УДК 517 (075.8)

# ВДОСКОНАЛЕННЯ АЛГОРИТМУ ОПРАЦЮВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ТУРБІННИМ ЛІЧИЛЬНИКОМ

***Н.Б.Долішня***

*ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42453,*
*e-mail: feivt@nung.edu.ua, dolishnya@gmail.com*

*Розглянуто проблеми підвищення точності вимірювання витрати природного газу турбінними лічильниками. Під час удосконалення алгоритму опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінними лічильниками враховано результати теоретичних та експериментальних досліджень. Розглянуто всі етапи вимірювального експерименту, а саме: планування, організацію, проведення експерименту та опрацювання результатів. Разом з новими етапами алгоритму досліджено вплив зміни тиску та температури як ключових параметрів при визначенні витрати. Досліджується статистична залежність між ентропійним коефіцієнтом як параметром закону розподілу та витратою природного газу. На основі результатів метрологічних досліджень турбінних лічильників газу та, беручи до уваги праці вітчизняних та іноземних науковців, пропонується вдосконалений алгоритм опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу турбінними лічильниками.*

Ключові слова: закон розподілу, ентропійний коефіцієнт, дисперсійний аналіз, математична модель.

*Рассмотрены проблемы повышения точности измерения расхода природного газа турбинными счетчиками. При совершенствовании алгоритма обработки результатов измерения расхода природного газа турбинными счетчиками учтены результаты теоретических и экспериментальных исследований. Рассматриваются все этапы измерительного эксперимента, а именно: планирование, организация, проведение эксперимента и обработки результатов. Вместе с новыми этапами алгоритма исследуется влияние изменения давления и температуры как ключевых параметров при определении расхода. Исследуется статистическая зависимость между энтропийным коэффициентом как параметром закона распределения и расходом природного газа. Исходя из результатов метрологических исследований турбинных счетчиков газа и учитывая труды отечественных и иностранных ученых, предлагается усовершенствованный алгоритм обработки результатов измерения расхода природного газа турбинными счетчиками.*

Ключевые слова: закон распределения, энтропийный коэффициент, дисперсионный анализ, математическая модель.

*The article deals with the problem of increasing the accuracy of measuring the natural gas flow rate by turbine meters. Improvement of data processing algorithm of the natural gas flow measuring results by turbine meters requires consideration of theoretical and experimental studies. The author examined all phases of measuring experiment, namely: planning, organizing, conducting experiments and processing results. Along with the new stage of the algorithm author explores the impact of changes in pressure and temperature as a key parameters in determining flow rate. The statistical correlation between entropy ratio as a parameter of the distribution and consumption of natural gas was studied. Based on the results of metrological studies of turbine gas meters and taking into account the work of domestic and foreign scholars the improved algorithm data processing algorithm of the natural gas flow measuring results by turbine meters.*

Keywords: distribution low, entropy factor, variance analysis, the mathematical model.

**Вступ**

В умовах технологічних процесів нафтогазової промисловості, коли вимірювання технологічних параметрів проводяться в режимі реального часу, а при метрологічних дослідженнях, зважаючи на технічні можливості повторне відтворення експерименту і його вартість є надто високою, актуальним залишається питання підвищення точності результату вимірювання для вибірок обмеженого об'єму. Широке застосування турбінних лічильників при комерційному та технологічному обліку газу базується на результатах досліджень, виконаних вітчизняними та іноземними науковцями за останні 50 років. Проте і на сьогодні залишається багато не до кінця вивчених питань, на зразок: як одночасно враховувати параметри природного газу та конструктивні особливості турбінки при поданні результату вимірювання витрати газу; чи можна нехтувати законом розподілу результатів вимірювання, апріорі вважаючи вибірку нормально розподіленою; як загалом підвищити точність подання результату вимірювання витрати природного газу турбінними лічильниками?

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Дослідження в області витрати природного газу, виконані вітчизняними та іноземними вченими, зокрема, Бродиним І.С.[1], Петришиним І.С. [2], Середюком О.Є. [8], Вощинськм В.С. [3], Піндус Н.М. [11], R. E. Thompson [8], J. Grey [8], W. F. Z. Lee [9], H. J. Evans [9], завершені створенням науково-методичної та приладної бази у вказаній галузі. Але неможливість відтворити досліди в достатній кількості, при-

сутність промахів у результатах спостереження, апріорне припущення нормальності закону розподілу вибірки, нехтування впливовими факторами на результат – все це вимагає внесення змін до стандартного алгоритму опрацювання результатів вимірювання. Коли йдеться про вимірювання витрати газу, то варто зауважити, що на сьогодні не існує чіткого алгоритму, який би враховував і математичний апарат вимірювання витрати, і фізичну модель вимірного процесу. Саме тому актуальним науково-прикладним завданням є вдосконалення теоретичних методів статистичної обробки вимірювальної інформації, які б суттєво підвищили точність подання результатів вимірювання витрати газу.

