректних управлінських рішень.

Інформація вважається повною, якщо вона відображає основні сутнісні характеристики явища і відповідає вимогам щодо її об'єму.

Своєчасною вважається інформація, яка поставляється споживачу у потрібний момент часу. Запізнена інформація втрачає практичне значення.

Зрозумілість інформації означає, що вона повинна мати такі форму подачі і зміст, щоб ті для кого вона призначена, змогли досягнути її сутність і зміст.

Ці властивості інформації визначають її цінність, а, відповідно, і вартість.

Під час оцінки вартості інформації першої групи можливе застосування широкого спектру методів, які використовують під час оцінки нематеріальних активів [8, 11, 12, 13], а саме: метод вартості створення, метод ціни придбання, метод дисконтування грошових потоків, метод капіталізації грошового потоку, метод переваги в доходах, метод виграшу у витратах, метод надлишкових грошових потоків. Доцільно розглянути можливості застосування і адаптації цих методів щодо оцінки економічної інформації.

Найбільш простим з точки зору практичної реалізації є *метод вартості створення*, який передбачає, що нематеріальні активи вартують стільки ж, як і витрати на їх створення. У разі застосування даного методу, насамперед, необхідно встановити трудомісткість створення економічної інформації. З цією метою можна використовувати нормативи трудомісткості, наведені у галузевих документах, стандартах підприємств. Встановивши трудомісткість створення економічної інформації, розраховуються витрати на її отримання із застосуванням відповідних нормативних документів. Оскільки діяльність із отримання інформації є за характером близькою до науково-дослідницької, доцільно використовувати „Методичні рекомендації по застосуванню Положення (стандарту) бухгалтерського обліку 16 „Витрати” при визначенні вартості науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт” (затверджені наказом Міністерства освіти і науки України від 13.03.2001 р. № 119).

Згідно з цими методичними рекомендаціями до складу витрат включаються: витрати на оплату праці; відрахування на соціальні заходи; матеріали; паливо і енергія для проведення науково-дослідних робіт; витрати на службові відрядження; витрати на роботи, які виконують

сторонні організації, підприємства та установи; інші прями витрати; загальнопромислові витрати; адміністративні витрати; інші операційні витрати. Окрім того, для остаточного визначення вартості створення економічної інформації необхідно врахувати нормативний рівень рентабельності.

В основі методу *ціни придбання* покладено ціни економічної інформації, створеної у минулому і не представленої у даний час на ринку. Оцінка вартості методом ціни придбання здійснюється з урахуванням часу користування інформацією. При цьому необхідно врахувати, що, з одного боку, вартість економічної інформації збільшується у результаті інфляції, а з іншого боку, може зменшуватися в результаті зношування, що можна представити такою формулою [8, с. 62]

$$BEI = C_{np} \cdot I \cdot (1 - Z_{HA}), \quad (1)$$

де: BEI – вартість економічної інформації, визначена методом ціни придбання; C_{np} – ціна придбання економічної інформації; I – сукупний індекс інфляції з моменту придбання економічної інформації до дати оцінки; Z_{HA} – величина зношування оцінюваної економічної інформації.

Ціна придбання нематеріального активу (первісна вартість) відображається у відповідних бухгалтерських документах.

Індекс інфляції розраховується щомісяця Держкомстатом, і його значення можна знайти на сайті www.akadem.kiev.ua. У табл. 1 наведені значення індексів інфляції за період 2004-2009 р.р.

Табл. 1. Індеси інфляції

Місяць	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Січень	1,014	1,017	1,012	1,005	1,029	1,029
Лютий	1,004	1,01	1,018	1,006	1,027	1,015
Березень	1,004	1,016	0,997	1,002	1,038	1,014
Квітень	1,007	1,007	0,996	1,000	1,031	1,009
Травень	1,007	1,006	1,005	1,006	1,013	1,005
Червень	1,007	1,006	1,001	1,022	1,008	1,011
Липень	1,000	1,003	1,009	1,014	0,995	0,999
Серпень	0,999	1	1,000	1,006	0,999	0,998
Вересень	1,013	1,004	1,02	1,029	1,017	1,008
Жовтень	1,022	1,009	1,026	1,029	1,017	
Листопад	1,016	1,012	1,018	1,022	1,015	
Грудень	1,024	1,009	1,009	1,021	1,021	
Всього за рік	1,123	1,103	1,116	1,166	1,223	

Оцінку рівня зношування можливо здійснити на основі експертних суджень фахівців конкретної області знань, у якій застосовується економічна інформація. При цьому можлива організація експертного опитування на основі якісних оцінок, що відтак приводяться до кількісних показників. Така процедура може проводитися з використанням таблиці кількісних і якісних показників зношування (табл. 2) [8].

Табл. 2. Оцінка коефіцієнта зношування економічної інформації

Якісне значення зношування	Кількісне значення зношування, в частках одиниці
дуже низьке	0,0...0,1
низьке	0,1...0,3
середнє	0,3...0,5
досить високе	0,5...0,8
високе	0,8...1,0

Під час оцінки деяких видів економічної інформації її вартість доцільно визначати не зважаючи на рівень зношування. Йдеться, насамперед, про суспільні економічні явища, процеси, події, науково-економічну інформацію.

Метод дисконтування грошових потоків передбачає, що вартість економічної інформації буде дорівнювати теперішній вартості майбутніх грошових потоків від використання економічної інформації. Розрахунок вартості економічної інформації (BEI) здійснюється за формулою

$$BEI = \frac{D_1}{(1+r)^1} + \frac{D_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{D_t}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

де: D_1, D_2, \dots, D_t – грошові потоки від використання економічної інформації за період t ; t – термін корисного використання економічної інформації; r – ставка дисконту, яка повинна визначатись з врахуванням умов діяльності підприємств для яких використовується економічна інформація [12].

Суттєвими особливостями методу є прогнозування величини грошових потоків впродовж можливого терміну корисного використання економічної інформації. Під час розрахунку грошових потоків необхідно врахувати доходи, які приносяться тільки завдяки економічній інформації, а не всіма активами, що використовуються для отримання доходів. Складність виділення таких доходів є суттєвим обмеженням для застосування даного методу.

У випадку, коли термін корисного використання економічної інформації є достатньо тривалим (20 і більше років), і, окрім того, грошовий потік від її використання є постійним, для оцінки може використовуватися метод капіталізації грошового потоку.

Формула для визначення вартості економічної інформації в цьому випадку має такий вигляд

$$BEI = \frac{D_{пост}}{k}, \quad (3)$$

де: $D_{пост}$ – постійний грошовий потік від використання економічної інформації; k – коефіцієнт капіталізації, який дає змогу перетворити (капіталізувати) грошовий потік у вартість і в даному випадку збігається зі ставкою дисконту.

Оскільки метод капіталізації є частковим випадком методу дисконтування, то всі його проблеми та обмеження притаманні і цьому методу.

Метод переваги в доходах полягає в розрахунку різниці між грошовим потоками, отриманим за допомогою використання економічної інформації, і грошовими потоками, отриманими без її використання.

Вартість економічної інформації в цьому випадку буде визначатися за формулою

$$BEI = \frac{\Delta D_1}{(1+r)^1} + \frac{\Delta D_2}{(1+r)^2} + \dots + \frac{\Delta D_t}{(1+r)^t}, \quad (4)$$

де $\Delta D_1, \dots, \Delta D_t$ – переваги в доходах за період корисного використання економічної інформації.

Переваги в доходах визначаються як різниця між грошовими потоками від реалізації продукції підприємства з і без використання даного виду економічної інформації.

Якщо прогнозується, що перевага в доходах буде отримуватись протягом тривалого періоду в постійних розмірах, то вартість економічної інформації може бути розрахована за методом прямої капіталізації за формулою

$$BEI = \frac{\Delta D_{ном}}{k}, \quad (5)$$

де $\Delta D_{ном}$ – постійна перевага в доходах, що зумовлена економічною інформацією.

Метод виграшу у витратах є різновидом методу переваг у доходах. Вартість економічної інформації в цьому випадку визначається шляхом розрахунку економії на витратах, яку отримують у разі використання економічної інформації.

Метод надлишкових грошових потоків базується на тому, що приріст вартості активів забезпечується економічною інформацією. Розрахунок вартості здійснюється за формулою

$$BEI = \frac{D_{ном} - B_A \cdot P_{CP}}{k}, \quad (6)$$

де: $D_{ном}$ – нормалізований грошовий потік для даного підприємства; B_A – ринкова вартість матеріальних активів підприємства; P_{CP} – середньогалузева рентабельність активів в частинах одиниці; k – коефіцієнт капіталізації.

При оцінці економічної інформації другої групи найбільш доцільним бачиться застосування методів вартості створення та економічних вигод.

Застосування методу вартості створення для інформації, яка використовується в управлінні виробництвом, нічим особливим не вирізняється від описаного вище. Необхідно тільки чітко виокремлювати витрати, які дійсно мають місце при створенні даного виду інформації.

Проте, даний метод має суттєвий недолік, який виражається у тому, що не враховується корисність та можливі синергетичні ефекти, які можуть мати місце у разі використання економічної інформації одночасно з іншими матеріальними та нематеріальними активами. Виходячи з цього, найбільш перспективним для оцінки управлінської економічної інформації бачиться застосування методу економічних вигод, який за сутністю є різновидом дохідного підходу. У разі його застосування основна проблема полягає у виокремленні економічних вигод, які зумовлює даний вид економічної інформації та виділенні ренти, яка створюється економічною інформацією у складі інформаційного капіталу. Пропонується така загальна формула для визначення вартості економічної інформації

$$BEI = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n [\Delta E_{it} - k_{\phi} (V_{озt} + V_{наt})] / (1+r)^t - \sum_{k=0}^K I_k (1+r)^k, \quad (7)$$

де: ΔE_{it} – величина i -го виду економічної вигоди, що виникає від використання економічної інформації у різних аспектах господарської діяльності підприємства і визначається як різниця між величиною доходів, витрат, економії і т. п., які існували до і присутні після використання економічної інформації. Методичні підходи до визначення величини численних видів економічних вигод, які можуть виникати у господарській діяльності підприємств від використання різних видів нематеріальних активів описані у роботах [8, 13];

k_{ϕ} – фондовіддача у галузі економіки, до якої відноситься дане підприємство (можна використати дані ФДМ України [12]);

$V_{озt}$ – справедлива вартість основних засобів (комп'ютери, засоби сканування, друкування, передавання інформації), які використовуються в інформаційній системі для забезпечення даним видом економічної інформації в t -му році;

$V_{наt}$ – справедлива вартість нематеріальних активів (програмне забезпечення), які використовуються для створення даного виду економічної інформації в t -му році;

I_k – інвестиційні витрати у створення інформаційної системи в t -му році;

r – ставка дисконту, визначення якої для даного підприємства можливе з використанням методичного підходу поданого у роботі [15];

n – кількість видів економічних вигод у різних аспектах господарської діяльності підприємства;

t – поточний рік одержання економічних вигод;

T – рік закінчення корисного використання економічної інформації;

k – рік початку інвестування у створення інформаційної системи;

K – рік закінчення інвестування у створення та підтримку інформаційної системи.

При застосуванні даної формули основну увагу необхідно звернути на виявлення і відслідковування можливих численних економічних вигод від використання економічної інформації, встановлення термінів їх проявів, оскільки вартість економічної інформації динамічно змінюється і підлягає швидкому моральному старінню.

Висновки та перспективи подальших наукових досліджень. Розглянуто дефініцію інформаційного капіталу та виокремлено його характерні ознаки. Здійснено класифікацію економічної інформації, а також аналіз можливостей використання методичних підходів з оцінки нематеріальних активів стосовно окремих видів економічної інформації. Запропоновано методологію оцінки економічної інформації, яка використовується у складі інформаційних технологій в управлінні підприємством на основі концепції економічних вигод. Необхідні подальші дослідження із вдосконалення методики визначення економічних вигод, які спричиняють різні види економічної інформації.

Література

1. Реймерс Н.Ф. Природопользование: Словарь-справочник / Н.Ф. Реймерс. – М.: Мысль, 1990. – 637 с.
2. Мельник Л.Г. Экономика информации и информационные системы предприятия: учебн. пособ. / Л.Г. Мельник, Л.Н. Иляшенко, В.А. Касьяненко. – Сумы, 2004. – 355 с.
3. Экономика предприятия: навч. посібник / [Й.М. Петрович, А.Ф. Кіт, Г.М. Захарчин та ін.]; за ред. Петровича Й. М. – Львів: Магнолія 2006, 2008. – 580 с.
4. Гушко С.В. Управлінські інформаційні системи: навч. посібник / С.В. Гушко, А.В. Шайкан. – Львів: Магнолія Плюс, 2006. – 320 с.
5. Інформаційні системи і технології в економіці: навч. посібн. / [В.С. Пономаренко, Р.К. Бутова, І.В. Журавльова та ін.]; за ред. Пономаренко В.С. – К.: Видавничий центр «Академія», 2002. – 544 с. (Альма-матер).
6. Шевчук О.Б. Інформаційний капітал: його сутність і види / О.Б. Шевчук // Економічна теорія. – 2005. – № 2. – С. 41-48.
7. Яремко І.Й. Оцінка капіталу підприємства: інформаційне забезпечення вартісно-орієнтованої концепції управління підприємством: монографія / І.Й. Яремко. – Львів: Новий світ – 2000, 2005. – 236 с.
8. Мендрул А.Г. Оценка стоимости нематериальных активов / А.Г. Мендрул, В.С. Ларцев. – К.: ООО «Полиграф-Информ», 2004. – 264 с.
9. Про інформацію. [Інтернет-ресурс]. – Режим доступу: <http://zakon.rada.gov.ua>. – (Закон України).
10. Шуть О.Н. Информация и направления ее использования в экономике / О.Н. Шуть // [Інтернет-ресурс]. – Режим доступу: <http://creativeconomy.ru/library/prd162/php>.
11. Витвицький Я.С. Економічна оцінка геологічної інформації нафтогазових компаній / Я.С. Витвицький // Науковий вісник Івано-

Франківського національного технічного університету нафти і газу. – 2008. – № 1 (17). – С. 128-133.

12. Витвицький Я.С. Економічна оцінка гірничого капіталу нафтогазових компаній: наукова монографія / Я.С. Витвицький. – Івано-Франківськ: Факел, 2007. – 431 с.
13. Оценка имущества и имущественных прав в Украине: монографія. Изд. второе, перер. и доп. / [Н.П. Лебедь, А.Г. Мендрул, В.С. Ларцев и др.]; под ред. Н.П. Лебедь. – К.: ООО «Информационно-издательская фирма «Принт-Экспресс», 2003. – 715 с.
14. Наказ ФДМУ від 5 лютого 2004 р. № 236 / Державний інформаційний бюлетень про приватизацію. – К.: ФДМУ, 2004. – № 4. – С. 51. – (Нормативний документ Фонду державного майна України. Наказ).
15. Витвицький Я.С. До питання визначення ставки дисконту при оцінці бізнесу / Я.С. Витвицький, У.Я. Витвицька // Державний інформаційний бюлетень про приватизацію. – К.: ФДМУ, 2006. – № 9. – С. 24-27.

Стаття поступила в редакційну колегію 20.10.2009 р.

Рекомендовано до друку д.е.н., професором Данилюком М.О.

ESTIMATION OF ECONOMIC INFORMATION

Y. S. Vytvycky, O. M. Vytvytska, N. V. Balashova

Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas;

76019, Ivano-Frankivsk, Carpats'ka street, 15;

e-mail: econpid@nung.edu.ua

The role of information is rotined in functioning of enterprises in modern terms. Défíniciyu of informative capital is given and he is selected characteristic signs. Classification of types of economic information is carried out from the point of view the estimation of its cost. The methodical going is considered near the estimation of economic information which is offered to the users as informative services. For the estimation of economic information which is used in a management an enterprise, methodical approach is offered on the basis of conception of economic values.

Key words: economic information, informative capital, classification of economic information, estimation, economic values.

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО РЕФОРМИ СИСТЕМИ ОХОРОНИ ЗДОРОВ'Я В УКРАЇНІ

Т. М. Орищин, О. М. Орищин

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, Карпатська, 15;
тел. +380 (342) 50-45-74; e-mail: fin.@nuing.if.ua*

Розвиток страхової медицини є одним з актуальних і перспективних напрямів вирішення проблем фінансування охорони здоров'я. Метою перетворень в існуючій системі охорони здоров'я є створення ринку медичних послуг при дотриманні принципу задоволення потреб населення в медичній допомозі. У реформуванні системи медичного забезпечення в Україні є раціональною реструктуризація існуючої мережі закладів охорони здоров'я і прогнозування чисельності медичного персоналу у відповідності з обсягом запланованої роботи і потребами населення в медичній допомозі.

