

# КОНТРОЛЬ, АВТОМАТИКА ТА ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 681.121.84:681.11.035

## ПЛАНУВАННЯ ФАКТОРНОГО ЕКСПЕРИМЕНТУ ДОСЛІДЖЕНЬ ЗАСОБІВ ОБЛІКУ ПРИРОДНОГО ГАЗУ В УМОВАХ РЕАЛЬНОГО СЕРЕДОВИЩА

*Н.І.Петришин, Т.І.Присяжнюк**ДП «Івано-Франківськстандартметрологія», м. Івано-Франківськ, вул. Вовчинецька, 127,  
тел. (03422) 30200*

*Розглядається актуальне питання визначення метрологічних характеристик засобів обліку природного газу, що працюють в умовах реального середовища. На основі теорії планування експерименту розроблено методика визначення залежності похибки від тиску та в'язкості вимірюваного середовища. Одержано математичні моделі, що описують поведінку роторного та турбінного лічильників газу за зміни тиску, витрати і густини.*

*Ключові слова: лічильник газу, планування експерименту, математична модель похибки*

*Рассмотрен актуальный вопрос определения метрологических характеристик средств учета природного газа, работающих на реальной среде. На основе теории планирования эксперимента разработана методика определения зависимости погрешности от давления и вязкости измеряемой среды. Получены математические модели, описывающие поведение роторного и турбинного счетчиков газа при изменении давления, расхода и плотности.*

*Ключевые слова: счетчик газа, планирование эксперимента, математическая модель погрешности*

*The review of definition of metrological characteristics of flowmeters, working at the real gas. On the basis of theory of planning of experiments is developed method of definition error from changing of pressure and density of gas. Mathematical equation of such dependency are received.*

*Keywords: gas meter, planning of experiments, mathematical model of error*

Підвищення якості та метрологічної надійності засобів обліку природного газу постійно супроводжується їх державними випробуваннями з метою сертифікації типу [1], що здійснюються для правильного планування й організації експериментальних досліджень. Науковою основою проведення таких досліджень є теорія планування експерименту [2, 3], практичним результатом якої є формування мети експерименту, аналіз впливових факторів та їх відбір, дослідження взаємовпливів та взаємозв'язків з метою визначення виду моделі досліджуваного засобу обліку природного газу. На підставі запропонованої моделі будується план експериментальних досліджень з оптимальним відбором факторів, що впливають на якість та надійність засобів обліку.

Суттєвою проблемою під час експериментальних досліджень засобів обліку природного газу є неадекватність їх метрологічних та експлуатаційних характеристик, одержаних у лабораторних умовах на робочому середовищі –

повітрі, а не на реальному середовищі – природному газі. Розроблений технічний регламент на лічильники газу також передбачає їх повірку, градування на повітрі за атмосферного тиску, незважаючи на те, що аналогічні процедури за робочих умов (тиск, температура, склад газу, густина, в'язкість тощо) вигідніше споживачам та постачальникам газу, оскільки за умов, що відрізняються від робочих, виникає додаткова похибка [4].

Необхідно зазначити, що низка закордонних виробників сучасних засобів вимірювальної техніки (ЗВТ) обліку газу в технічній документації вказують характеристики як для роботи на повітрі за атмосферного тиску, так і на природному газі за атмосферного і високих тисків (до 6 МПа).

В Україні державні випробування та метрологічне підтвердження засобів обліку природного газу проводяться на повітрі, виходячи із вимог техніки безпеки [5], тому результати натурного експерименту неадекватні реальним

Таблиця 1 – Результати досліджень роторного лічильника газу типу Темп G100 на природному газі та на повітрі

	Газ	Повітря	Газ	Повітря	Газ	Повітря	Газ	Повітря
P, кПа	100	100	100	100	300	300	300	300
q, м <sup>3</sup> /год	32	32	160	160	32	32	160	160
$\bar{\delta}$ , %	0,60	0,80	0,05	0,60	0,80	0,85	0,45	0,65

значенням. Таким чином, для побудови математичної моделі досліджуваних засобів обліку необхідно мати чітку інформацію про їх функціональні можливості, поведінку окремих складових елементів, вплив різних факторів, взаємодію між елементами і впливовими факторами при конкретизованих умовах випробувань, що можуть відрізнятись від реальних умов експлуатації даних засобів.