**Формулювання мети статті**

Питання підвищення точності результатів вимірювання витрати природного газу вимагає внесення правок у стандартний алгоритм опрацювання експериментальних даних із врахуванням закону розподілу вибірки, конструктивних параметрів турбінного лічильника та параметрів природного газу.

**Виклад основного матеріалу**

Планування є важливим етапом вимірювального експерименту, особливо, коли йдеться про вимірювання витрати газу. При вимірюванні витрати основними параметрами, за якими визначають результат, є тиск та температура [4], відповідно на етапі планування вимірювального експерименту необхідно довести, що вплив зовнішніх факторів на покази давачів тиску, температури та витрати є незначним. Це, в свою чергу, свідчить, що вплив невиключних систематичних складових похибки зведений до мінімуму та підтверджує адекватність між отриманою математичною моделлю результуючої похибки і досліджуваним об'єктом. У випадку опрацювання результатів перевірки лічильників газу, окремі досліди яких є адекватними за своїм змістовим навантаженням (незалежні вимірювання тиску, температури та витрати) і чітко виділяються три фактори, то доцільно застосовувати метод із строго обмеженою рандомізацією, а саме метод латинського квадрата, в основу якого покладено дисперсійний аналіз.

Використовуючи алгоритм [15] здійснимо перевірку впливу змін тиску та температури на вимірювання витрати.

**Таблиця 1 – Результати вимірювання витрати**

| Відхилення витрати | 3.303 | 1.077 | 3.678 | 0.491 |
|---|---|---|---|---|
| Т-ра,°С | 14.626 | 13.37 | 14.167 | 15.635 |
| Тиск | 330.553 | 330.785 | 331.235 | 330.991 |

Матрицю планування побудуємо у вигляді латинського квадрата 4х4 (табл. 2).

**Таблиця 2 – Матриця планування у вигляді латинського квадрата 4х4**

| Витрата | Тиск | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 330.553 | 330.785 | 331.235 | 330.991 |
| 3.303 | 14.167 | 15.635 | 14.626 | 13.37 |
| 1.077 | 13.37 | 14.167 | 15.635 | 14.626 |
| 3.678 | 14.626 | 13.37 | 14.167 | 15.635 |
| 0.491 | 15.635 | 14.626 | 13.37 | 14.167 |

Після проведення експерименту за поданим планом отримані дані подамо як суміщену матрицю (табл. 3).

У цій суміщеній матриці знайдена сума спостережень за факторами «витрата» та «тиск». Для знаходження суми спостережень за фактором «температура» змінимо координати матриці (табл. 4).

За формулами (1)-(5) обчислюємо необхідні значення відхилень. Загальна сума квадратів відхилень за експериментальними даними усіх дослідів (за усією таблицею) відносно загального середнього:

$$SS_{\Sigma} = \sum_{i=1}^{4}\sum_{j=1}^{4}\sum_{k=1}^{4} y_{ijk}^2 - \frac{T_{-}^2}{16}; \qquad (1)$$

$$SS_{\Sigma} = 28.78 - \frac{20.22^2}{16} = 3.22577.$$

Сума квадратів відхилень за p-фактором (тиск) від загального середнього:

$$SS_p = \sum_{p=1}^{4} \frac{T_{p-}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}; \qquad (2)$$

$$SS_p = \frac{102.413}{4} - \frac{20.22^2}{16} = 0.04666.$$

Сума квадратів відхилень за v-фактором (витрата) від загального середнього:

$$SS_v = \sum_{v=1}^{4} \frac{T_{-v-}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}, \qquad (3)$$

$$SS_v = \frac{102.33888}{4} - \frac{20.22^2}{16} = 0.02811.$$

Сума квадратів відхилень за t-фактором (температура) від загального середнього:

$$SS_t = \sum_{t=1}^{4} \frac{T_{-t}^2}{4} - \frac{T_{-}^2}{16}; \qquad (4)$$

$$SS_t = \frac{102.3514}{4} - \frac{20.22^2}{16} = 0.03124$$

Сума квадратів похибки:

$$SS_e = SS_{\Sigma} - SS_p - SS_c - SS_t, \qquad (5)$$

$$SS_e = 3.11976.$$

Усі отримані результати дисперсійного аналізу подано у вигляді результуючої матриці (табл.5).