Ключові слова: *медичне обслуговування, охорона здоров'я, страхування, реформування, система медичного забезпечення.*

На сучасному етапі розвитку Національної системи охорони здоров'я України, котрий згідно з обнародованим проектом Закону України "Про страхову медицину" передбачає трансформацію її із державної (бюджетної) системи в систему медичного страхування з подальшим розвитком альтернативної форми медико-санітарного забезпечення населення, особливої актуальності набувають питання етапності запровадження та розвитку цього нововведення і методологічного забезпечення перетворень у галузі охорони здоров'я.

Метою перетворень, які проводяться і плануються в існуючій системі охорони здоров'я, є створення ринку медичних послуг при дотриманні принципу задоволення потреб населення в медичній допомозі.

Реформування існуючої системи охорони здоров'я в країні є питанням як економічного, так і політичного характеру. Тому держава повинна вирішувати його шляхом інтенсивної зміни законодавства та нормативних актів.

Реформа системи охорони здоров'я повинна обов'язково вирішити принаймні дві основні проблеми: стимулювання праці лікаря за рахунок залежності рівня його оплати від результатів лікування та розвиток конкуренції між державними і приватними закладами охорони, здоров'я.

Враховуючи як вітчизняний, так і зарубіжний досвід, програми створення медичних систем повинні передбачити захист інтересів працівників у збереженні страхових внесків шляхом розроблення правил функціонування фінансового ринку, в тому числі правил інвестування капіталу, обов'язкового бухгалтерського обліку діяльності страхових організацій та їх відповідальності перед страхувальниками у разі збитків

або високої інфляції, які мають дуже високу ймовірність під час кризи в економіці [1, 2, 4]. Фінансовий крах систем медичного страхування на етапі ринкових реформ може підірвати не тільки довіру до цих систем, але і до реформ в цілому.

Важливим кроком у реформуванні систем охорони здоров'я є готовність сприймати плюралістичний підхід: допустити до участі у наданні медичних послуг приватних структур, сконцентрувавши державне втручання на автентично колективних благах та послугах. Однак, як це було з'ясовано раніше, держава також може вибрати шлях субсидування споживання благ найбільш нужденних прошарках населення.

Як свідчить світовий досвід, реформування системи охорони здоров'я повинно послідовно передбачати:

- проведення розподілу між видами діяльності, які можуть фінансуватися та здійснюватися повністю за рахунок приватних ринків, і тими, що характеризуються важливими колективними елементами, та започаткування звільнення від надмірного тягаря інших;
- проведення розподілу між тими колективними видами діяльності, контроль за якими має залишатися у держави, й тими послугами, фінансування яких повинно бути державним, а надання – приватним, – через систему контрактів та аналогічних механізмів, які сприяють "наведенню мостів" між державним і приватним сектором;
- використання нових можливостей між різноманітними послугами, які можуть бути надані приватним сектором;
- доступність інформації про використання коштів та коштів страхування на охорону здоров'я;
- надання "права голосу" споживачам медичних послуг [6].

Таким чином, реформування систем охорони здоров'я і створення, зокрема, медичного страхування потребує ретельного обслуговування та суспільного контролю з метою обслуговування населення країни.

Невідкладною проблемою системи охорони здоров'я України є вдоволення управління галуззю на всіх рівнях. Це означає модернізацію інфраструктури, опрацювання системи визначення пріоритетів, аналіз і обґрунтування політики в галузі медичного забезпечення, об'єктивність і справедливість під час розподілу ресурсів, формування бюджету та встановлення вартості медичних послуг.

Однак, глибокий дефіцит фінансових коштів у системі медичного забезпечення пов'язані, в першу чергу, з економічною кризою в Україні, не дозволяє цілеспрямовано проводити в системі охорони здоров'я економічні перетворення. Частка валового внутрішнього продукту в державі ще не скоро збільшиться, а тому процес реформування може значно затягнутися.

У такій фінансовій скруті постанови Кабінету Міністрів України №1138 від 17 вересня 1996 року "Про затвердження переліку платних послуг, які надаються в державних закладах охорони здоров'я та вищих медичних закладах освіти" та №449 від 12 травня 1997 року "Про внесення змін та доповнень до постанови Кабінету Міністрів України від 17 вересня 1996 року №1138" не в силі створити тенденцію до суттєвого збільшення частки платних медичних послуг у загальній структурі грошових засобів, які надходять на охорону здоров'я. І цей захід був би

більш ефективним, якби з нього був знятий до розумних меж податковий прес.

У зв'язку з цим, основною метою реформування системи охорони здоров'я в Україні є вирішення найгострішої проблеми – це її фінансування. Через це ідея запровадження обов'язкового медичного страхування (ОМС), що передбачає додаткові джерела фінансування за рахунок відповідних додаткових відрахувань, отримала значну підтримку з боку управлінців охорони здоров'я різних рівнів та медичної громадськості.

Ідея обов'язкового медичного страхування передбачає запровадження товарно-ринкових відносин в медичному забезпеченні у взаємовідносинах між страхувальниками, застрахованими, споживачами і виробниками медичних послуг, що вимагає як докорінної перебудови державної системи охорони здоров'я, так і відповідного ламання стереотипів соціалістичного світогляду, який сформувався у всіх учасників процесу реформування галузі [7].

Перехід до ринкових відносин у медичному забезпеченні повинен здійснюватися еволюційним шляхом, а зміни у системі охорони здоров'я повинні відбуватися одночасно зі змінами у суспільстві, і віддзеркалювати процеси гуманізації медичної допомоги. Однак, недостатня увага як з боку самої галузі, так і держави до інформаційної психологічної та кадрової підготовки виконавців запровадження системи обов'язкового медичного страхування негативно впливає на формування думки щодо нововведення та зацікавленості у проведенні самої реформи, що значно знижує активність впровадження.

Під час проведення реформи існує небезпека, що деякі принципи попередньої системи охорони здоров'я, такі як загальна охоплюваність, вільний доступ, медична статистика, санітарно-епідеміологічна служба можуть втратити свою актуальність. Надання всьому населенню прав на кваліфіковане медичне обслуговування є одним із найбільш цінних досягнень соціалістичної системи охорони здоров'я. Ніде в світі, навіть в Західній Європі, ніколи не вдавалося домогтись повного охоплення кваліфікованою медичною допомогою таких великих за чисельністю верств населення. Збереження такого спадку повинно стати одним із найвищих пріоритетів держави.

У реформуванні системи медичного забезпечення в Україні є раціональною реструктуризація існуючої мережі закладів охорони здоров'я і прогнозування чисельності медичного персоналу у відповідності з обсягом запланованої роботи і потребами населення в медичній допомозі [7].

Це зумовлено, перш за все, тим, що сучасні економічні механізми вимагають відповідної оплати надання медичних послуг, а не утримання медичних закладів, котрі є здебільшого напівзаповнені, і то непрофільними пацієнтами, що особливо актуальне в умовах нестатків. Кількість надання послуг у наданий час через економічне кризове становище більшості працездатного і непрацездатного населення амбулаторно-поліклінічних закладів, скорочення обсягів госпіталізації, так і зниження якості медичних послуг.

У той же час слід констатувати, що склад відвідувачів в амбулаторно-поліклінічних закладах (АПЗ) змінився, зросла частка пацієнтів з

тяжкими захворюваннями, а відмова від повторних відвідувань, своєчасної госпіталізації у більшості випадків призводить до хронізації патологічних процесів, появи ускладнень. Приблизно така ж картина спостерігається і в стаціонарах, де на фоні зменшення загального обсягу госпіталізації (рівня госпітальної допомоги і середньої тривалості лікування) в складі хворих переважає госпіталізовані з більш тяжкими захворюваннями. А зростання частки госпіталізації в ургентному порядку також вимагає диференційного підходу до визначення потреби в ліжках різного профілю та їх збереження на перспективу.

Незадоволеність доступністю і якістю медичної допомоги з боку споживачів медичних послуг поєдналося з ростом невдоволеності медичних працівників умовами праці, рівнем та регулярністю отримання заробітної платні, відношенням до їх професійного рівня в суспільстві, безпорадністю ряду керівників системи охорони здоров'я; медичні працівники опинилися в ситуації неможливості виконання прямих професійних обов'язків.

Така ситуація в Україні зумовлена спадком попередньої державної системи з її залишковим принципом фінансування охорони здоров'я, де основна перевага в медичному забезпеченні надавалась стаціонарній допомозі та її спеціалізованим видам. У той же час, профілактичний напрямок у минулій системі охорони здоров'я мав декларативний і популістський характер, а система первинної медико-санітарної допомоги з усіма її перевагами була практично відсутня.

Основним етапом у реформуванні охорони здоров'я є перенесення акцентів у системі медичного забезпечення населення зі стаціонарної медичної допомоги на її амбулаторно-поліклінічну ланку і створення в державі належної системи певної медико-санітарної допомоги, де головною фігурою буде лікар загальної практики (сімейний лікар). Це дозволить медичному персоналу АПЗ проявити активність у виявленні і попередженні захворювань серед населення. Такий методичний підхід у реформуванні системи охорони здоров'я значно розширить медико-санітарне забезпечення хворих в амбулаторно-поліклінічних закладах і домашніх умовах [8].

Збільшення частки осіб, які звернуться за медичною допомогою з більш складними та хронічними захворюваннями до дільничного лікаря (лікаря загальної практики) призведе до ще більших затрат праці медичного персоналу теперішніх АПЗ з розрахунку на кожен випадок поліклінічного обслуговування. Однак навіть такий варіант у більшості випадків є дешевим для бюджету держави, ніж госпіталізація таких хворих до стаціонарів лікарень.

Важливе значення матиме також підготовка територіальних програм медичної допомоги населенню. А це – один із етапів реформи охорони здоров'я на конкретній території. І основним з них буде створення механізму запровадження страхової медицини. Місцевим виконавчим органом різних рівнів доцільно виступили в ролі засновників або співзасновників страхових медичних організацій з обов'язкового медичного страхування населення територій, і це забезпечить суттєвий контроль за їх діяльністю [5].

Наступним етапом впровадження обов'язкового медичного страхування у систему впровадження обов'язкового медичного страхування у систему медичного забезпечення є вибір підходів і визначення мінімальної розрахункової одиниці (показника) до фінансування медичних закладів у системі ОМС з урахуванням певних вимог і, перш за все, наявності статистичної і нормативної забезпеченості цього показника.

Система охорони здоров'я ніколи не була сферою, тому останнім часом під час вирішення фінансових питань та економічних трактувань все частіше користуються поняттям, «медична послуга», котра, на нашу думку, і повинна бути розрахунковою одиницею щодо лікувально-профілактичних закладів як суб'єктів медичного страхування. Однак, під медичною послугою доцільно розуміти не тільки елемент надання медичної допомоги (дослідження, маніпуляція, консультація тощо), а і певний комплекс цих елементів, що здійснюються пацієнтом в ході всього лікувально-діагностичного процесу [3].

Оскільки медичні послуги надаються споживачеві, то і виходить у визначенні цього поняття доцільно з того, що потрібно конкретному споживачу від виробника, котрим є медичний заклад з його персоналом. Цілком очевидно, що здебільшого споживачеві потрібно не чисте число відвідувань, ліжко-днів, тих чи інших маніпуляцій, а перш за все, покращення стану його здоров'я, через що він і звернувся за медичною допомогою.

Отже, як медичну послугу правомірно розглядати весь комплекс лікувально-діагностичних та профільних заходів, наданих медичним закладом в кожному випадку звертатися пацієнта до завершення надання медичної допомоги на даному етапі, тобто закінчені випадки госпіталізації, поліклінічного обслуговування і т.д.

Показник фінансування лікувально-профілактичних закладів, що працюють у системі обов'язкового медичного страхування, за надану медичну допомогу застрахованим повинен бути статистично забезпеченим, мати власну нормативну базу і достатню зручність для застосування без необхідності створення громіздкої системи контролю, забезпечувати можливість вибору медичних технологій і зберігання індивідуального підходу до хворого.

Тільки після вибору показника фінансування доцільно приступити до наступного етапу роботи – розрахунку тарифу для надання амбулаторно-поліклінічної і стаціонарної допомоги за витратами праці на той чи інший вид роботи з використанням переважно галузевих показників, а також місцевих норм і нормативів з праці.

Певні складності під час розрахунку тарифів виникнуть у зв'язку з обліком фінансових статей витрат, що пов'язані із забезпеченням харчування та медикаментів. Фактичні витрати за цими статтями істотно перевищать нормативні показники, не дивлячись на їх індексацію з урахуванням офіційно встановлених коефіцієнтів росту споживчих цін. Тому рішення про джерела відшкодування цих витрат повинне прийматися по кожній території окремо залежно від конкретної її економічної ситуації та відпрацювання механізму придбання лікарських засобів (ПЛЗ) [3].

Механізм розподілу отримання органами та закладами системи охорони здоров'я засобів повинен враховувати диференційну оцінку об-

сягу, складності і якості виконання роботи як в окремих підрозділах, так і конкретними медичними працівниками. Це сприятиме тільки більш тісному зв'язку цих показників з оплатою праці медичного персоналу.

Правильно розрахована тарифна ставка забезпечує фінансову стійкість страхових операцій. Визначення необхідного розміру страхових тарифів із обов'язкового медичного страхування надзвичайно важливе для формування і використання фондів страхування, їх подальшого розподілу і перерозподілу, науково обґрунтовані страхові тарифи забезпечують оптимальний розмір страхового тарифу.

Метою дослідження вчених є розробка методичних підходів для визначення розміру страхових тарифів обов'язкового медичного страхування і встановлення необхідного обсягу страхового фонду із цього виду страхування.

Спеціалістами пропонується поетапний підхід до визначення розмірів фонду обов'язкового медичного страхування, що є найоптимальнішим у сучасних умовах. На першому етапі розробляється територіальна програма обов'язкового медичного страхування, де медична допомога диференціюється за видами: первинна медико-санітарна допомога включає швидку і невідкладну допомогу, амбулаторно-поліклінічну допомогу дорослому населенню, дітям, стоматологічну допомогу; стаціонарна медична допомога передбачається при гострих захворюваннях і станах, які загрожують життю хворого, нещасних випадках, загостреннях хронічних захворювань; забезпечення лікарською допомогою.

Другий етап полягає у визначенні обсягу медичних послуг на один рік на одного пацієнта, що звернувся: за швидкою медичною допомогою; за лікувально-профілактичною допомогою в амбулаторно-поліклінічній установі, враховуючи лікарів-стоматологів; у стаціонарі.

Третій етап – це розрахунок вартості кожної медичної послуги, вміщеної до класифікатора. Вартість медичної послуги розраховується на основі собівартості, при калькулюванні проводиться такий розрахунок затрат: заробітна плата, нарахування на заробітну плату; загально-установчі витрати; амортизаційні відрахування на медичне обладнання; затрати на медикаменти (для забезпечення належної якості медичної допомоги), які розраховуються на основі розробленого еталону медикаментозного забезпечення кожної послуги), витрати на харчування (для стаціонарів).

Четвертий етап передбачає визначення вартості обсягу курсу (закінченого, незакінченого) медичної допомоги, наданої в амбулаторно-поліклінічних чи стаціонарних умовах, швидкої медичної допомоги кожному, хто звернувся протягом року. Вартість обсягу медичної допомоги в амбулаторно-поліклінічних умовах враховує вартість профілактичних, оздоровчих і диспансерних заходів, вартість послуг, які надаються лікарями-стоматологами.

На п'ятому етапі розраховується розмір тарифної ставки. Тарифна ставка, яка лежить в основі страхового внеску, називається брутто-ставкою. Вона складається із сукупної нетто-ставки і навантаження.

Сукупна нетто-ставка призначена для формування страхового фонду і його основної частини – ризикової нетто-ставки. В основу розрахунку ризикової нетто-ставки покладена вартість курсу лікування і ймові-

рність настання страхового випадку. На основі п'ятирічної статистики й експертної оцінки визначається ймовірність звернення в амбулаторно-поліклінічні та стаціонарні установи, ймовірність виклику швидкої допомоги. Ризикова нетто-ставка виражає частину страхового внеску в грошовій формі, яка призначена для покриття ризику.

Під час аналізу ймовірності звернення за різноманітними видами медичної допомоги визначається її варіативність для компенсації можливих відхилень. Окрім ризикової премії, розраховується гарантійне або стабілізаційне навантаження. Ризикове навантаження призначене для компенсації можливого підвищення витрат (у зв'язку із зростанням захворюваності) медичних установ за надану медичну допомогу. Ризикове навантаження призначене для формування запасного фонду. Прибуток у структурі тарифної ставки не закладається.

Актуальною проблемою в умовах функціонування системи обов'язкового медичного страхування є виконання державних гарантій щодо забезпечення населення медичною і лікарською допомогою, іншими послугами, передбаченими базовою програмою обов'язкового медичного страхування. Дисбаланс, який склався між акумульованими на територіях фінансовими коштами системи ОМС, потребує адекватних заходів з боку органів державної влади й управління охороною здоров'я. Досвід функціонування системи ОМС свідчить про необхідність використання актуальних розрахунків і змін методичних підходів до фінансово-економічного обґрунтування вартості програми обов'язкового медичного страхування [7].