Отже, на основі теорії планування експерименту ідентифікуємо метрологічні характеристики як об'єкт дослідження з їх математичною моделлю, тобто системою математичних залежностей, що відображає їх властивості в умовах реального газового середовища, в якому засоби обліку експлуатуються.

У процесі планування експерименту для вирішення практичних завдань необхідно догадатись кількісно вираженої характеристики мети, основний параметр якої називається параметром оптимізації. Так як метою досліджень технічних засобів обліку природного газу є їх метрологічна надійність, виберемо за параметр оптимізації їх основну похибку і спрогнозуємо її мінливість для конкретних технічних засобів обліку (наприклад, роторних та турбінних лічильників газу) за таких параметрів робочого середовища, як тиск, густина, об'ємна витрата, що в сукупності будуть впливовими факторами. Таким чином, після вибору параметра оптимізації і відбору факторів задачу зведемо до знаходження відповідності між ними у вигляді статичної математичної моделі:

$$\delta = F(q, P, \rho),$$

де:  $\delta$  – основна похибка лічильника газу;

$q, P, \rho$  – вимірювана змінна величина відповідно тиску, об'ємної витрати природного газу, густини, що приймає у визначений момент часу деяке значення і відповідає одному з можливих способів впливу на основну похибку вимірювання лічильника газу.

З використанням теорії повного факторного експерименту [2], в якому використовуються усі можливі комбінації рівнів (умовних кількісних значень), проведемо серію експериментальних досліджень за “планом типу  $2^n$ ”, що характеризується двома рівнями: верхньому значенню варіювання фактору умовно присвоюється рівень (+1), а нижньому – рівень (-1), а також показником k – кількістю факторів. Таким чином, для нашого експерименту серія дослідів n складатиме  $2^3$ , тобто 8 дослідів. Для зміни (варіювання) рівнів впливових факторів дослідження роторного лічильника газу типу

Темп G100 проведемо на установці для перевірки лічильників газу типу УПЛГ, яка працює на повітрі за температур, близьких до нормальної (20°C), та атмосферного тиску (всього 2 дослідів). Відтак екстраполюємо отримані результати за формулами, наведеними в [6] для тиску повітря 300 кПа (2 дослідів), і на установці для перевірки лічильників газу на природному газі за тисків, близьких до атмосферного ( $\approx 100$  кПа) та середнього ( $\approx 300$  кПа) (також 4 дослідів), у діапазоні витрат від  $Q_t$  до  $Q_{max}$ , де похибка вимірювання витрати не перевищує  $\pm 1\%$ . (табл. 1)

Якщо інтервал варіювання для i-го фактора вибрати таким, що дорівнює

$$\Delta_i = \frac{X_{ih} - X_{il}}{2}, \quad (1)$$

де  $X_{ih}$  та  $X_{il}$  – верхнє та нижнє значення факторів, то його кодовані рівні, що визначаються за формулою

$$X_i = \frac{X_{ihl} - X_{ilo}}{\Delta_i}, \quad (2)$$

будуть дорівнювати (+1) для верхнього кодового рівня і (-1) для нижнього кодового рівня, тобто:

$$(+1) = \frac{X_{ih} - X_{io}}{\Delta_i}; \quad (3)$$

$$(-1) = \frac{X_{il} - X_{io}}{\Delta_i}. \quad (4)$$

Нульовий рівень фактора визначається за формулою:

$$X_{io} = \frac{X_{ih} + X_{il}}{2}. \quad (5)$$

За результатами досліджень сформуємо матрицю даних факторного експерименту (табл. 2).