Згідно з теорією актуальних розрахунків при формуванні страхових тарифів початковим елементом є вартість об'єкта, що страхується, а кінцевим – брутто-ставка, тоді як при обов'язковому медичному страхуванні початковим елементом є страховий фонд, а кінцевим – вартість медичної допомоги, яка не може бути повністю відшкодована, що дає підстави говорити про формування залишкового принципу фінансування лікувально-профілактичних закладів, які функціонують у системі ОМС. В умовах фінансового дефіциту ідея підвищення ефективності й якості надання медичної допомоги стає ілюзією. Не менш очевидний негативний соціальний і політичний ефект: зростає незадоволення населення системою медичного страхування. Практика функціонування закладів охорони здоров'я потребує під час розробки програм обов'язкового і добровільного медичного страхування, цільових програм чіткого розмежування переліку медичних послуг і джерел їх фінансування: бюджет (муніципальний, регіональний), кошти ОМС, кошти добровільного медичного страхування, власні кошти громадян.

Правильно розрахований страховий тариф разом з іншими параметрами визначає фінансову стійкість системи обов'язкового медичного страхування і дає змогу страхувальнику бути впевненим у виконанні страховиком взятих на себе зобов'язань.

Далі необхідно визначити потребу населення в наданні лікувально-профілактичної допомоги, але на основі переліку медичних послуг, що входять до медичних стандартів, забезпечуючи якість наданої медичної допомоги. Класифікатор медичних послуг (маніпуляцій, операцій, процедур, досліджень) повинен складатися з врахуванням економічно доці-

льних методик і технологій, адекватних рівню розвитку сучасної науки. На основі такої інформації визначається вартість лікувально-профілактичної і лікарської допомоги (інших послуг), яка надається при захворюваннях, лікування яких оплачується із засобів системи ОМС (вміщених у програму обов'язкового медичного страхування), потім встановлюється ймовірність настання страхового випадку, звернення за медичною допомогою, необхідність проведення профілактичних заходів при даних захворюваннях.

Наступною складовою страхового тарифу є навантаження, в якому при обов'язковому медичному страхуванні необхідно врахувати витрати на утримання апарату управління територіального фонду ОМС і витрати на ведення справ страхових медичних організацій, а також резерв фінансування запобіжних заходів.

Успіх запровадження будь-якої схеми страхової медицини в системі державної охорони здоров'я повністю залежить від успішно широко розгорненої роз'яснювальної роботи серед майбутніх контингентів застрахованих та добровільної згоди певних груп населення, роботодавців різних форм власності купувати медичні послуги. Одночасно на кожному рівні управління охороною здоров'я доцільним є введення страхової медицини.

Страхова медицина (навіть за наявності передумов на територіях, створених новим господарським механізмом) не може бути введена на місцях до того терміну, який буде визначений Законом. Для включення страхової медицини до ринку медичних послуг і медичної допомоги, який формується, необхідний значний підготовчий період і попереднє вирішення багатьох юридичних, організаційно-фінансових, психологічних та інших проблем.

Тому необхідно терміново організувати систему навчання всіх категорій медичних працівників, скеровану на роз'яснення мети та завдань страхової медицини і використання її в професійній діяльності.

Висвітлені методологічні аспекти реформування системи охорони здоров'я за їх поетапного запровадження як на територіях, так і в Україні разом з відповідним законодавчим та методичним забезпеченням кожного з них, тільки сприятиме економічній зацікавленості функціонування закладів охорони здоров'я. Це дасть змогу зберегти і в подальшому розвивати сучасні організаційні та медичні технології, що буде соціальною гарантією забезпечення населення України медичною допомогою необхідного обсягу і якості.

Література

1. Губар О.Є. Медичне страхування в країнах Європейського союзу / О.Є. Губар // Фінанси України. – 2003. – №7. – С. 130-136.
2. Дейтти М.П. Реформа фінансування медичної допомоги – шлях до ефективного її функціонування / М.П. Дейтти // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. – 1999. – №2. – С. 141-143.
3. Камінська Т. Про економічну суть медичної послуги / Т. Камінська // Економіка України. – 2003. – №8. – С. 50-54.

4. Козмарк А. Реформи фінансування системи здравоохранения в Израиле / А. Козмарк // Пробл. соц. гигиены й история медицины. – 1994. – №5. – С. 45-46.
5. Колоденко В.О. Політика в області фінансової підтримки регіональних систем охорони здоров'я України. Міфи та реальність / В.О. Колоденко // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. – 2001. – №1. – С. 5-8.
6. Сучасні світові тенденції розвитку національних систем охорони здоров'я / Б.Д. Панов, А.А. Свірський, А.Ф., С.І. Конкін та ін. // Вісник соціальної гігієни та організації охорони здоров'я України. – 2001. – №4. – С. 86-87.
7. Петренко О. Фінансування системи охорони здоров'я в Україні через державці та місцеві бюджети / О. Петренко. – 2006. – №5. – С. 52-56.
8. Стратегічні напрями розвитку охорони здоров'я в Україні / за ред. Лехіна В.М. – К.: Сфера. – 2001. – 43 с.

Стаття постуила в редакційну колегію 09.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.е.н., професором Данилюком М.О.

THE METHODOLOGICAL APPROACHES TO THE REFORM OF THE SYSTEM HEALTH CARE IN UKRAINE.

T. M. Oryshchyn, O. M. Oryshchyn

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
tel. +380 (342) 50-45-74; e-mail: fin.@nung.if.ua*

Development of medical insurance is one of the most urgent and perspective direction of funding of public health care programs. The purpose of transformations to the existent system of health care is market of medical services creation at the observance of principle of satisfaction of necessities of population in medicare. In reformation of the system of the medical providing in Ukraine is restructuring of existent network of establishments of health care and rational prognostication of quantity of medical personnel in accordance with the volume of the planned work and necessities of population in medicare.

Key words: *medical service, health care, medical insurance, reformation, system of the medical providing.*

Рецензії, інформація

УДК 531/534+530.145.85

ПРО ПРАЦЮ ЕММАНУЇЛА ЧЕКАЛЮКА “ГНОСЕОЛОГІЧНИЙ ПОТЕНЦІАЛ КЛАСИЧНОЇ МЕХАНІКИ”

В. М. Мойсишин

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

У статті йдеться про рукописну роботу визначного українського ученого-нафтовика Е. Чекалюка “Гносеологічний потенціал класичної механіки”, в якій вперше до побудови класичної механіки залучено фундаментальний закон природи – загальний принцип збереження енергії. Деякі з наслідків, що випливають з такої концепції механіки, відрізняються від наслідків як традиційної механіки Ньютона, так і релятивістської механіки Ейнштейна.

Ключові слова: *загальний принцип збереження енергії, принцип збереження імпульсу, закон всесвітнього тяжіння І. Ньютона, класична механіка, релятивістська механіка.*

Видатний український учений-нафтовик, професор Еммануїл Богданович Чекалюк був людиною енциклопедичних знань. До кола його наукових зацікавлень входили підземна гідравліка, термодинаміка, генезис нафти і газу, пошуки і розвідка нафтових родовищ, розробка нафтових і газових родовищ, теплові методи видобутку нафти, геотехнологія підземної газифікації. Учений започаткував новий розділ у нафтовій геології – геотермодинаміку. Його технологію вилучення нафти водоорозчинником запатентовано в Англії, Канаді, Мексиці.

Одночасно з дослідженням проблем нафтогазової справи Еммануїл Чекалюк з перших років своєї виробничої і дослідницької діяльності захоплювався вивченням питань теоретичної механіки і фізики. Це й не дивно, адже у 1933 р. він закінчив електромеханічний факультет Львівської політехніки і перші кроки в науці зробив у галузі електрофізики. Так, ще у 1938 р. було опубліковано його першу статтю “Рівняння голошника” в польському журналі “Przegląd elektrotechniczny”. У 1975 р. на IX з’їзд термодинаміків (Жешув, Польща) він подає дві праці “Парадокс

Гібса в класичній термодинаміці” та “Стани рівноваги космічного водню”.

Але найбільш послідовно і вагомо свої погляди на проблеми природознавства вчений виклав у фундаментальній праці “Гносеологічний потенціал класичної механіки”, присвячений 300-річчю наукової діяльності І. Ньютона. На жаль, на сьогодні ця монографія здепонована у Всеросійському інституті науково-дослідної і технічної інформації (ВИНИТИ) проте ще декілька рукописних примірників є в учнів Е. Б. Чекалюка.

На часі видати цю унікальну книгу, щоб вона стала надбанням широких кіл наукової громадськості. Одним із завдань своєї доповіді бачу анонсування цього майбутнього видання, пробудження інтересу до нього.

Отже, у своїй монографії “Гносеологічний потенціал класичної механіки” проф. Е. Б. Чекалюк вказав на можливість побудови класичної механіки на основі загального принципу збереження енергії. У книзі розглядаються наслідки, що впливають з законів Ньютона, збагачених принципом збереження енергії. Деякі з них відрізняються від наслідків як традиційної механіки Ньютона, так і релятивістської механіки Ейнштейна, оскільки і в першій і в другій механіках загальний принцип збереження енергії не залучався в якості фундаментального начала. У такій постановці класична механіка набуває нового пізнавального (або, що те ж саме гносеологічного) потенціалу і може претендувати на самостійний розвиток.

Із розвитком та поширенням теорії відносності механіку Ньютона було оголошено граничним частинним випадком релятивістської механіки. Проф. Е. Б. Чекалюк переконливо довів, що у поєднанні з загальним законом збереження енергії механіка Ньютона набуває нових рис сучасної фізичної концепції, задовольняє запитам фізики та астрономії і заслуговує на повну реабілітацію. Виходячи з принципів такої механіки, можна вивести і пояснити чи не усі відомі на цей час явища без будь-яких протиріч і без єдиного парадоксального наслідку. Більшість таких висновків збігається з наслідками теорії відносності. Розбіжності виникають в інтерпретації цих наслідків і, як правило, в тих випадках, коли теорія відносності призводить до парадоксів. У вступі до монографії професор Е. Б. Чекалюк пише: “Механіка Ньютона в сучасному стані не може розглядатись частинним випадком релятивістської механіки. Вона, як і будь-яка інша концепція, наслідки якої не протирічать досвіду, має такі ж як і релятивістська механіка права для незалежного існування... Тільки шляхом експериментальної перевірки ... неузгоджених наслідків можна буде вияснити, яка з цих концепцій є кращою і точніше описує дійсність”.

Загалом зміст книги можна розбити на три частини: в першій йдеться про творчий доробок І. Ньютона та історію становлення закону збереження енергії; в другій – про суттєві зміни, які вносить принцип збереження енергії в механіку Ньютона, і наслідки, що виникають при

цьому; в третій – про методи експериментальної перевірки тих наслідків механіки Ньютона, які відрізняються від наслідків релятивістської механіки.

Розглянувши три основних начала класичної механіки: загальний принцип збереження енергії, принцип збереження імпульсу та закон всесвітнього тяжіння Ньютона, автор зупиняється на наслідках, що випливають з цих начал, акцентуючи увагу на тих з них, які відрізняються від наслідків традиційної механіки Ньютона і від наслідків релятивістської механіки Ейнштейна.

На сьогодні в науці уже викристалізувалось розуміння того, що закони збереження виходять далеко за межі механіки і відносяться до фундаментальних законів природи. Вони безпомилково “діють” в області елементарних частинок і в області космічних об’єктів, в фізиці атома і в фізиці твердого тіла та є одними з тих не багатьох, найбільш загальних законів, що лежать в основі сучасної фізики.

Повернемось до наслідків з основних начал класичної механіки. Це:

- взаємозв’язок між масою і енергією $E = mc_0^2$, де коефіцієнт c_0^2 проф. Е. Чекалюк трактує як універсальну фізичну константу, незалежну від швидкості світла;
- з позицій збереження загальної енергії та імпульсу запропоновано способи вимірювання абсолютної швидкості поступального руху;
- на основі принципів збереження енергії та імпульсу доведено, що періодичні процеси в рухомих системах реально уповільнюються. Це усуває всі так звані парадокси часу в механіці (наприклад, “неодночасності одночасних подій” або “кривини простору”);
- доведено, що явище гравітаційного колапсу, (т.б. згортання космічного утворення в “чорну діру”), з позицій збереження енергії є лише привабливою фантазією.

Автор детально зупиняється на виявлених перевагах класичної механіки над релятивістською. Так, зокрема, принципи класичної механіки вказують на те, що ми живемо в евклідовому просторі. Простір і час зв’язані між собою лишень через рух. Без руху неможливо вимірювати інтервали у просторі і часі. Релятивістський зв’язок між параметрами простору і часу впливає з єдиного припущення про релятивістське подовжнє скорочення рухомих тіл, через яке виникають усі непорозуміння і парадокси в теорії відносності. Водночас уявлення про “простір-час”, засновані на принципах класичної механіки, не ведуть до парадоксальних наслідків і узгоджуються з реаліями.

Перевага класичної теорії тяжіння полягає в тому, що відправними пунктами у ній є інтегральні характеристики: загальна енергія і загальна маса гравітаційного поля всієї системи взаємодіючих тіл. Локальні характеристики поля можна отримати у даному випадку однозначно шляхом диференціювання інтегральних виразів. Загальна теорія відносності діє у протилежному напрямі – від локальної характеристики гравітаційного поля, що подається диференціальними рівняннями, до інтегральної. У такий спосіб, не знаючи граничних умов, не можна отримати од-

нозначні інтегральні характеристики поля. Різні автори приймають до-вільно різні граничні умови і приходять до неоднакових результатів. Ці ускладнення легко обходяться в класичній (енергетичній) концепції гравітаційного поля.

Професор Е. Б. Чекалюк шляхом тонких міркувань і викладок переконливо доводить, що класична механіка дозволяє пояснити цілу низку явищ, які до 70-х років ХХ ст. вважалися монополією загальної теорії відносності. Це, наприклад, зміщення перигеліїв планет, викривлення траєкторії променя світла в полі сил тяжіння, гравітаційне червоне зміщення частоти світла тощо. При цьому робиться це все методично просто і точніше, ніж у загальній теорії відносності.

Спробуємо з'ясувати, що ж залишають сучасні фізики іншим механічним концепціям. Виявляється, що небагато. За релятивістською механікою вчені залишають дослідження руху малих частинок (наприклад, протонів) зі швидкостями, порівнюваними зі швидкістю світла та рухів поблизу великих мас (щорічне невелике додаткове зміщення апогею Меркурія). За квантовою механікою – деякі рухи речовини, що не узгоджуються з законами класичної механіки (наприклад, квантові макровихорі у надтекучому гелії).

Проф. Е. Чекалюк робить цілком закономірний висновок, що класична механіка на базі принципу збереження енергії може і повинна розвиватись незалежно від інших механічних концепцій.

Із її законів неухильно і методично бездоганно випливає згадуваний уже взаємозв'язок між масою і енергією, залежність маси і енергії від швидкості, залежності тривалості періодичних явищ від швидкості і від гравітаційного потенціалу, від'ємний знак густини маси і енергії гравітаційного поля, зміщення кеплерових орбіт, викривлення променя світла в полі тяжіння, космологічне червоне зміщення, деякі параметри стаціонарного Всесвіту.

Завершуючи монографію автор пише: “Відкриваючи абсолютний характер руху і абсолютний рівень відліку для поступальних швидкостей, класична механіка усуває відносність як неминучість, т.б. як кабальний принцип, від якого неможливо відійти. Тепер до багатьох загальновизнаних у фізиці абсолютних величин (абсолютна температура, абсолютний тиск, абсолютна ентропія, абсолютне обертання та ін.) додаються абсолютний рух, абсолютний простір і час.

Класична механіка, збагачена принципом збереження енергії, твердо стає на позицію гравітаційної близькодії, оминає нездоланні ускладнення інтегрування релятивістських рівнянь поля тяжіння, даючи безпосередньо інтегральні характеристики гравітаційного поля, призводить до уявлень про стаціонарний характер Всесвіту”.

Література

1. Чекалюк Э.Б. Гносеологический потенциал классической механики (к 300-летию творческой деятельности И. Ньютона) / Э.Б. Чекалюк. – Львов, 1978. – 248 с. – Деп. в ВИНТИ 03.10.1978, № 3148-78.

2. Бойко Г.Ю. Емануїл Чекалюк – великий український учений-нафтовик: зб. “Українська нафтогазова наука. 1899-1999” / Г.Ю. Бойко, Ю.Г. Філяс. – Львів: УНГА, 1999. – С. 39-41.
3. Емануїл Богданович Чекалюк (до 100-х роковин від дня народження): Бібліографічний покажчик / Відп. ред. чл.-кор. НАН України, проф. М.Павлюк; автор вступ. статті докт. техн. наук, проф. Ю. Стефанік. – Львів: ІГГГК НАН України, 2009. – 53 с.