Враховуючи фактори взаємодії як добутки окремо взятих факторів, побудуємо суміщену матрицю плану факторного експерименту типу  $2^3$  в кодованих значеннях (+1) і (-1) усіх можливих комбінацій рівнів (табл. 3):

Математична модель у кодованих значеннях для факторного експерименту типу  $2^3$  описується формулою [2,7] в такому вигляді:

$$\delta := b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 \cdot X_2 + b_{13} X_1 \cdot X_3 + b_{23} X_2 \cdot X_3 + b_{123} X_1 \cdot X_2 \cdot X_3. \quad (6)$$

Розрахуємо коефіцієнти регресії для математичної моделі в кодованих значеннях (6) за формулами (7-14):

Таблиця 2 – Матриця даних факторного експерименту

Рівні факторів та інтервали варіювання	Натуральні значення для кодованих позначень факторів		
	X1 (тиск)	X2 (витрата)	X3 (густина)
Верхній рівень	300	160	1,24
Нижній рівень	100	32	0,78
Нульовий рівень X <sub>0</sub>	200	96	1,01
Інтервал варіювання Δ	100	64	0,23

Таблиця 3 – Суміщена матриця факторного експерименту

№ досліду	Кодовані значення факторів			Кодовані значення факторів взаємодії				Похибка δ, %
	X1	X2	X3	X1X2	X1X3	X2X3	X1X2X3	
1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	0,6
2	+1	-1	-1	-1	-1	1	1	0,05
3	-1	+1	-1	-1	1	-1	1	0,8
4	+1	+1	-1	1	-1	-1	-1	0,45
5	-1	-1	+1	1	-1	-1	1	0,8
6	+1	-1	+1	-1	1	-1	-1	0,6
7	-1	+1	+1	-1	-1	1	-1	0,85
8	+1	+1	+1	1	1	1	1	0,65

$$b_0 = \sum_i \delta_i ; \quad (7)$$

$$b_1 = \frac{\sum X1 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (8)$$

$$b_2 = \frac{\sum X2 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (9)$$

$$b_3 = \frac{\sum X3 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (10)$$

$$b_{12} = \frac{\sum X1 \cdot X2 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (11)$$

$$b_{13} = \frac{\sum X1 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (12)$$

$$b_{23} = \frac{\sum X2 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} ; \quad (13)$$

$$b_{123} = \frac{\sum X1 \cdot X2 \cdot X3 \cdot \delta_i}{n} . \quad (14)$$

$$\delta(X_1, X_2, X_3) = 0.6 - 0.163 \cdot X_1 + 0.088 \cdot X_2 + 0.125 \cdot X_3 + 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.063 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0.062 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.025 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 .$$

Перехід до математичної моделі у натуральних значеннях здійснюється за формулою (2) до кожного з кодованих факторів з урахуванням факторів взаємовпливу:

$$\delta = b_0 + b_1 \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} + b_2 \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} + b_3 \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{12} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} + b_{13} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{23} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} + b_{123} \cdot \frac{X_1 - X_{10}}{\Delta_1} \cdot \frac{X_2 - X_{20}}{\Delta_2} \cdot \frac{X_3 - X_{30}}{\Delta_3} . \quad (16)$$

Після відповідних розрахунків одержимо математичну модель у натуральних значеннях:

$$\delta(q, P, \rho) = 0.3944 - 1.1082 \cdot 10^{-2} q + 1.581 \cdot 10^{-3} P + 0.3457 \rho + 2.106 \cdot 10^{-5} qP + 7.677 \cdot 10^{-3} q\rho - 1.065 \cdot 10^{-3} P\rho - 1.698 \cdot 10^{-5} qP\rho . \quad (17)$$

Проведемо перевірку моделі на адекватність, порівнюючи розрахункові дані похибок з похибками, отриманими в ході експериментів. Результати перевірки наведено в таблиці 4.

Одержана похибка неадекватності математичної моделі експериментальним даним характеризує її поведінку в точках нижнього та верхнього значень факторів. Для перевірки моделі

і одержимо значення:

$$b_0 = 0.6 \quad b_1 = -0.163 \quad b_2 = 0.088 \quad b_3 = 0.125$$

$$b_{12} = 0.025 \quad b_{13} = 0.063 \quad b_{23} = -0.062 \quad b_{123} = -0.025$$

Математична модель (6) в кодованих значеннях після підставлення одержаних коефіцієнтів регресії матиме такий вигляд:

Таблиця 4 – Таблиця перевірки моделі на адекватність

№ досліджу	Розрахункова похибка	Експеримент	Похибка неадекватності
	$\delta$	$\bar{\delta}$	$\Delta_{\delta} = \delta - \bar{\delta}$
1	0,601	0,6	0.001
2	0,049	0,05	-0.001
3	0,801	0,8	0.001
4	0,449	0,45	-0.001
5	0,799	0,8	-0.001
6	0,599	0,6	-0.001
7	0,851	0,85	0.001
8	0,651	0,65	0.001

Таблиця 5 – Таблиця дослідження адекватності моделювання похибки роторного лічильника газу ТЕМП-100 на повітрі та природному газі

q, м <sup>3</sup> /год	P=100 кПа						P=300 кПа					
	Δ <sub>газ</sub> , %			Δ <sub>повітря</sub> , %			Δ <sub>газ</sub> , %			Δ <sub>повітря</sub> , %		
	Експ.	Розр.	Неадекват.	Експ.	Розр.	Неадекват.	Експ.	Розр.	Неадекват.	Експ.	Розр.	Неадекват.
32	0,6	0,601	0,001	0,8	0,799	0,001	0,80	0,801	0,001	0,85	0,851	0,001
80	0,4	0,394	-0,006	0,75	0,724	-0,024	0,30	0,669	0,369	0,75	0,776	-0,024
112	0,01	0,256	0,246	0,5	0,674	0,176	0,35	0,581	0,231	0,5	0,726	0,176
160	0,05	0,049	-0,001	0,6	0,599	0,001	0,45	0,449	-0,001	0,65	0,651	0,002

Таблиця 6 – Результати досліджень турбінного лічильника газу типу ЛГ-80 на природному газі та на повітрі

	Газ	Повітря	Газ	Повітря	Газ	Повітря	Газ	Повітря
P, кПа	100	100	100	100	370	370	370	370
q, м <sup>3</sup> /год	40	40	250	250	40	40	250	250
$\bar{\delta}$ , %	0,15	0,6	0,2	0,25	-0,3	0,65	0,85	0,3

в інших точках діапазону зміни факторів порівняємо дані розрахунків похибок з експериментальними, одержаними на установці для повірки лічильників газу типу УПЛГ (табл. 5).

Неадекватність моделювання похибки при цьому складає 0,37%.

Після підставлення значення густини природного газу (0,78 кг/м<sup>3</sup>) у формулу (17) одержимо спрощену модель:

$$\delta l(q, P) = 0.664 - 5.093 \cdot 10^{-3} q + 7.5 \cdot 10^{-4} P + 7.813 \cdot 10^{-6} qP. \quad (18)$$

Для кращого розуміння поведінки роторного лічильника на природному газі доцільно геометрично інтерпретувати одержану математичну модель у координатах (q, P, ρ).

Геометрична інтерпретація одержаної математичної моделі має вигляд (рис. 1).

Аналогічні дослідження були проведені для турбінного лічильника газу типу ЛГ-80, результати яких наведено в табл. 6.

Математична модель, розрахована за формулами (1-14), матиме такий вигляд:

а) у кодованих значеннях:

$$\delta(X_1, X_2, X_3) = 0.337 - 6.2 \cdot 10^{-2} \cdot X_1 + 3.8 \cdot 10^{-2} \cdot X_2 + 0.113 \cdot X_3 + 0.137 \cdot X_1 \cdot X_2 - 0.237 \cdot X_1 \cdot X_3 - 1.3 \cdot 10^{-2} \cdot X_2 \cdot X_3 - 0.137 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3; \quad (19)$$

б) у натуральних значеннях:

$$\delta(q, P, \rho) = -7.204 \cdot 10^{-2} - 1.743 \cdot 10^{-3} q + 6.851 \cdot 10^{-3} P + 0.5808 \rho + 5.211 \cdot 10^{-5} qP + 6.1345 \cdot 10^{-3} q\rho - 5.674 \cdot 10^{-3} P\rho - 4.202 \cdot 10^{-5} qP\rho \quad (20)$$

Неадекватність моделювання похибки не перевищує 0,4%.