Стаття постуила в редакційну колегію 09.11.2009 р.

Рекомендовано до друку д.ф.-м.н., професором Шендеровським В.О.

ABOUT LABOUR THERE IS EMMANOUIL CHECALIUK "GNOSIOLOGICAL POTENTIAL OF CLASSIC MECHANICS"

V. M. Moisyshyn

*Ivano-Frankiv'sk National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankiv'sk, Carpats'ka street, 15;
ph. +380 (3422); e-mail: math@nung.edu.ua.*

In the article the question is handwritten work of the prominent Ukrainian scientist E. Checaliuk "Gnosiological potential of classic mechanics", in which first a fundamental natural law is involved in construction of classic mechanics, - general principle of conservation of energy. Some of consequences, which swim out from such conception of mechanics, differ from the consequences of both traditional mechanics of Newton and relativism mechanics of Einstein.

Key words: general principle of conservation of energy, principle of saving of impulse, Newton law of world attraction, classic mechanics, relativism mechanics.

КОРОТЕНЬКІ ЕСЕЇ ПРО ПРИКАРПАТСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ-БУРОВИКІВ ДРУГОЇ ПОЛОВИНИ XX СТОРІЧЧЯ

Р. С. Яремійчук

*Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу;
76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15;
e-mail: public@nung.edu.ua.*

Автор розповідає про відомих прикарпатських інженерів-буровиків ХХ століття, які присвятили своє життя удосконаленню техніки і технології буріння та видобутку вуглеводнів.

Ключові слова: технологія буріння свердловин, видобуток нафти і газу, тампонування свердловин, освоєння свердловин.

У статті “Інженерний внесок в технологію буріння свердловин на Прикарпатті після 1939 року”, опублікованій в цьому номері “Прикарпатського вісника НТШ” в розділі “Нафтогазова справа”, йдеться про етапи буріння, освоєння та засвоєння нової техніки, технології поглиблення свердловин, про участь у цій роботі деяких українських спеціалістів. Нижче подано мої спогади про деяких буровиків, з якими мені довелося працювати з 1959 року до кінця минулого століття. Це були яскраві постаті з усіх сторін, їх виділяла серед інших людей якась особлива інтелігентність, порядність у відношеннях зі своїми колегами, висока відповідальність перед людьми і талант інженерів. Звичайно, можна було би написати про інших людей, але я багатьох особисто не знав, менше спілкувався з ними, тому і зупинився на тих прізвищах, з якими мене моя робота, моя доля зводила не один раз.

**Андрійчук Йосип Степанович
(1935 – 1999)**

Андрійчук Йосип Степанович майже тридцять років працював головним інженером Долинського управління бурових робіт (перед тим Долинської контори буріння). Цьому Управлінню довелося вводити в розробку Долинське нафтове родовище, розвідувати поклади нафти великої частини Карпатського регіону (Струтинське, Спаське, Вигода-Витвицьке та інші родовища). Мабуть найбільшим досягненням було буріння найглибшої на той час у Радянському Союзі та у Європі свердловини №1 Шевченкова – 7522 м. Багато інженерних звершень відбулося під безпосереднім керівництвом Й. С. Андрійчука – буріння перших семи в Радянському Союзі розгалужено-горизонтальних свердловин електробурами на глибини до 2800 м. У цьому бурінні використовувалася уся наявна на той час техніка та інструменти, що виготовлялися в Україні – телесистеми, механізми викривлення, бурові долота. Частина практичного засвоєння цих технологій залежала від того чи зможуть бу-

рильники (оператори) реалізувати на практиці весь процес – від керування заданим профілем свердловини, спуску обсадних колон і їх кріплення, до забурювання відгалужень і наступним освоєнням пробурених свердловин. Весь цей процес відбувався під безпосереднім керівництвом головного інженера та його помічників.

На долю Андрійчука Й. С. випадало і ліквідувати багато аварій, і усувати ускладнення та нафтогазопроями, і багато іншого.

Я знав Йосипа Андрійчука ще з часів навчання у Львівському політехнічному інституті. Він навчався на один курс раніше від мене, але ми були земляками, часто доводилося їхати з ним на канікули поїздом до Івано-Франківська, а уже звідти наші дороги розходились. Він разом із своїм незмінним студентським товаришем Миколою Поліником прямував до Солотвина, а я через Заболотів у свою Зібранівку.

На початку навчання (на другому курсі) від Андрійчука Й. С. я дізнався про можливість влаштуватися на роботу вантажником на Львівській кондитерській фабриці, де він уже рік перед тим працював зі своїми однокурсниками. Я, у свою чергу, організував зі студентів своєї групи бригаду з восьми чоловік і ми працювали там аж до закінчення навчання у Львові. Андрійчук Й. С. з дев'яти років виростав круглим сиротою, а я у той час був напівсиротою. Тож обом нам треба було добре вчитися і заробляти на прожиття.

Йосипа Андрійчука вирізняла якась особлива доброта та душевність. Я ніколи не бачив його розгніваним, не бачив і не чув, щоб він кричав на своїх підлеглих. Можливо, що той тандем, що складався з начальника Управління бурових робіт В. М. Дітчука і головного інженера Й. С. Андрійчука, був досить дійовим. Обидва ці керівники мов би доповнювали один одного, були прекрасними інженерами, організаторами виробництва.

З початку 90-х років долинські буровики починають працювати на Сході України вахтовим методом. Через відносно короткий період вони освоюють технологію буріння свердловин у Дніпрово-Донецькій западині і отримують високі технологічні та економічні показники. У цих результатах є значна частка праці головного інженера і його колег.

Під час Чорнобильської аварії Йосип Степанович очолював разом з Мельничуком А. М. і Буняком Б. Т. групу спеціалістів, що приймали безпосередню участь у ліквідації наслідків цього планетарного лиха. Там він отримав велику дозу радіоактивного випромінювання, його почало турбувати серце, загострився хронічний бронхіт.

У 1997 році мені пощастило разом з групою буровиків, серед яких був і Й. Андрійчук, навчатися у Фінляндії на комбінаті Метасерла способами регулювання властивостей бурових рідин. Читав нам лекції відомий голландський професор Том Маас. Ми жили в гостьовому будинку цього комбінату і вечорами ділилися враженнями від Фінляндії, порівнювали її з українськими реаліями, бачили все, що зміг досягти працелюбний фінський народ.

Весною 1999 р. Й. С. Андрійчук перебував у лікарні, де і помер. Попрощатися з ним приїхало багато його однокурсників з усієї України, прийшли сотні долинян, щоб віддати йому останню шану.

Таким було коротке, але насичене працею життя цього талановитого інженера, доброї та совісної людини.

Буняк Борис Трофимович
(народився у 1937 р.)

Одним із визначних буровиків 60-70-х років минулого століття, що зростав на Прикарпатті, був Борис Буняк з випуску інженерів-буровиків 1959 року “Львівської політехніки”. Чотирнадцять років життя (1959-1973) пов’язані із роботою у м. Долина. Цьому поколінню інженерів був торований типовий шлях – починався він з посади робітника, як правило, з помічника бурильника та бурильника (чим ми всі дуже пишалися), а далі уже все залежало від самого себе – працьовитості, таланту інженера, сміливості, вмінню вчитися. У цьому відношенні у багатьох з нас була типова доля-робота буровим майстром, старшим інженером та начальником дільниці буріння, робота у технічному відділі, а потім головним інженером контори буріння. Це була велика професійна школа, а, особливо, якщо врахувати, що у цей час почалося освоєння буріння глибоких та надглибоких свердловин до 4000 м, а пізніше до 5000-6000 м, то ця робота вимагала прийняття нестандартних рішень, вміння ліквідувати складні аварії та долати ускладнення процесу буріння, приймати участь в ліквідації газонафтопроявів і навіть відкритих фонтанів.

Борис Трохимович працював поряд з такими видатними буровиками, як Степан Якович Носко, Володимир Маркелович Дітчук, Борис Ігорович Чайковський, Петро Степанович Тюпін та інші. Оскільки обсяги буріння постійно зростали, то доводилося навчати тих, хто йшов поряд або після тебе. Авторитет Б. Т. Буняка був досить великим, незважаючи на його молодість. Розсудливість, терпеливість, високий рівень культури помітно вирізняли його серед інших.

Вагомий вклад у досягненні великих глибин був пов’язаний із застосуванням легкосплавних бурильних труб, бурінням свердловин з використанням закономірностей природного викривлення стовбурів свердловин, з освоєнням технологій розкриття продуктивних пластів в умовах аномальних пластових тисків.

Борис Буняк був у числі авторів проекту буріння надглибокої свердловини №1-Шевченкова. Вибір бурового обладнання, конструкції свердловини, способів буріння, методів, кріплення стовбурів колонами різного діаметра – все це поряд з іншими спеціалістами лягало на плечі головного інженера Болехівської контори буріння, на посаді якого у той час працював Борис Буняк. Чи не тому буріння цієї свердловини до глибини 7000 м відбувалося практично без аварій та ускладнень. Лише за глибини 7522 м відбулося прихоплення труб, якого ліквідувати не вдалося.

Отриманий досвід роботи на Прикарпатті дав можливість Б. Т. Буняку очолити інженерну службу на сході України в об’єднанні “Укрбургаз”. У 1986 році він захищає у Москві (кандидатську дисертацію) під

науковим керівництвом професора М. О. Жидовцева. Пізніше він працює заступником та директором Українського інституту природних газів УкрНДІгаз у Харкові.

Якщо знову повернутися до часів роботи Б. Т. Буняка на Прикарпатті, то без усякого сумніву освоєння багатьох родовищ нафти пов’язано з його інженерною роботою (Долинського, Спаського, Вигода-Витвицького, Струтинського) пов’язано з його інженерною діяльністю.

Робота на сході України, трагічний час ліквідації аварії на Чорнобильській АЕС, організаторська та наукова робота в інституті – складові досвіду Б. Т. Буняка, одного з плеяди видатних українських інженерів-буровиків. Його досвід потім успішно реалізовувався українськими буровиками в умовах Півночі та Західного Сибіру.

Дітчук Володимир Маркелович
(1929-1989)

Цей інженер і організатор виробництва був інженером від Бога. Я ближче з ним познайомився після захисту кандидатської дисертації та під час роботи у Всесоюзному НДІ бурової техніки. Одного разу у Москві мене запросив до себе Я. А. Гельфгат – керівник технологічного відділу інституту. Разом з Гельфгатом за столом сидів Олександр Михайлович Григорян. Вони попросили мене розглянути в Долинському управлінні бурових робіт та в нафтогазовидобувному управлінні проект буріння розгалужено-горизонтальних свердловин на Долинському нафтовому родовищі. Вся техніка для такого буріння виготовлялася в Україні – електробури, телесистеми, механізми викривлення. Я дуже сумнівався в реальності цього проекту. Але на моє здивування, коли я розпів про цей проект Володимир Маркеловичу і ми стали його обговорювати з його головним інженером Йосипом Степановичем Андрійчуком та ще з деякими провідними інженерами-буровиками, то майже всі його підтримали. По-перше, Долинська контора буріння мала ще і назву контора електробуріння і з роботою електробурів і телесистем спеціалісти-буровики були добре обізнаними. По-друге, Олександр Михайлович Григорян був багатьом буровикам Долини відомий ще з п’ятидесятих років, за його розробками у Бориславі було пробурено більше десяти горизонтальних свердловин. В Долині працював і досвідчений спеціаліст з електробурів Малтс, естонець за національністю, фанатично захоплений електробурінням, який створив найкращу у колишньому СРСР базу для електробурів.

Пізніше цей проект розглядався в об’єднанні “Укрнафта” в Києві і його підтримав тодішній заступник генерального директора Анатолій Миколайович Мельничук.

Долинським УБР було пробурено 8 горизонтально-розгалужених свердловин електробурами, стовбур свердловин утримувався від гирла до вибою в одному азимуті. Керування профілем свердловини здійснювалося буровиками і всі операції із спуску колон, хвостовиків-відгалужень також йшли бездоганно. Здавалося, що цей метод буріння знайде широке застосування на практиці. Але так не сталось. Всі зусилля

Міністерства нафтової промисловості було спрямовано на освоєння родовищ Західного Сибіру. Ще три свердловини було пробурено за цією ж схемою Бориславськими буровиками на родовищі Старий Самбір. Сьогодні, коли минуло більше тридцяти років, коли появились колтубінгові технології буріння, коли є необхідність бурити свердловини на низькопроникні прошарки, коли у світі знайшло широке застосування горизонтального буріння, цей досвід буріння не втратив свого позитивного значення.

Дітчук В. М., як і більшість його товаришів по фаху, умів прислухатися до думок вчених та допомагав в реалізації нових технологій в практику. Але не лише цей фрагмент бурової історії з життя В. М. Дітчуча вартий уваги. Під його керівництвом розбурювалося та вводилося в розробку одне з найбільших на той час нафтових родовищ України – Долинське. Швидкості буріння були високими. Лише у цьому управлінні працювали три Герої соціалістичної праці, а це високе звання у ті часи присуджувалося за дійсно високі досягнення. Разом із Степаном Носком, Борцсом Буняком, Орестом Жарським та іншими буровиками в Долині було пробурено найглибшу на ті часи свердловина №1 Шевченкова.

Здоров'я Дітчуча було підірвано. З тієї плеяди інженерів-буровиків мало хто проживав до 60-ти років. Мені довелося допомагати В. М. Дітчучу в пошуках добрих лікарів-кардіологів. На певний час це допомогло. Але ще одна криза закінчилась трагічно – не доживши до 60-ти років він пішов у вічність. Але з тих людей, що ще живуть і які працювали поруч із Дітчучом можна почути лише слова великої поваги до цієї людини, яка ніколи не піднімала голосу на своїх підлеглих, яка вміла робити їх співучасниками великих справ і яка так несправедливо пішла передчасно з цього життя.

Діяк Іван Васильович (народився у 1929р.)

Йому долею судилося пережити багатьох своїх колег – колишніх головних інженерів та керівників бурових підприємств на Прикарпатті. Початок його роботи був типовим для випускників гірничо-промислового (нафтового) факультету “Львівського політехнічного інституту” в період 1953-1960 років. Початок типовий – робітнича професія. А далі – далі через 10 років він був уже видатним фахівцем – буровиком і займав свою професійно високу нішу серед таких інженерів, як Борис Чайковський, Петро Шинкарик, Володимир Дітчук, Микола Касіян та інші. Зовні він мало змінився за більш ніж п'ятдесят років – такий же стрункий, як і колись, маломовний, але рішучий, відважний у складних ситуаціях. Як колись любили повторювати «Все он увидел ...». А і справді – освоєння технологій надглибокого буріння, ліквідація аварій, відкритих фонтанів нафти і газу – все пройшло через його долю. Один з небагатьох буровиків І. В. Діяк зумів поєднати виробничу роботу з науковою, він захистив кандидатську дисертацію з питань надійності кріплення свердловин. На той час це була значуща актуальна наукова робота, високо оцінена його офіційними опонентами, зокрема професором Булатовим А. С.

Після реорганізації структури бурових робіт І. В. Діяк працював декілька років завідувачем Прикарпатського відділу інституту «ВНДіО-ЕНГ», поклавши свої професійні знання в систему управління буровими роботами. На цій роботі він також залишив помітну стежину знань у вигляді наукових статей, методик, нормативних актів. Я пам'ятаю з якою повагою відносилися до І. В. Діяка московські спеціалісти. З 1972 року багато років І. В. Діяк працював заступником начальника об'єднання «Укргазпром». Важко перелічити весь вклад цього інженера-буровика в освоєння багатьох газових родовищ в Україні, а також у Західному Сибіру (в Уренгої).

Я пам'ятаю його швидку мову, його вимогливість до своїх підлеглих, його пошуки талановитих інженерів для роботи на виробництві та в науково-проектних інститутах. Було і таке – він запропонував мені стати директором інституту УкрНДігаз у Харкові, але я у той час не відчував у себе даних для такої відповідальної роботи і тому відмовився від неї.

Саме завдяки вибору І. В. Діяка відбулася така стрімка кар'єра інженера І. Й. Рибчича, який пізніше керував ДК «Укргазвидобування», бо Діяк умів підбирати людей близьких до себе.

А далі пішла уже його плідна політична робота у Верховній Раді України.

Діяк І. В. отримав багато урядових нагород в часи Радянського Союзу, а також за незалежності України. Він справжній орденосець, він є повним кавалером ордену «За заслуги» усіх ступенів.

Свої вісімдесят років І. В. Діяк зустрічає повний сил, енергії, які він віддає на благо нашої країни. Його енергії, пам'яті, розуму можна по доброму заздрити.