Спрощена математична модель похибок турбінного лічильника газу типу ЛГ-80 на реальному робочому середовищі матиме вигляд:

$$\delta l(q, P) = 0.381 - 1.695 \cdot 10^{-3} q - 2.425 \cdot 10^{-3} P + 1.933 \cdot 10^{-5} qP. \quad (21)$$

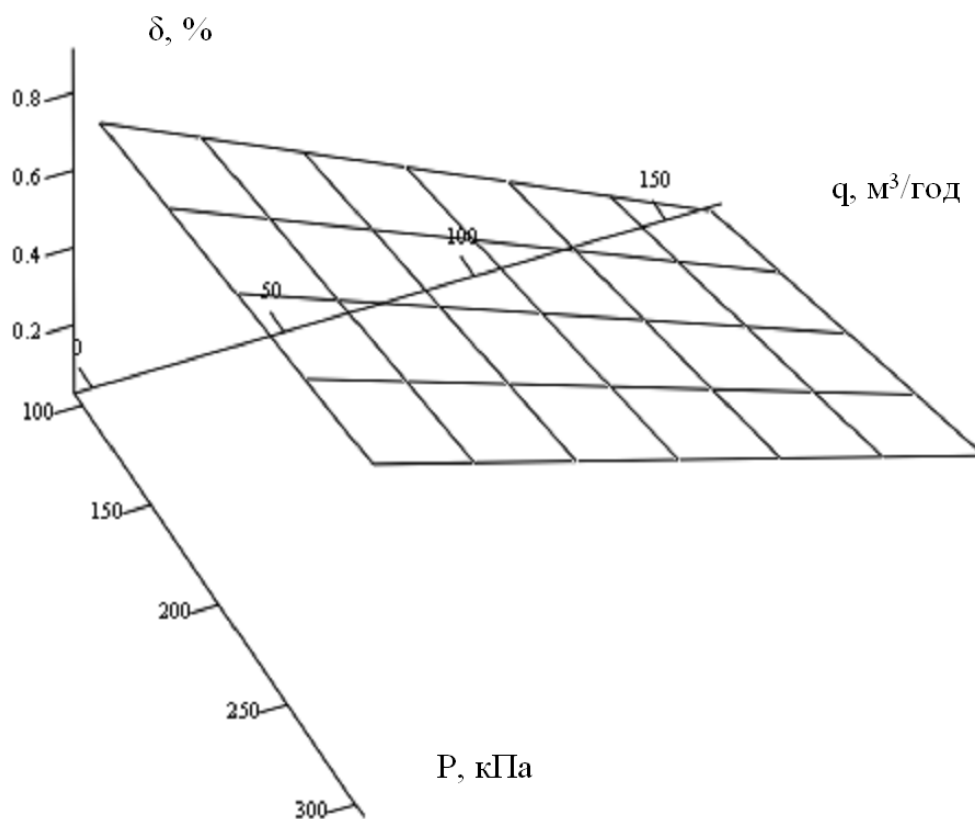


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація математичної моделі роторного лічильника газу типу TEM-100