Жданков Володимир Федорович (1930-1966)

Ціла плеяда видатних українських буровиків вийшли з випуску гірничо-промислового факультету Львівської політехніки 1954 року, серед яких були Роман Сенів, Анатолій Мельничук, Андрій Крицук, Мирослав Гайовий, Володимир Жданков, Антон Турко, Євген Майдан та багато інших. Це лише ті прізвища, які прийшли першими на пам'ять. З Жданковим мене звела спільна робота у м. Бориславі після того, як я почав працювати у Бориславській конторі розвідувального буріння. Я працював на дільницях буріння, а він керував технічним відділом. Всі технологічні плани буріння, спуску обсадних колон і їх цементування, плани ліквідації аварій чи ускладнень буріння розроблялися в технічному відділі. Цементування обсадних колон велося під безпосереднім керівництвом головного інженера П. В. Шинкарика або В. Ф. Жданкова. Тепер, після майже півстолітнього часу, видно, що ці всі роботи вимагали великих знань та практичного досвіду. На фоні моїх перших кроків освоєння професії досвід Жданкова видавався досить поважним. Буріння супроводжувалося безліччю нестандартних ситуацій, подолання яких вимагає також неординарних технічних та технологічних рішень.

Жданков був за національністю росіянином, але скільки я його пам'ятаю, він завжди розмовляв українською. Цьому сприяло те, що

війна застала його батька-залізничника із сім'єю у Львові і його діти навчалися в українських школах, спілкувалися між собою також українською мовою. В ті часи, коли і нас, українців, заставляли розмовляти, робити професійні доповіді російською, поведінка Жданкова була також нестандартною.

Жданков був спортсменом, займався важкоатлетичним спортом, залучав до спорту і молодих інженерів. Тому багато з нас дружили з ним.

Шістдесяті роки минулого століття були періодом великого росту об'ємів розвідувального та експлуатаційного буріння, освоєння глибокого та початку освоєння надглибокого буріння. Багато родовищ було відкрито саме у цей час.

Всі працювали в досить напруженому ритмі. Але відомо, що напруження призводить до перевтоми і вимагає релаксації. У цьому плані Жданков вмів допомогти відпочинку – збирав нас в компанії, грав на баяні, він і ми співали на відпочинкових вечорах, розмовляли, жартували, розповідали анекдоти. Я не знаю нікого з бориславських буровиків, які б не поважали і не любили Жданкова.

Багато робіт – буріння двостовбурових свердловин на Рудківському газовому родовищі, ліквідація справді масштабного прориву газу з нижніх горизонтів на поверхню в районі села Тулиголова, ліквідація безлічі аварій лягала на плечі Жданкова.

Після мого повернення до м. Івано-Франківська Жданков працював уже в тресті “Прикарпатбурнафта” в (м. Івано-Франківськ) і я запропонував йому перейти на роботу у відділ промислових випробувань ВНДІ бурової техніки на посаду заступника керівника відділу. Сім років ми пропрацювали поруч, а коли я перейшов працювати у 1976 році проректором з наукової роботи в ІФНГ, тоді я запропонував його кандидатуру на посаду керівника відділу.

Багато робіт організував тоді Жданков – технологічний супровід буріння найглибшої на той час свердловини в СРСР та Європі №1 Шевченкова, організація буріння горизонтально-розгалужених свердловин на Долинському та Старо-Самбірському нафтовому родовищі. Він разом зі мною був фактичним автором книги “Бурение сверхглубокой скважины”.

Він був азартною людиною у житті, мав величезне зібрання поштових марок та монет і у вихідні дні майже завжди був серед колекціонерів. Не знаю, що сталося після його смерті з його колекціями.

Важка і напружена праця передчасно забрала життя цього талановитого інженера, йому не було і 65 років життя.

Іваницький Євген Антонович (1923-1995)

Цей інженер-нафтовик народився у сім'ї бориславських ріпників, жив і закінчив своє земне життя у м. Бориславі. Навчався на нафтовому факультеті Львівської політехніки (закінчив навчання у 1952 році). Так склалося, що моя доля тісно перепліталася з Євгеном Іваницьким. Взи-

мку 1954 року я проходив переддипломну практику на 8-му промислі у Тустановичах, навчаючись у Дрогобицькому нафтовому технікумі. А в цей час Іваницький працював головним інженером цього промислу і для мене він був спочатку керівником практики, а пізніше і керівником дипломного проекту. Уже в той час багато свердловин працювало періодично, оскільки час накопичення нафти був меншим, ніж час її відпомповування плунжерними насосами, що призначалися в дію верстатами-гойдалками. І оператори змушені були обходити за графіком промисел та включати або відключати від електрики ці верстати.

Тож Іваницький визначив для мене і тему проекту – це автоматичне керування пуском та відключенням привода верстатів за періодичної експлуатації свердловин. Пам'ятаю, як він годинами сидів поруч зі мною та рисував турбінки, що призначалися в рух потоком рідини, а коли насос вже не піднімав нафту, ця турбінка зупинялася, що призводило до розриву ланцюга живлення електродвигуна. Потім я робив креслення цієї турбінки та схему наступного включення двигуна в роботу за даними промислових вимірювань. Думаю, що це був абсолютно реальний проект, лише не знаю чи був він колись реалізований на практиці. Мене і зараз дивує цей далекий епізод роботи Іваницького з 17-річним учнем технікуму, оскільки він приділяв дуже багато часу на спілкування з практикантом. Ще мене дивує те, що він навіть приїхав у м. Дрогобич послухати захист мого дипломного проекту.

У ті далекі-далекі часи Іваницький був дуже пунктуальним – призначивши час зустрічі, він ніколи не запізнювався на неї; я запам'ятав і його ввічливе поводження з майстрами, операторами, слюсарями. Хоча він був дуже вимогливим.

Будучи уже студентом 4-го курсу Львівської політехніки влітку 1958 року маленьку групу (лише десять студентів) спрямували на практику знову у м. Борислав. Іваницький в цей час працював головним інженером Бориславського нафтопромислового управління. Він приділив нам увагу, призначив індивідуальних керівників нашої практики, а після її закінчення переглянув наші звіти. Роботи у головного інженера завжди багато, але Іваницький і тут проявив себе людиною, що дбає про професійну освіту майбутніх інженерів.

З весни 1961 року я працював у м. Бориславі. Я працював у конторі буріння, а Іваницький працював в нафтогазовидобувному управлінні. Одного разу запросив мене до себе та попросив підготувати декілька лекцій для слухачів вечірнього університету технічних знань (це була така громадська організація, якою він керував). Підготовка цих лекцій змусила мене читати багато літератури, що публікувалася в журналах “Нефтяное хозяйство”, “ВНИИОНТИ” та інші. Ці лекції відбувалися регулярно один раз на місяць і на них збиралося багато бориславських інженерів. Тобто, це було своєрідною формою підвищення кваліфікації інженерів і техніків. Ще через якийсь час він рекомендував мене лектором в Навчально-виробничому училищі, де готували операторів, помічників бурильника, бурильників, і навіть бурових майстрів. Ця робота

допомогла мені систематизувати свої знання та навчила їх доносити слухачам. Одночасно це давало мені змогу заробляти додаткові гроші. З 1962 року у м. Бориславі утворився трест “Західбурнафтогаз” і керівником цього тресту призначають Є. А. Іваницького. Оскільки я вже працював старшим інженером, чи може і начальником дільниці буріння, тому наше спілкування стало систематичним. Регулярні технічні наради, що їх проводив наш керуючий трестом, істотно розширювали наш діапазон знань, що стосувалися питань планування робіт, їх фінансового забезпечення, організації та постачання, інженерного керування.

Запам’ятався якийсь вроджене і інтелігентне поведження нашого керівника. Найбільш різка критика не супроводжувалась криком. Ніколи з вуст Іваницького не зривалися “матірні вирази”. В бурінні у ті часи часто траплялися аварії з обривом труб, їх прихопленням, нафтогазовикидами чи навіть відкритим фонтануванням, з заклинюванням доліт на вибої, з обривом геофізичного кабелю та інші. Ліквідація цих аварій часто супроводжувалась значним ускладненням процесу буріння, зривалося виконання планів. Євген Іваницький збирав вузькі або широкі наради і, роздумуючи над причинами та наслідками аварій, починав рисувати геологічний розріз, накладав на нього конструкцію свердловини, розміщував в ній в масштабі бурильні труби, інше обладнання та розмірковував про те, що сталося, чому сталося, прогнозував схему ліквідації аварії. Це все вмещувалося у багатьох рисунках і нам ставало зрозуміліше, що треба зробити, щоб ліквідувати аварію. Часто рисувалися ескізи оригінальних інструментів, щоб успішно ліквідувати ту чи іншу аварію. Шкода, що тоді не було кому збирати ці рисунки та описувати хід ліквідації цих аварій. Це було б надзвичайно корисною навчальною роботою. Двері до нашого керівника були завжди відкритими для персоналу тресту.

Часто Євген Іваницький виїжджав на бурові, щоб поспілкуватися з буровими майстрами, побачити на власні очі в якому стані знаходяться бурові верстати, інше обладнання.

Його безпосередні заступники – головний інженер Петро Васильович Шинкарик, головний геолог Володимир Михайлович Киверенко, головний механік Омелян Ярославович Матковський, були його ровесниками. Одночасно це були освічені спеціалісти, що знали свою професію, мали добрий виробничий досвід. Це були також інтелігентні та відповідальні люди. Під їх керівництвом легко працювалося і можна було багато чому навчитися.

Одного разу Іваницький попросив мене відвідати цех підземного та капітального ремонту свердловин в Бориславському нафтопромисловому управлінні. Опісля я розповів йому про своє здивування – велику упорядкованість території, гарні і чисті стелажі з ловильним підвісним інструментом, вивішені інструкції з виконання ловильних робіт. Керував цехом інженер Вагман. На що Іваницький мені сказав: “Батько цього Вагмана був добрим господарем. І сину передав дар господаря (чи газди)” (батька Вагмана за німців знищили в єврейському гетто).

Уже працюючи начальником технічного відділу тресту “Західбурнафтогаз”, Е. А. Іваницький мене часто відряджав на виробничі наради, конференції в міста Київ, Москву, Актюбінськ, Новосибірськ. Особливо запам’яталися останні відрядження, що стосувалися використання випробувачів пластів на трубах та маркшейдерії при бурінні свердловин. Це були відносно нові способи, за допомогою яких оцінювалися фільтраційні характеристики порід або способи похило-спрямованого буріння. Але після кожної поїздки Іваницький вимагав прилюдної (на нарадах) інформації про поїздку.

Пам’ятаю кумедну історію, пов’язану з приїздом делегації польських нафтовиків. У той час це було нечуваною подією. На зібранні Іваницький сказав, що для прийняття цих поляків потрібні гроші і запропонував нам зібрати з кожного по 50 карбованців. Він склав графік хто з нас мав з ними снідати, обідати, вечеряти протягом п’яти днів. Всі ці заходи супроводжувалися доброю випивкою. Остання прощальна вечірка була у столовій селища Східниці. Ми пригощалися, співали. Раптом наш головний геолог Киверенко заспівав “Од можа і до можа” (старий гімн Польщі) і поляки дружно підтягнули цю пісню. Але їх партійний керівник скочив на стіл та крикнув: “Закрийте гембу!” (рота). Поляки принишкли, а вечір був зіпсований.

В кінці 1966 року я поїхав здавати вступні іспити в аспірантуру ВІДІБТ у Москві. І залишився працювати у цьому інституті до середини 1976 року. Я часто приїжджав до м. Борислава, заходив провідати Іваницького аби вирішувати з ним питання випробовування нових технологій, доліт, компоновок низу бурильної колони.

Але ті часи минулися. Трест було розформовано. Замість нього утворили Управління бурових робіт (УБР), у якому злили дві контори: розвідувального буріння та всі інші виробничі підрозділи.

Короткочасно начальником поставили Марухняка, у якого ніяк не могли скластися відносини з Є. Іваницьким. Іваницький оформив пенсію. Захворів, переніс інсульт. Одного разу я приїхав в м. Борислав, за телефонував до Іваницького додому, трубку взяла його дружина. На моє прохання зустрітися з її чоловіком, вона сказала, що це можна зробити через три години. Коли я прийшов до нього додому, то зустрів Іваницького вдягнутого в нову сорочку, костюм і напівлежачого у кріслі-шезлонгу. Він не хотів, щоб його бачили німцями. Говорив з деякими труднощами. Згадав, що немає вже на світі Киверенка, Кобриня. З болем говорив про бориславські справи. Я вийшов від нього з важким пригніченим настроєм. Я побачив, як стає німчною ця могутня людина. Через півроку померла від ракового захворювання його дружина. І він залишився на руках сина Олега. Помер Є. Іваницький у 1992 році. Я був в цей час в закордонному відрядженні в Аргентині, тому не зміг приїхати на його похорон.

Серед багатьох нафтовиків другої половини минулого сторіччя це була надзвичайно колоритна постать. Він не спокусився високою посадою, що йому пропонували в Києві, а залишився працювати в своєму

рідному місті Бориславі. Він був прикладом для своїх колег по роботі. Часом мені здається, що таких людей серед нафтовиків більше немає.

**Мрозек Омелян Адальбертович
(1929-1989)**

Не було йому ще і 59-и років, коли зупинилося його серце. Недавно з'явився він мені у сні-веселий, гарно одягнутий, швидкомовний, навіть азартний – і сказав, що його призначили керувати нафтогазовим підприємством. Я у сні був здивований, бо сьогодні йому було би 76 років і сказав йому про це. Але він мені сказав, що працюється йому легко, що до нього приходять щодня багато людей. Він махнув мені рукою і пішов вулицею м. Бориславі.

З Мрозеком, а пізніше з усією його родиною, я близько зійшовся уже почавши сам працювати у м. Бориславі. Його дружина Данута – лікар-терапевт часто лікувала наші болячки, була посередницею між нами і іншими лікарями. Вдома у них завжди було затишно, можна було добре поїсти і навіть випити. Це була дуже дружна родина з чудовими дітьми – донькою і сином. Багато українських свят – різдвяних та великодніх ми проводили разом. Одного разу напередпитку ми пішли колядувати до тодішнього секретаря міському партії. Він вийшов на поріг, запросив до хати. Я уже думав, що завтра відносно нас будуть “оргвыводи”. Але про це ніхто не згадував. І я, і Мрозек були інженерами-буровиками і наші долі тісно перепліталися – ми працювали старшими інженерами дільниці буріння, якими керували Ярослав Струс і Валерій Вавілов. Потім і він, і я керували дільницями буріння в Бориславській конторі розвідувального буріння, немовби змагаючись між собою. Потім мене призначили начальником технічного відділу тресту “Західбурнафтогаз”, а Мрозека головним інженером контори буріння. Ще через якийсь час я став працювати заступником директора цієї ж контори з виробництва.

Мій вік зближувався до тридцяти років, а Омеляну йшов 33-й рік, тобто вік Хреста. Всі ми були молодими, амбітними, пересуваючись вгору новими посадами. Наші відносини зближувало й те, що ми закінчили Дрогобицький нафтовий технікум, а з розривом у 4-и роки Львівську політехніку. Омелян Мрозек був більш досвідченим буровиком, ніж я. Він працював з Ярославом Струсом і обидва вони склали особливий тандем – на їхніх бурових завжди було чисто, прибрано, буровий інструмент було добре впорядковано. Мені теж вважалося, що у них було більш порядку, ніж там, де працював я.

Що мене притягувало до Мрозека? Його високі професійні знання, надзвичайна акуратність та пунктуальність. І я, може не зовсім усвідомлюючи це, тягнувся до нього за знаннями і порадою.

Одного разу на Різдвяні свята ми вимушені були працювати черговими на своїх бурових дільницях – він у селі Вуличному, а я в селі Доброгостів, де я квартирував і на святі вечерю ми сиділи у моїх господарів. Колядували з господарями і гостювалися до самого ранку. І за ці святкові дні жодного ЧП (надзвичайної події) на бурових не траплялося.

Я. Струс і О. Мрозек керували дільницею, на якій бурилася свердловина № 21 Орів, що стала першовідкривачем нового Орівського нафтового родовища. Цією свердловиною керував Ярослав Кулиняк, теж виходець з Дрогобицького нафтового технікуму. Фактично всі ми мали дрогобицьку навчальну базу. Всі вони були з родин ріпників, бориславців, лише я був прибульцем з Гуцульщини. Я почувався серед них, як рівний з рівними. На цій свердловині ми випробовували алмазне долото французької фірми, на цій свердловині я написав заявку на свій перший винахід – уловлювач дрібних металевих уламків з вибою свердловини на базі ежекторного пристрою.

На свердловині №1 Орів я приймав участь у випробовуванні методу К. Гаврилкевича – багаторазових великих тисків і їх скидання, де побачив, як десятки тон гематиту виносилися з привибійної зони. Вже значно пізніше цей досвід мені знадобився у роботі над своєю докторською дисертацією.

В свої тридцять років я поїхав навчатися у Московську аспірантуру, припинивши роботу буровика. Через рік я приїхав уже зі своєю дружиною Христиною в м. Борислав. Було це випадково чи ні – не знаю, але через день на березі річки Стрий за Східницею зібралися буровики, було нас багато, може двадцять чи тридцять людей. Ми співали, розмовляли, їли шашлики, відпочивали до самого ранку. На мою молоду дружину це справило незабутнє враження – мене в Бориславі не те, що не забули, а вважали своїм.

Мрозек працював директором контори буріння, пізніше заступником начальника Управління бурових робіт. Ми зустрічалися часто, ділилися тим, чим боліло наше життя, я допомагав в навчанні його дітям, але Омелян раз за разом жалівся, що у нього хворе серце. Переніс інфаркт міокарда. І одного разу його не стало.

Життя його було присвячено пошуку нових Карпатських родовищ нафти і введення їх в розробку. Не залишив після себе багатства, але пам'ять про нього у всіх, хто його знав – вічна. Мрозек був з числа тих багатьох буровиків, життя яких переривалося передчасно.

**Носко Степан Якович
(народився у 1926 р.)**

У 1958 році С. Я. Носка було призначено директором Болехівської контори розвідувального буріння тресту “Прикарпатбурнафта” у місті Долина. Перед тим він працював у м. Надвірна, де набув великого виробничого досвіду. Головним інженером одночасно було призначено І. В. Діяка, теж зі значним виробничим досвідом. Лише протягом одного року було створено 10 бурових бригад. Буріння велось на глибині 3500 та більше метрів. У 1969 році було забурено свердловину №1-Шевченкова з проектною глибиною 7000 метрів. Ці великі глибини довелося долати вперше. Координація технічних, технологічних, соціально-побутових завдань лягла на плечі С.Я. Носка. І з цим він успішно впорався. С. Я. Носко вмів працювати з молодими інженерами і техніками. Виховував з них висококваліфікованих буровиків. Він умів при-

слухатися до думки своїх підлеглих, водночас він умів працювати і зі своїми керівниками. Ці якості керівника були продовжені після 1970 року і у роботі в об'єднанні “Укрбургаз” на Харківщині, де за короткий термін роботи було організовано злагоджену роботу кілька десятків бурових бригад і де його досвід, талант керівника і знання справи дали змогу створити велику бурову компанію.

Сотні, а може тисячі людських долів переплелися з життям С. Я. Носка. Я не знаю жодного випадку, коли б хтось міг пред'явити претензії до Степана Яковича, оскільки він завжди був справедливим і мудрим, ніколи не користувався високопарними словами. ЙОГО ВАРТО БУЛО Б ЗАНЕСТИ У ПАНТЕОН СЛАВИ УКРАЇНСЬКИХ ІНЖЕНЕРІВ.

Райхерт Людвіг Адольфович (1941-2006)

Л. Райхерт походив з родин німців та поляків. Батько Людвіга працював ковалем в Долинському нафтопромисловому управлінні. Людвіг закінчив газонафтопромисловий факультет Львівської політехніки. Два роки він працював буровим майстром у Криму, а пізніше перевівся на роботу у Долинську контору буріння. З цієї посади я його загітував перейти на роботу в Український відділ промислових випробувань ВНДІ бурової техніки. У нього була чудова, красива дружина, народилось двоє дітей – Наталка і Сергій. Це була типова інтелігентна працелюбна сім'я, що поєднала в собі традиції поляків, німців та українців.

Людвіг жив в м. Долині і за своїми обов'язками відповідав за технологічний супровід буріння найглибшої тоді в СРСР свердловини №1 Шевченкова, здійснював організацію промислових випробувань реактивно-турбінних бурів при бурінні свердловин великого діаметра, розширювачів, турбобурів, електробурів. Підключали його і до інших важливих технологічних робіт у цьому регіоні – буріння свердловин на площі Спас за м. Рожнятів електробурами з продуванням вибою повітрям.

За що би не брався Людвіг, все у нього виходило добре. Він умів працювати з виробничниками, мав свій досить значний виробничий досвід і до його пропозицій прислухались виробники, де б це не було – в Долині, Стрию чи Бориславі.

Це був красивий, високий ростом молодий чоловік з чорним кучерявим волоссям та темними очами, що швидше нагадували не німця чи поляка, а половця чи турка.

З самого початку роботи у відділі ВНДІБ Людвіг почав роботу над кандидатською дисертацією, яка була присвячена роботі розширювачів при бурінні стовбурів великого діаметра. Після того, як ми з ним обговорили схему експериментальної установки, пройшло три місяці. За цей час Людвіг розробив конструкцію надскладної установки, яка могла моделювати буріння свердловини на натурних взірцях з промиванням цієї міні-свердловини та його розширенням. Моделі міні-доліт я привіз йому з Москви. Всі параметри цього буріння записувалися самописцями потенціометра.

Ще через три або чотири місяці вся ця надзвичайно складна установка була готова до роботи. Я не знаю жодного з відомих мені аспірантів, який би міг виконати таку величезну роботу самотужки. Ще через півроку експериментальні дослідження було виконано, а його домашній робочий стіл нагадував лабораторію дослідників, де працювали десятки людей – на ньому лежали графіки, креслунки, математичний опис процесів.

У світовій практиці уже на той час набули широкого застосування спіральні калібратори-центратори стовбура свердловини. Одного дня Людвіг зателефонував мені і попросив приїхати у Долину і оглянути перший взірець цього калібратора. Він віднайшов старий австрійський верстат, на якому можна було згинати по спіралі металеві пластини за розміром контура калібратора. Він притягнув цей верстат в кузню до свого батька і нагріті пластини приймали уже спіралевидну форму. Потім ці спіралі приварювались до корпусу, а робочі грані її армувалися твердим сплавом або твердосплавними штирями зі сплаву ВК.

Пізніше виготовлення цих калібраторів було організовано в м. Дрогобичі на двох заводах – долотному та газової арматури і обладнання. Через 2-3 роки ці спіральні калібратори стали неодмінним елементом серійних компонок при бурінні свердловин у всіх газонафтових регіонах СРСР.

Ще двома розробками займався Людвіг Райхерт – розробкою надважких та ступеневих розширювачів. За допомогою цих інструментів бурилися десятки свердловин великого діаметра на Прикарпатті.

У 1976 році ми з Л.А. Райхертом видали у видавництві “Недра” (м. Москва) монографію “Бурение стволов большого диаметра”. Цю книгу з дозволу редакції видано у Пекіні китайською мовою.

Рік перед тим Людвіг блискуче захистив на вченій Раді ВНДІ бурової техніки кандидатську дисертацію. Вів Раду директор інституту Асан-Нурі А. А. Після захисту дисертації Асан Абдулаєвич сказав мені, щоб я через 20 хвилин прийшов до нього з Райхертом. В короткій розмові він привітав Людвіга з успішним захистом дисертації та запропонував йому роботу керівника відділу у Москві. Відмовлятися Людвігу від цієї пропозиції не було підстав. Через півроку Людвіг отримав 4-х кімнатну квартиру і уже до своєї раптової смерті працював у цьому інституті. Людвіг залишився за духом українцем. Обоє його дітей Наталя і Сергій розмовляють українською мовою і навіть його внучка, завжди по телефону відповідає мені українською мовою, хоча народилася і навчається у Москві.

У 2007 році я був на міжнародній виставці “Нефть и газ 2007” у Москві, зустрів там Сергія і він тут же почав спілкуватися зі мною українською мовою.

Л. Райхерт устаткував від своїх батьків не лише любов до праці, а і притаманну їм культуру. Скільки ми з ним не їздили автобусом або тролейбусом у Москві він завжди поступався своїм сидячим місцем жінкам, старшим і молодим. Не терпів неправди, був завжди одночасно то-

лерантним до слабких якостей деяких своїх колег. За його пропозицією на роботу у відділ були запрошені молоді інженери-буровики – Ярослав Іваськевич і Петро Здрок, життя яких зупинилося раптово на порозі своїх інженерних та наукових звершень.

Семак Григорій Григорович (1938-1989)

Він був лише на рік молодшим від мене і на рік після мене закінчив Львівську політехніку. Подальші роки працював у Надвірнянській конторі буріння, пізніше переведений для роботи в трест «Прикарпатбурнафта». Коли я, в середині 1969 року, приїхав до м. Івано-Франківська і почав працювати начальником Українського відділу промислових випробувань ВНДІ бурової техніки, то одним із перших був запрошений до роботи у відділ Григорій Семак. На той час у нього уже була добра репутація інженера-буровика. Він був одним із авторів декількох винаходів, зокрема з конструкції гратознімача при спуску у свердловину стикозварних колон. На той час припадає пік застосування цього способу для кріплення свердловин, народженого в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона. У нашому відділі Г. Г. Семак став працювати технологічним керівником робіт по бурінню свердловин з продуванням вибою пінами, аерованими розчинами. Однією з найвагоміших робіт, над якою працював Г. Семак, було розкриття продуктивних горизонтів з продуванням вибою газами-повітрям, пізніше природним газом, а ще пізніше азотом. На Битківському родовищі було поставлено нечуваний навіть в нинішніх умовах промисловий експеримент на трьох свердловинах Битківського родовища, коли менілітові відклади розкривалися потоком піни, природного газу та азоту.

Всі плани робіт, підбір обладнання, розробка технологій буріння здійснювалися під керівництвом Семака. Звичайно, ми отримували велику допомогу зі сторони московських колег – Ю. С. Лопатіна, І. В. Белея, Зоре та інших.

Особливо важливим було розкриття битківських менілітів природним газом та азотом. Що стосується останнього, то мені здається, що це був унікальний буровий експеримент не лише в колишньому Радянському Союзі, але і у світі.

У творчій людини часто буває роздвоєння. Так, Семак займався розкриттям пласта, а для себе розробляв теоретичні основи проектування трас похило-скерованих свердловин, досліджував механізми їх природного викривлення, вивчав роботу різних компоновок низу бурильної колони.

Під час буріння однієї із свердловин з продуванням вибою пінами на Делятинській структурі ми змогли отримати фотографії стінок свердловин в діапазоні глибин від однієї до двох тисяч метрів. Для цього було розроблено спосіб фотографування, освітлення вибою направленим прожектором, було використано двооб'єктивний фотоапарат, що давав об'ємне зображення (такі фотоапарати вже ніде не випускаються

виробництвом). Оскільки коштів на розробку цього обладнання у нас не було, то використали гроші з фіктивного відрядження у м. Львів.

Ці фотографії пізніше було передруковано в наукових виданнях США та Росії і до цього часу вони не втрачали своєї цінності, бо нещодавно А. І. Булатов (2009 р.) вмістив їх у своїй останній книзі.

Г. Семак в числі своїх винаходів розробляв і новий тип каверноміра і спосіб орієнтування керна. До речі, з заявкою на цей останній спосіб вийшов цікавий курйоз – з Комітету по винаходах цій заявці протиставили патент США. Яке ж було наше здивування, коли виявилось, що предмет винаходу співпав майже слово в слово. Тут не було ніякого плагіату ні зі сторони Семака, ні зі сторони американців.

Разом з Г. Семаком і М. Іликом, тодішнім головним інженером Дрогобицького долотного заводу, ми розробили конструкцію розширювача стовбура свердловини зі змінними шарошками. Цей розширювач було ретельно випробувано. Але в серійне виробництво його не запустили, оскільки для заводу вигідніше було виготовляти у сім разів більше розширювачів стандартної конструкції, ніж один нашої конструкції.

Біля Г. Семака згуртувалася група здібних інженерів, які постійно щось розробляли. Але основна ініціатива належала Семаку і він працював дуже плідно і самовіддано. В нашому відділі працювали три найплідніші інженери – Михайло Шумада, Людвіг Райхет і Григорій Семак. Всі вони передчасно пішли з життя, але залишили після себе вагомий інженерний доробок.

У 1982 році у видавництві «Педра» (Москва) вийшла наша спільна з ним монографія «Обеспечение надежности и качества стволов глубоких скважин». Пізніше цю книгу видали у Пекіні китайською мовою (піратське видання). Я і досі вважаю, що це одна з кращих книг, до видання якої я мав відношення.

Взимку 1989 року я лікувався у м. Кисловодськ і у січні місяці зателефонував до Григорія, щоб привітати його з днем народження. Він сказав, що почуває себе погано, йому важко вести заняття зі студентами. Коли я через два тижні повернувся додому, то ми з ним пішли до мого знайомого професора отоларинголога на огляд. Після огляду професор направив Семака на здачу аналізів та подальшого обстеження, а коли ми уже йшли від нього він попросив мене залишитися. І він мені сказав, що найбільше зосталося жити Григорію три місяці. Так воно і сталося.

Г. Г. Семака пам'ятають у нашому Університеті, оскільки його вклад в науку і техніку є досить дуже вагомим. Його внесок у розробку бурової техніки надзвичайно великий, результати його досліджень випереджали американські, багато сучасних дослідників черпають ідеї з його праць.

Скальська Уляна Любомирівна (народилась у 1930 р.)

На початку 60-х років минулого століття на Прикарпатті в лабораторіях, що розробляли та впроваджували нові типи бурових розчинів,

почали працювати випускники хімічних факультетів Львівського та Чернівецького університетів. Серед цих спеціалістів була Уляна Скальська, Аркадій Семенаш, Лілія Склярська, Стефанія Питель.

Всі вони відрізнялися від нас, буровиків, своїми специфічними знаннями та захопленням і відданістю професії буровика. В Карпатах, як, можливо, мало в якій нафтогазоносній провінції, сконцентровано розмаїття умов буріння – аномальні пластові тиски, великі товщі солей та засолонених глин, перемежування порід різної міцності, пластичності, досить високі температури у пластах. На цей час припадає освоєння великих, як на той час, глибин буріння – від двох до трьох – чотирьох тисяч метрів. Буріння супроводжувалося частим газонафтопроявленням, обвалами порід, звуженням стовбура свердловини в інтервалах залягання солей та глин. Буровий розчин вимагав регулювання його властивостей за рахунок використання хімічних реагентів. Ці спеціалісти працювали в Бориславі, Долині, Надвірній, Львові. І вони були своєрідними вчителями для нас, випускників нафтового факультету Львівського політехнічного інституту, нашими помічниками.

Під час буріння однієї з розвідувальних свердловин на Орівській плиті ми зіткнулися з таким «зварюванням» бурового розчину, що він уже великим валом повільно рухався по жолобах і робітники з лопатами прогрібали цей густий розчин, що уже не міг очиститися від вибуреної породи. З м. Івано-Франківська приїхав до нас Аркадій Семенаш і ми під його керівництвом почали підготовку до «вапнякування» цього розчину. На це пішов майже тиждень. Але яким було моє здивування, коли протягом одного циклу циркуляції бурового розчину у свердловині потік рідини легко став рухатися в жолобній системі, тиски на бурових насосах впали, а буріння свердловин помітно пришвидшилося. Під час навчання у Львові нас не вчили мистецтву регулювання властивостей бурового розчину. І Аркадій Семенаш прочитав для мене впродовж двох тижнів повний курс фізико-хімії бурових розчинів.

Найбільш колоритною серед спеціалістів з бурових розчинів була Уляна Скальська. Вона отримала прекрасну фахову підготовку у Львівському університеті і надовго присвятила себе розробці нових типів хімічних реагентів і способів регулювання властивостей бурових розчинів. Уляна Скальська приїжджала на бурові за першими нашими викликами, вчила нас, картала за нашу «малограмотність», не шкодувала часу на роботу з регулювання властивостей розчинів. Серед нас, буровиків, вона виділялася своєю інтелігентністю, образною мовою.

Після захисту моєї дисертації у 1969 році і приїзду до м. Івано-Франківська ми спілкувалися частіше, бували один в одного сім'ями. І тоді Уляна Скальська сказала мені, що її батько служить у Ворохті священником, що вони з родини Глібовицьких, які за походженням з родини Лепких.

В середині 70-х років вона підготувала кандидатську дисертацію, в якій досліджувала реагент – стабілізатор (РС) на основі поліакриламиду виробництва Калуського «Хлорвінілу». Під терміном «РС» ми розуміли

«реагент Скальської». Керівником її дисертаційної роботи був академік Ф. Овчаренко, на той час він працював секретарем ЦК Компартії України з ідеологічних питань.

Багато членів спеціалізованої ради (М. О. Ашрафян, Е. Б. Чекалюк) вважали, що цю роботу (після деякого допрацювання) можна було би представити до захисту докторської дисертації.

Після захисту дисертації Ф. Овчаренко поїхав до батька Скальської у село Дору біля містечка Яремче. Це був мужній поступок, оскільки комуністична ідеологія і релігія були антагоністами.

До речі, тато Уляни Скальської охрестив нашу дочку Олю в своїй домашній церкві, а сама Уляна стала її хресною мамою.

Ще через якийсь час У. Л. Скальська перейшла працювати в лабораторію ВНДІ бурової техніки, яку фактично сама й створила.