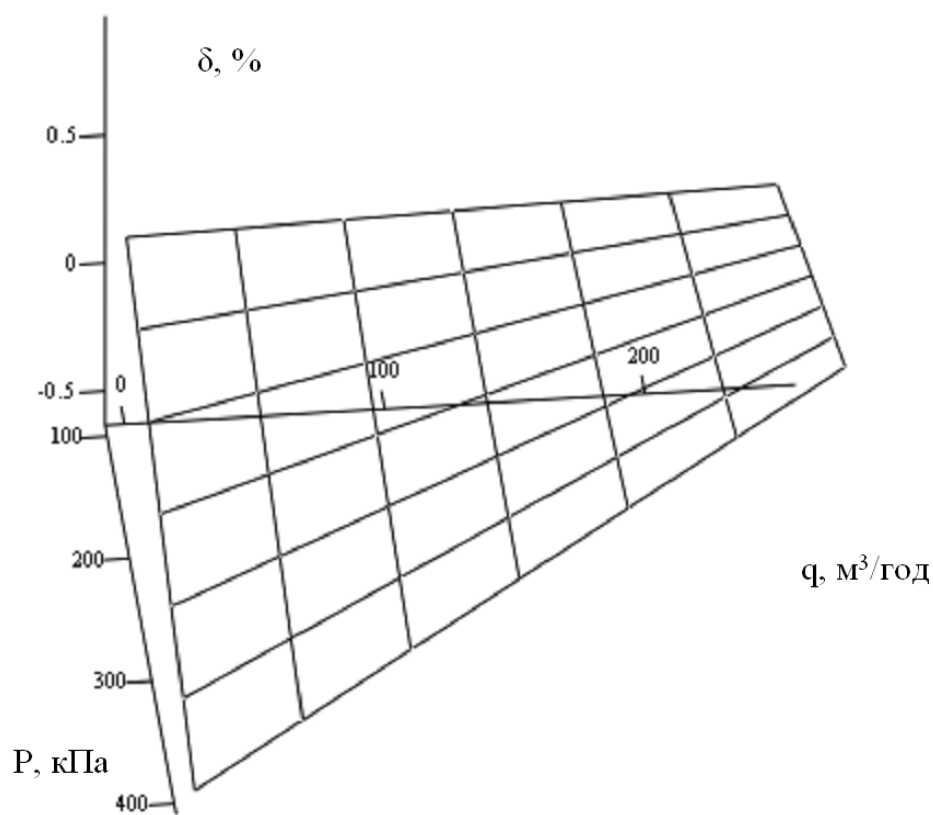


Рисунок 2 – Геометрична інтерпретація математичної моделі турбінного лічильника газу типу ЛГ-80

Геометричну інтерпретацію одержаної математичної моделі турбінного лічильника газу типу ЛГ-80 зображено на рис. 2.

### **Висновок**

Одержані математичні моделі досить точно описують поведінку роторного та турбінного лічильників газу за зміни тиску, витрати і густини. За результатами дослідження підтверджено доцільність проведення подальших досліджень у цьому напрямі з метою одержання за даною методикою математичних моделей впливу густини і тиску газу на метрологічні характеристики лічильників газу в ширшому діапазоні їх змін.

### **Література**

1 Дорожовець М. Основи метрології та вимірювальної техніки // [М. Дорожовець, В. Мотало, Б. Стадник та ін.]. – Львів: Видавництво Національного університету "Львівська політехніка", 2005. – 175 с. – ISBN 978-966-7936-58-7.

2 Засименко В.М. Основи теорії планування експерименту / В.М. Засименко. – Л.: Вид-во Держ. ун-ту "Львів. політехніка", 2000. – 205 с.

3 Финни Д. Введение в теорию планирования эксперимента / Д. Финни. – М.: Наука, 1971. – 287 с. – ISBN 978-5-9614-0889-8.

4 Peter F.M. Jongerjus; Mijndert P. Van Der Beek and Jos G.M. Van Der Grinten. Calibration facilities for industrial gas flow meters in the Netherlands // Flow Means / Instrum. – 1993. – vol. 4. – No. 2. – pp. 77-84.

5 Лічильники газу побутові. Загальні технічні вимоги [Текст] : ДСТУ 3336-96. – [Чинний від 1996 – 71 – 01]. – К.: Держспоживстандарт України, 1996. – VII, 36 с.

6 Петришин Н.І. Управління результатами вимірювань кількості газу під час передавання його від постачальників до споживачів / Н.І. Петришин, Я.В. Безгачнюк // Науковий вісник ІФНТУНГ. – 2008. – №2. – 118 с.

7 Федур Р.В. Статистика. Теоретичні засади і прикладні аспекти / Р.В. Федур, А. Д. Барвінський, В.П. Кічор. – К.: Издательский дом «АДЕФ-Украина», 2004. – 256с. – ISBN 978-966-6541-55-4

*Стаття поступила в редакційну колегію  
22.04.10*

*Рекомендована до друку професором  
С.А. Чеховським*