Але настали інші часи – українські буровики були зорієнтовані для роботи у Західному Сибіру, фінансування наукових робіт припинилося і Уляна Скальська оформила пенсію.

У. Скальська активно влилася в громадянське життя уже незалежної України, створила клуб української інтелігенції імені Богдана Лепкого, бути членом якого було і залишається почесною справою. Громадські ініціативи, акції, публікації, звернення до влади були завжди чіткими і дуже актуальними. Однією з найважливіших її справ було відкриття Івано-Франківської української гімназії. За це взялася пані Уляна з усією притаманною їй енергією і залучила до цієї справи окрім мене професора Богдана Ступарика, художника Панаса Заливахи. Ми і склали основу опікунської ради, а головою цієї ради було обрано мене на цілих 12 років.

З ініціативи пані Скальської було сформульовано вимоги до педагогічного колективу, на конкурсній основі обрано першим директором гімназії Зіновія Береговського. Ми не помилилися, наш вибір був вірним.

Пані Скальська готувала у той час різні звернення до влади, збирала людей, щоб ми могли впливати на владу у багатьох питаннях. І це їй майже завжди вдавалося. Такою є ця інтелігентна жінка міста Івано-Франківська.

Струс Ярослав Михайлович (1930-2001)

На початку 60-х років минулого століття Я. Струс працював начальником дільниці буріння в Бориславській конторі розвідувального буріння. В цей час ми і познайомилися з ним. Це був красивий чоловік з гарним обличчям, темним кучерявим волоссям, він вмів сміятися і гніватися, володів гарним голосом, знав і співав у відпочинковий час багато пісень. Разом з Омеляном Мрозком вони були нерозлучні. Обидва гарно одягалися і навіть робітничий спецодяг лежав на них якимось особливо гарно. Була у Я. Струса ще одна важлива риса – все, що він робив, повинно було бути красивим. На його бурових завжди панував взірцевий порядок та чистота. Не лише у культбудках, але й на всій території

бурової все було прибрано, пофарбовано, навіть доріжки були викладені побіленими каміннями. Я часто приїжджав до Струса і Мрозека, щоб подивитися на їхню роботу, повчитися у них. У вільний час (а його було дуже мало) ми збиралися компанією, пригощалися та співали, жартували та підсміювалися один з одного. Коли Я. Струс став керувати Бориславською конторою буріння, то за дуже короткий час турбінний цех, трубна база були так переобладнані, що кращих на той час в Україні не було. Я. Струс ввів в експлуатацію стенд для підготовки обсадних труб до спуску в свердловину, на якому кожна труба піддавалася гідравлічним випробуванням, різі труб перевірялися калібрами, труби маркувалися. Працювати буровим майстрам стало легше і безпечніше.

У 70-х роках у нього появилися проблеми у відношенні з партійними органами і він змушений був виїхати з м. Борислава на роботу в Уренгой (Сибір), де керував буровими підприємствами, дружив з російськими вельможами Віктором Чорномірдіним та Ремом Вяхіревим. Там відбувалася справжня велика битва з освоєння надпотужних газових родовищ Півночі Західного Сибіру.

У Сибіру Ярослава Михайловича почало турбувати серце і за рахунок «Газпрому» його відправили для операції на серце в Канаду, оплатили поїздку для його дружини.

Я. М. Струс ще працюючи в м. Бориславі, один із перших інженерів-буровиків збудував собі дім. Все у цьому житлі було продумано до дрібниць – від розміщень кімнат до допоміжних приміщень та до внутрішнього і зовнішнього оздоблення.

З розпадом СРСР Я.Струс повернувся в м. Борислав заможною людиною, де збудував автозаправну станцію, аптеку, продуктовий магазин.

Влітку 2001 року я лікувався у курортному містечку Трускавці і до мене приїхав Я. Струс. Я побачив людину, що і в свої 70 років мало змінилася зовнішньо. Він багато мені оповідав зі свого сибірського життя. На прощання він запросив мене і мою дружину до колиби на шашлик. У день нашої зустрічі я виїжджав з Трускавця, а крім того почував себе не зовсім здоровим, тому відмовився від його запрошення, але пообіцяв, що через 10 днів я приїду до нього в м. Борислав. Рівно через 10 днів я з м. Львова приїхав до Я. Струса, але виявилось, що дев'ять днів тому в автомобілі раптово зупинилося його серце. Ми з дружиною поїхали на цвинтар, стояла сильна серпнева спека, квіти та вінки на могилі висохли, а я все стояв і ніяк не міг відійти від його могили, бо не міг усвідомити, що Я. Струса уже серед нас немає.

Це був надзвичайно працьовитий інженер, дуже вимогливий до інженерної праці, він знав глибинну сутність буріння свердловин і у нього було чому навчитися.

**Тюпін Петро Степанович
(1921-2005)**

У другій половині п'ятидесятих років минулого століття на Прикарпатті починається масштабне геолого-розвідальне та експлуатаційне

буріння свердловин в містах Долина, Борислав та Надвірно. Одним із керівників бурових організацій, а пізніше об'єднання «Укрзахіднафтогаз» був Петро Степанович Тюпін. Особливо помітна роль цієї людини, як талановитого організатора бурових робіт, пов'язана з роботою Станіславського раднаргоспу, пізніше об'єднаного з Львівським раднаргоспом. Відкривалися нові контори глибокого буріння (дві в Надвірній, дві в Долині, дві в Бориславі, одна в Солотвино, не кажучи вже про геологорозвідальні експедиції в Калуші, Стрию, Самборі та в Нестрові біля Львова). Організовувалися бази обслуговування, вишкомонтажні і тампонажні контори, механічні цехи та інші. Працювало в цих організаціях біля десяти тисяч людей. На цей час припадає значний ріст випускників нафтового (гірничо-промислового) факультету Львівської політехніки. Ці випускники потрапляли мов би на фронт, оскільки треба було без розхитування братися за освоєння бурового простору в дуже важких геологічних умовах. Перед Тюпіним постало завдання за короткий період часу створити добре злагоджений працюючий колектив.

Я добре пам'ятаю інженерні наради, конференції, семінари, які особисто проводив Тюпін разом зі своїми помічниками Б. І. Чайковським, П. Р. Шпаком та іншими. Багато молодих інженерів через три – чотири – п'ять років роботи ставали головними інженерами, керівниками контор буріння (В. Пушкар, В. Дітчук, Й. Андрійчук, М. Іванов, І. Діак та інші).

Що було притаманне П. С. Тюпіну, так це вміння визначити та підтримати талановиту людину. І тоді для нього вже не існували заборони та застереження всесильного у той час КДБ чи вказівок партійних керівників.

Він призначав своїми заступниками, провідними інженерами, керівниками підрозділів багатьох інженерів, батьки яких були або засуджені за націоналізм, або були священиками, або знаходилися в смігратії. Серед них був Б. Чайковський, Р. Горбачевський, У. Скальська, І. Петраш і багато-багато інших. Як він це пояснював своїм політичним контролерам – не знаю. Найважливішою для нього була робота. Багато часу Тюпін приділяв роботі з молодими інженерами. Пам'ятаю, як він вимагав від нас доброго відношення до робітників, казав нам ніколи їх не кривдити. За час його керівництва об'єднанням кипіла інженерська робота. До нас приїжджали науковці з багатьох наукових центрів тодішнього СРСР – з Москви і Києва, Куйбишева і Баку, з Ленінграду і Уфи. Організація електробуріння, удосконалення турбінного буріння, застосування складних компоновок низу бурильної колони, перше впровадження буріння свердловин з продуванням вибою газоподібними азотами. Мені здається, що в ті часи Прикарпаття було своєрідним буровим полігоном.

На початку 90-х років Тюпін П. С. оформив пенсію, пропрацював у ЦНДІ об'єднання «Укрнафта», але, як на мене, почував себе покинутим і забутих. Він радо погоджувався посидіти в кафе чи ресторані з молодшими від себе інженерами, багато згадував про роботу в минулі роки.

Тепер на центральному Івано-Франківському цвинтарі стоїть скромний пам'ятник над могилами його дружини і його. Хто з нас іде алеєю цвинтаря, зупиняється та мовчки молиться за упокій його душі.

Чайковський Борис Ігорович (1928-1972)

Час минає дуже швидко і те, що відбувалося з нами у ті далекі 60- і 70-ті роки минулого століття уже історія, яку відновити майже не можливо. На наше щастя ми своєчасно закінчили нафтовий факультет Львівської політехніки, бо з кінця 50-х років минулого століття розгортаються великомасштабні геологорозвідувальні роботи уна Прикарпатті, Волино-Поділлі, а також у Закарпатті з метою пошуків нових родовищ нафти і газу. І ми з головою занурилися в дослідження бурового процесу, вивчали його і потім свої знання передавали іншим. А нас самих уже було кому навчати, бо з 1952 року у нафтогазову індустрію прийшли попередні випускники цього ж факультету. Серед них були Борис Чайковський, Євген Іваницький, Петро Шинкарик, Іван Петраш, Володимир Дітчук та багато-багато інших. Найкolorитнішою фігурою серед цих інженерів був Борис Чайковський, який до нашого приходу на роботу уже пройшов усі щаблі буровецької професії. Працював короткочасно робітником, а потім інженером і керівником – головним інженером Надвірнянської контори буріння, її директором, головним інженером тресту «Прикарпатбурнафта», заступником генерального директора об'єднання «Укрзахіднафтогаз». Він був старшим від нас лише на 12 років, але у молодому віці всі ті, хто є старшим від тебе на 5-, 7-, 10 років уже видаються зовсім старшими, дорослими. Я запам'ятав Бориса Ігоровича таким – був він середнього зросту, з рано облісілою головою. Масивним обличчям він нагадував Сократа. Мова його була чіткою, малослівною, добре вмотивованою, так що заперечувати йому було важко. Він керував ліквідацією багатьох відкритих нафтових і газових фонтанів, які на той час траплялися часто.

Була в нього особлива риса – це залучати до роботи в бурінні відомі на той час наукові організації Києва, Львова, Куйбишева (нині Самара), Москви, Уфи, Грозного та Баку. Практично майже одночасно впроваджувалися обладнання і технології для спуску стикозварних обсадних колон, буріння свердловин з продуванням вибою пінами і газами, широко застосовувалися електробури, нові типи турбобурів та доліт.

Здається, у 1962 чи 1963 роках П. С. Тюпін і Б. І. Чайковський запросили на Прикарпаття тодішнього Міністра нафтової промисловості легендарного Валентина Шашина. За тиждень часу йому продемонстрували всі на той час досягнення бурової науки, які впроваджувалися на Прикарпатті від Надвірної та Долини до Борислава. Деякі роботи носили чисто демонстраційний характер і мені, як молодому інженеру, видавалися «потёмкинськими дерев'ями». Після цієї поїздки В. Шашина на Прикарпаття було видано наказ Міністра про широке застосування нових технологій, обладнання та інструментів на просторах Радянського Союзу.

У 1966 році я виконував тимчасово обов'язки головного інженера тресту «Західбурнафтогаз» (П. В. Шинкарика було переведено для роботи у Міністерство геології у м. Києві). У цей час буріння велося на багатьох розвідувальних площах, свердловини майже одночасно увійшли в дуже складні геологічні умови, хімічних реагентів для регулювання властивостей бурових розчинів у нас не було. Об'їхавши за день свердловини, що бурилися, я розпорядився зупинити буріння, щоб не допустити ускладнень або аварій. Вранці наступного дня я зателефонував до м. Івано-Франківська Борису Ігоровичу і сказав про своє рішення. На що почув різку відповідь: «Це не робить Вам честі». Через кілька годин Чайковський приїхав до м. Борислава, ми знову поїхали на бурові і він зі мною погодився. Зі своїх запасів виділив необхідні нам реагенти, прислав з ЦНДЛ спеціаліста з бурових розчинів і ми продовжили безаварійне буріння.

Два роки перед тим я керував дільницею буріння, що розбурювала Свидницьке газове родовище. Чайковський часто приїжджав до нас, контролював нашу роботу і ми, може як ніхто у ті часи, були забезпечені технікою, матеріалами.

У вересні 1966 року викінчено бурінням розвідувальну свердловину №27 Іваники. За висновками геофізиків ми розкрили нафтовий пласт. Відповідно до цього було змонтовано на свердловині фонтанну гирлову арматуру на робочий тиск 22,5 МПа. Проте під час виклику припливу зі свердловини почав виділятися газ та конденсат і дуже швидко тиск на фонтанній арматурі наблизився до критичного. Вже через кілька годин з Івано-Франківська приїхали П. С. Тюпін і Б. І. Чайковський. Всю інженерну і організаційну роботу взяв на себе Чайковський. Маленька помилка могла призвести до страшного лиха, адже із свердловини під великим тиском ішло майже мільйон кубічних метрів газу та біля 300 тон газоконденсату за добу. Ця робота нагадувала роботу військового штабу при підготовці до битви. Через день свердловину заглушили і тільки пізніше заново освоїли.

До кінця цього ж року Чайковського відрядили на роботу в Алжир на посаду радника уряду. Лише зрідка ми дізнавалися про величезний авторитет Бориса Ігоровича серед алжирських спеціалістів. Я навчався в цей час в аспірантурі у Москві і декілька разів ми з ним зустрічалися в Міністерстві нафтової промисловості. В одну з останніх зустрічей того часу він подав мені листа за підписом Міністра нафтової промисловості Мальцева на адресу директора ВНДІ бурової техніки Асан-Нурі А.А. про розподіл мене на роботу в Алжир. Я цим листом не скористався, був призначений керівником Українського відділу цього ж інституту, а Б. І. Чайковський повернувся в Україну на посаду генерального директора об'єднання «Укрнафта».

Весною 1970 року я приїхав у м. Київ до Б. І. Чайковського. Він поспішав на якусь нараду в науковий інститут і запросив мене до своєї машини, де вирішив тодішні мої питання, підписав подані мною листи, при цьому він сказав, що його дуже болить голова. Це була наша остан-

ня зустріч. Через місяць він зустрічав в аеропорту Бориспіль якусь важливу іноземну делегацію і під час цієї зустрічі знепритомнів. А ще через 2 місяці після операції на мозку його не стало.

Україна в особі Б.І. Чайковського втратила одного з найвидатніших інженерів-нафтовиків. В очах сучасників авторитет Б.І. Чайковського був неперевершеним. Шкода, що час змиває навіть згадку про наших видатних інженерів, бо молоде покоління інженерів-буровиків уже не знає тих, хто торував дорогу до відкриття та освоєння нафтових та газових родовищ України, хто за своїми фаховими знаннями не знав собі рівних.

Шинкарик Петро Васильович (1929-1995)

П. В. Шинкарик у 1953 році з відзнакою закінчив гірничо-промисловий факультет Львівського політехнічного інституту, до 1964 року працював у м. Бориславі головним інженером контори буріння та головним інженером тресту “Західбурнафтогаз”.

Мені довелося свої перші “бурові університети” проходити м. Бориславі під керівництвом Петра Шинкарика. І не знаю, як би склалося моє професійне життя, якби не наука Петра Васильовича. У нього було чому вчитися: як забурювати свердловину, як ліквідувати складні аварії та ускладнення в бурінні, як мужньо і спокійно вести себе в умовах відкритих нафтогазових фонтанів. Хоча нас, випускників Львівської політехніки 1959 року, розділяло з ним лише 7 літ вікової різниці, але досвід Петра Шинкарика був значущим, його знання бурового процесу настільки глибокими, що ми черпали у нього і знання, і форми спілкування, і норму поведінки. І це набагато років вперед формувало наш світогляд.

Ми, молоді спеціалісти, часто розгублювалися у важких, особливо аварійних ситуаціях і дозволяли собі телефонувати Петрові Васильовичу в будь-яку пору дня чи ночі. І я не пам'ятаю такого випадку, коли б він за це підвищив на нас голос. Зустрічні його питання давали змогу нам самим краще усвідомлювати, що ж трапилось із свердловиною. Петро Васильович не лише давав необхідні поради, а й до ранку за його вказівкою на бурову доставлялися необхідна техніка, інструмент, план робіт, приїжджав інженер із складних робіт. В результаті, свердловини знову бурилися.

Поява багатьох нових технологій та інструменту пов'язані з інженерним талантом Шинкарика. На Рудківському газовому родовищі ще в кінці 50-х років бурилися перші похило-спрямовані свердловини. Перші спуски обсадних колон частинами з використанням муфт, розроблених Шинкариком, здійснено на свердловинах площі Стрільбниці. Унікальні роботи на Рудківському родовищі, пов'язані з ліквідацією величезних газових грифонів в селі Тулиголова (це взагалі унікальне явище в історії газової промисловості) проведено в 1959 році теж під керівництвом П. Шинкарика. В Україні було чимало відкритих нафтових і газових

фонтанів. І ліквідація цього лиха в багатьох випадках лягала на плечі Петра Васильовича.

На початку 70-х років починаються розвідувальні роботи на шельфі Чорного моря. Створюється вітчизняна техніка. Монтуються на морі стаціонарні бурові платформи. Розвідувальні роботи призводять до відкриття першого в Україні шельфового родовища газу – Голіцинського. Організація цих робіт була покладена на Петра Васильовича. Природний інженерний талант, великі організаторські здібності поєднувалися у нього з великою особистою скромністю в усьому, в якійсь особливій тільки йому притаманній делікатності. Його дуже любили і, водночас, боялися ті, хто не відповідав великій вимогливості Петра Васильовича до якості інженерної праці та норм людської моралі.

Коли я навчався в московській аспірантурі кожен приїзд Шинкарика в Міністерство геології СРСР був для мене подією. Я кидав усю роботу і біг на зустріч з ним. Ми говорили про життя, про мої дослідження, згадували минуле.

Не кажу вже про етичну сторону його характеру. В той час серед буровиків панував культ випивок – пили, коли починалося буріння, коли цементували колони, ліквідували аварії, коли відвідували нас різноманітні бурові інспекції. А П. В. Шинкарик в цьому “буровецькому побуті” був тверезим інженером. При ньому в нас, молодих інженерів, навіть в думках не було вести себе неетично. Постійно красиво одягнутий, стрункий, суворий з вигляду та добрий душею він справляв на нас, молодих випускників Львівської політехніки, якийсь магічний вплив. Поруч з ним ми ставали начебто розумнішими.

В той час не було системи післядипломної освіти. І тому це навчання він здійснював сам, коли організовував періодичні виїзди бориславських інженерів в міста Долину та Надвірну, відряджавав нас на різні семінари, школи. Часто виїжджав з нами на це навчання. Ми мали нагоду подивитися цікавинки наших найближчих сусідів. З 1965 року Петро Шинкарик працював у Києві, в Міністерстві геології України, кілька останніх років у Румунії і останні два роки в Українському нафтогазовому інституті.

13 серпня 1995 року в автомобільній аварії обірвалося життя одного із кращих інженерів-буровиків України, який так багато зробив для відкриття великих нафтових і газових родовищ, в тому числі і на шельфі Чорного моря.

Янкевич Олексій Миколайович (1937-2003)

Він був лише на три місяці молодшим від мене і на рік пізніше закінчив нафтовий факультет Львівської політехніки (1960 р.). Я підтримував з ним контакти аж до захисту у 1969 році кандидатської дисертації. В цей час він працював інспектором Комітету народного контролю в м. Івано-Франківська. Я побачив гарно одягнену людину з красивим і мужнім обличчям, людину, що вміла аналізувати господарювання в народному господарстві і у першу чергу в нафтовій і газовій промисловос-

ті. До переходу на роботу в Комітеті він пройшов типовий шлях молодого спеціаліста – працював помічником бурильника, бурильником, буровим майстром та начальником бурової. Він потоваришував з тодішнім молодим директором Надвірнянської контори розвідувального буріння Петром Шпаком, старшим від нього лише на п'ять років, якого пізніше призначили головним геологом об'єднання «Укрзахіднафтогаз» в м. Івано-Франківську. Саме П. Шпак порекомендував О. Янкевича для роботи в цьому Комітеті

У Янкевича була молода красива дружина Лариса, яку він привіз із Кубані, будучи там ще студентом на практиці. І у них підростали дві маленькі донечки, для догляду за якими приїхала з Кубані їхня бабця. Я тоді не знав, що батько його дружини – кубанський козак відбув 25 років у Воркутинських таборах. Не знав також, що його молодший син командував у війну Таманською дивізією і лише після війни відкривалося, що він «сын врага народа» і його терміново демобілізували з «лав советської армії», але враховуючи його військові заслуги, призначили керувати об'єднанням «Рослес» в Москві. Ще один брат дружини Янкевича Олексій теж переїхав жити до м. Івано-Франківська і, навчався в нашому Інституті нафти і газу.

Батько, мати і сестра Олексія Янкевича жили у селі недалеко від селища Дашава, яке й дало назву Дашавському газовому родовищу.

Невдовзі влітку 1969 року або 1970 року Янкевича призначено начальником Надвірнянського Управління бурових робіт, в яке влилися дві контори розвідувального буріння – Надвірнянське та Пасічнянське. Практично ці контори буріння знаходилися на межі колапсу, оскільки більшість бурових були в аварійному стані, плани не виконувалися, зарплата у робітників та інженерів була маленькою, постачання долотами, хімічними реагентами, мастильними речовинами, трубами було дуже поганим.

Через місяць після його призначення керівником цього бурового підприємства Янкевич запросив мене у м. Надвірну. Він відклав всю буденну роботу і ми з ним поїхали у м. Яремче і просиділи над р. Прутом цілий день. З його розповідей розкрилася гнітюча картина. Головним було те, що інженери і техніки не бачили умов для нормальної роботи. Я у той час очолював Український відділ промислових випробувань Всесоюзного науково-дослідного інституту бурової техніки у Москві. Тож я запропонував скласти програму досліджень нових типів бурових доліт, компоновок низу бурильної колони, турбобурів нових конструкцій. Тоді ж ми домовилися, що Янкевич організує і підтримає дослідження буріння свердловин електробурами з продуванням вибою стиснутим повітрям. Одночасно ми домовилися про розкриття продуктивних менілітових відкладів Битківського нафтового родовища на трьох свердловинах з продуванням вибою пінами, азотом та природним газом. Це була на той час об'ємна програма дослідницьких робіт. В той день ми думали над тим, як залучити інженерів та бурових майстрів до

цієї роботи, зацікавити людей своєю професією та зродити надію на те, що не все так безнадійно, як виглядало тоді.

Через кілька днів у Москві я доповідав директору інституту Асан-Нурі Асан Абдулаєвичу про наші домовленості з О. Янкевичем.

Інститут безкоштовно передав 50 доліт нових конструкцій на випробування у м. Надвірну, комплект іншого обладнання, серед якого були і турбобури, конструкції професора Іоаннесяна. Я добре попрацював, щоб отримати дозвіл передати з м. Долини в м. Надвірну компресори високого та низького тисків. Для розкриття пластів газами необхідно було отримати дозвіл державної гірничотехнічної інспекції. Довелося починати з районної інспекції м. Надвірна, потім у Львівській регіональній, а далі в м. Києві та м. Москві. У Москві було легше, оскільки там ведучим спеціалістом працював О. Ємельянов, який свого часу навчався у Дрогобицькому нафтовому технікумі. Коли я всі дозвільні документи подав заступнику Міністра нафтової промисловості В. І. Міщевичу, то він мені докинув: «Роман! Куди ты меня толкаешь? Разве ты не знаешь, что от травматизма в нефтяной промышленности гибнет больше людей, чем солдат во Вьетнаме» (в той час була В'єтнамсько-радянсько-американська війна). Але на проведення цього експерименту дозвіл він дав, щоправда під мою персональну відповідальність. Що стосується розкриття продуктивного пласта азотом, то всю технологічну роботу виконував Г. Г. Семак, який пізніше захистив під моїм науковим керівництвом кандидатську дисертацію.

У всіх цих роботах найактивнішу роль відігравав Олексій Янкевич. Монтаж силового агрегату – генератора високої напруги, його розміщення та пуск відбувалися під безпосереднім контролем Янкевича. Поволі-поволі оживало інженерне життя цього управління і вже через рік стало одним з кращих у системі об'єднання «Укрнафта».

Кілька років керівництва Олексія Янкевича Надвірна була нсмовби великою лабораторією для всіх, хто працював над створенням нових технологій та обладнання.

Є різні інженери-практики. Для одних все уже розроблено, все освоєно і нічого нового придумувати не треба. Для інших будь-яка нова технічна ідея вимагає її промислової перевірки. Недавно я попросив одного буровика України, що займає пост заступника Голови правління відкритого акціонерного товариства пана К. проглянути та дати оцінку конструкції гравійного фільтру для горизонтальних свердловин. На моє велике здивування цей пан К. категорично відмовився навіть поглянути на запропоновану конструкцію. Бо, мовляв, це все уже розроблено фірмою «Шлюмберже» і це все можна у них купити. Я уже не кажу про вартість такого фільтру, яка складає півмільйона доларів для вертикальної свердловини. Для горизонтальної – у два рази більше. А таких свердловин цій компанії доведеться бурити декілька сотень. Ось і є різниця між Янкевичем і цим багатим та самовпевненим сучасним керівником.

В середині 70-х років Олексія Янкевича обрано головою міста Яремче, пізніше одним із заступників голови міста Івано-Франківськ.

На цьому і закінчилась бурова кар'єра досить талановитого та здібного інженера-буровика.

Я і досі не можу забути з якою привітністю, з яким інтересом він зустрічав науковців і як допомагав втіленню нових технологій у практику. Для мене він був щирим приятелем, декілька разів запрошував мене на мисливське полювання в Карпати, допомагав чим міг, а у скрутну годину позичав гроші, не питаючись, коли я їх йому поверну.

На жаль, хвороба серця укоротила його життя.

Епілог

Шістнадцять прізвищ інженерів-буровиків Прикарпаття згадано в цих есеях. Цей перелік видатних інженерів-буровиків другої половини ХХ-го століття є неповним. Сюди не увійшли прізвища Мирона Івасіва, Миколи Касіяна, Едуарда Піддубного, Мирона Гайового, Любомира Гуралія, Омеляна Камінського, Богдана Кобрини, Григорія Питляра, Михайла Агапчева та інших, трудова діяльність яких була спрямована на розвідку нафтогазових родовищ та на їх введення у розробку. Ніякими мільйонами чи мільярдами грошових одиниць не оцінити їхню працю. Під їх керівництвом працювали тисячі інженерів та робітників, життя яких треба було зберегти за будь-яких критичних обставин. Саме тому, можливо, їх вік був недовгим. Як на мене, варто продовжувати розповіді про життя цих людей у наступних номерах “Прикарпатського вісника НТШ”. Це яскраві особистості, які були нашими сучасниками. Давайте будемо це робити!

Стаття поступила в редакційну колегію 23.10.2009 р.

Рекомендовано до друку д.т.н., професором Мойсишиним В.М.

SHORTEST ESSAYS ABOUT PRECARPATHIAN ENGINEERS SECOND HALF OF THE XX CENTURY

R. S. Yaremiychouc

*Ivano-Frankivs'k National Technical University of Oil and Gas;
76019, Ivano-Frankivs'k, Carpats'ka street, 15;
e-mail: public@nung.edu.ua.*

An author tells about the known Precarpathian engineers of XX age, which devoted the life to the improvement of technique and technology of the boring drilling and booty of hydrocarbons.

Key words: technology of the boring drilling of mining holes, booty of oil and gas, tamponouvation of mining holes, mastering of mining holes.

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ

Атаманюк Роман Богданович – аспірант кафедри радіофізики та електроніки Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Балашова Н.В. – студентка факультету економіки підприємства Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Безгачнюк Юрій Володимирович – асистент кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматизації Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Бойко Василь Степанович – доктор технічних наук, професор кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Витвицька Оксана Миколаївна – асистент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Витвицький Ярослав Степанович – доктор економічних наук, професор кафедри економіки підприємства Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Возняк Лідія Володимирівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри нафтогазової гідромеханіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Возняк Мирослав Петрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортування та зберігання нафти і газу Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Горічок Ігор Володимирович – науковий співробітник, завідувач лабораторіями кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Грицишин Василь Іванович – кандидат гірничо-мінералогічних наук, доцент, консультант-геофізик ВАТ “Карпатське управління геофізичних робіт”.

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.

Дзундза Богдан Степанович – кандидат фізико-математичних наук, науковий співробітник фізико-хімічного інституту Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Дубей М. В. – аспірант кафедри математичного і функціонального аналізу Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Загороднюк Андрій Васильович – доктор фізико-математичних наук, завідувач кафедри математичного і функціонального аналізу Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Заливаха Ярослав Опанасович – інженер відділу нафтовіддачі та інтенсифікації видобутку нафти Науково-дослідного і проектного інституту ВАТ “Укрнафта”.

Заміховський Леонід Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних технологій в системах управ-

ління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Заторський Роман Андрійович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри алгебри та геометрії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Зікратий Сергій Вікторович – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій в системах управління та автоматики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Камасва Світлана Олегівна – асистент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Качмар Юрій Дмитрович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний інженер відділу нафтовіддачі та інтенсифікації видобутку нафти Науково-дослідного і проектного інституту ВАТ “Укрнафта”.

Кланічка Юрій Володимирович – науковий співробітник фізико-хімічного інституту Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Климович Ігор Федорович – провідний інженер відділу нафтовіддачі та інтенсифікації видобутку нафти Науково-дослідного і проектного інституту ВАТ “Укрнафта”.

Крамар Валерій Максимович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри оптики і спектроскопії Чернівецького національного університету імені Юрія Федьковича.

Кривенко Галина Мирославівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри безпеки життєдіяльності Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Криштопа Людмила Іванівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Лагуш Роман Федорович – асистент кафедри розробки та експлуатації нафтових і газових родовищ Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Левчук Катерина Григорівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної механіки факультету авіаційних і космічних систем Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”.

Мельник Петро Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри будівництва Івано-Франківського університету права імені Короля Данила Галицького.

Михалевич Олег Тадейович – кандидат технічних наук, заступник головного інженера ДК “Укртрансгаз”.

Мойсишин Василь Михайлович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Никифорчин Ірина Володимирівна – кандидат економічних наук, доцент кафедри статистики і вищої математики Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Онацько 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.

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.

Сав'юк Лариса Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, директор центру дистанційного навчання Галицької академії (м. Івано-Франківськ).

Собкович Роман Іванович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри алгебри та геометрії Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Степаненко Світлана Григорівна – асистент кафедри теоретичної механіки факультету авіаційних і космічних систем Національного технічного університету “Київський політехнічний інститут”.

Тимків Дмитро Федорович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інформатики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Федак Іван Васильович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри математичного і функціонального аналізу Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Федоришин Максим Григорович – програміст Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Фреїк Дмитро Михайлович – доктор хімічних наук, професор, директор фізико-хімічного інституту, завідувач кафедри фізики і хімії твердого тіла Прикарпатського національного університету імені Василя Стефаника.

Ходак Любомир Мирославович – аспірант філії кафедри ЮНЕСКО “Нові інформаційні технології в освіті для всіх” Галицької академії (м. Івано-Франківськ).

Цідило Іван Васильович – кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри теоретичної механіки Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

Цьомко Володимир Васильович – начальник групи гідророзриву пластів відділу нафтовіддачі та інтенсифікації видобутку нафти Науково-дослідного і проектного інституту ВАТ “Укрнафта”.

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).

Яцишин Василь Дмитрович – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Івано-Франківського національного технічного університету нафти і газу.

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 завдання (проблеми) та виклад отриманих автором (співавторами) нових результатів. Не допускається переказ відомих фактів, наведення посилань на неопубліковані роботи.

2. В редакцію подаються:

- два примірники рукопису статті (включаючи ілюстрації і таблиці), надруковані на білому папері формату А4;
- рецензія на статтю;
- електронний варіант статті, підготовлений на комп'ютері, у вигляді неархівованого або архівованого (ZIP, RAR) файлу – CDR/RW.

3. Мова статті – українська або англійська. Обсяг не повинен перевищувати 20 сторінок.

4. Статтю слід оформити так: УДК, назва роботи; прізвище та ініціали автора (співавторів), місце праці (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 усі перелічені 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 у порядку посилань на джерела в тексті статті) та оформляється згідно з вимогами ВАК України (бюлетень №3, 2008 р.). Іноземна література подається 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 газонафтоконденсатовіддачі 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 вказати прізвище, ім'я та по-батькові автора (співавторів), науковий ступінь, вчене звання, займану посаду (у кінці кожного випуску журналу формуємо відомості про авторів).

Електронний варіант статті повинен задовольняти таким вимогам:

1. Стаття набирається у редакторі Microsoft WORD 95/7.0-97 на аркуші формату В5 182x257 мм, поля (мм): верхнє – 20, нижнє – 10, внутрішнє – 30, зовнішнє – 20.
2. **Основний текст** набирається так:
 - 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 і 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 у 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
2009. – № 1(5)
364 с.**

Відповідальний за випуск	<i>Василь МОЙСИШИН</i>
Літературна редакція	<i>Оксани РОСПОПИ</i>
Набір та макетування	<i>Любомири ДЯКІВ</i>
Комп'ютерна правка	<i>Богдана ДЕМКІВА</i>
Коректура	<i>Наталії СТЕЦІЮК</i>



Підп. до друку 21.12.2009 р.
Формат 60x84/8. Папір офсет. Гарнітура "Times New Roman".
Друк на різнографі. Ум.-друк. арк. 45,5.
Наклад 300 пр. Зам. № 111.

Видавець
Прикарпатський національний університет
імені Василя Стефаника
76025, м. Івано-Франківськ,
вул. С. Бандери, 1; тел. 71-56-22
E-mail: vdvcit@pu.if.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2718 від 12.12.2006