Оскільки табличне значення коефіцієнта Фішера, що дорівнює $F_{0.05;3;6}$=4,76 для усіх джерел впливу, перевищує розраховані значення у табл.5, то можна зробити висновок про незначущість впливу усіх трьох впливових факторів.

**Таблиця 3 – Суміщена матриця за значеннями тиску та витрати**

| Витрата/ тиск | 330.553 | 330.785 | 331.235 | 330.991 | Тр- |
|---|---|---|---|---|---|
| 3.30347 | 14.16714<br>1.37 | 15.635<br>1.332 | 14.626<br>1.376 | 13.37<br>1.34 | $T_{1-}$=5.418 |
| 1.07724 | 13.37<br>1.332 | 14.16714<br>1.376 | 15.635<br>1.255 | 14.626<br>1.00714 | $T_{2-}$=4.970 |
| 3.67862 | 14.626<br>1.376 | 13.37<br>1.27 | 14.167<br>1.00714 | 15.635<br>1.332 | $T_{3-}$=4.985 |
| 0.49107 | 15.635<br>1.255 | 14.626<br>1.00714 | 13.37<br>1.21 | 14.167<br>1.376 | $T_{4-}$=4.848 |
| T-t | $T_{-1}$=5.333 | $T_{-2}$=4.985 | $T_{-3}$=4.848 | $T_{-4}$=5.055 | $T_{--}$ |

**Таблиця 4 – Суміщена матриця за значеннями тиску та температури**

| Т-ра/ тиск | 330.553 | 330.785 | 331.235 | 330.991 | Тр- |
|---|---|---|---|---|---|
| 14.626 | 14.626<br>1.376 | 14.626<br>1.007 | 14.626<br>1.376 | 14.626<br>1.00714 | $T_{-1-}$=4.766 |
| 13.37 | 13.37<br>1.332 | 13.37<br>1.27 | 13.37<br>1.21 | 13.37<br>1.34 | $T_{-2-}$=5.152 |
| 14.167 | 14.167<br>1.37 | 14.167<br>1.376 | 14.167<br>1.00714 | 14.167<br>1.376 | $T_{-3-}$=5.129 |
| 15.635 | 15.635<br>1.255 | 15.635<br>1.332 | 15.635<br>1.255 | 15.635<br>1.332 | $T_{-4-}$=5.174 |
| T-t | $T_{-1}$=5.333 | $T_{-2}$=4.985 | $T_{-3}$=4.848 | $T_{-4}$=5.055 | T-- |

**Таблиця 5 – Результуюча матриця**

| Джерело впливу | К-сть ступенів свободи | Сума квадратів відхилень SS | Середній квадрат відхилень $S^2$ | Перевірка $H_0$: $F_{0.05;3;6}=\frac{S^2_{pct}}{S^2_{\varepsilon}}$ |
|---|---|---|---|---|
| Тиск | 3 | 0.04666 | $S^2_p$ = 0.002177 | 0.000224 |
| Витрата | 3 | 0.02811 | $S^2_c$ = 0.000790 | 0.000008 |
| Температура | 3 | 0.03124 | $S^2_t$ = 0.000976 | 0.000100 |
| Похибка | 6 | 3.11976 | $S^2_\varepsilon$ = 9.73291 | - |
| Сума | 15 | 2,06 | - | - |

Отже, статистично доведено, що вплив зміни тиску та температури на результат вимірювання витрати є незначним, тому не потребує додаткових коригуючих коефіцієнтів. Аналізуючи результати попередніх теоретичних та експериментальних досліджень [5, 11-12], бачимо, що математична модель роботи турбінного лічильника повинна враховувати конструктивні параметри лічильника, компонентний склад газу, інерційність та турбулентність потоку. Із врахуванням результатів досліджень [5, 11-12] випливає, що математична модель роботи турбінного лічильника загалом повинна враховувати наступне:

- вид закону розподілу експериментальних даних вимірювання витрати;
- компонентний склад природного газу;
- вид гідродинамічного стану потоку газу;
- інерційність газового потоку;
- конструктивні особливості турбінного лічильника.

Жоден із вищенаведених пунктів не потребує внесення змін до конструкції установки. Зміни пропонується внести лише до стандартного алгоритму, за яким на сьогодні здійснюється опрацювання результатів вимірювання витрати газу. Відповідно до чинних стандартів, що поширюються на вимірювання витрати газу та на опрацювання результатів вимірювання, зупинимося на ключових правках:

- на етапі визначення витрати результати вимірювання необхідно перевірити на нормальність та внести поправку на вид закону розподілу шляхом врахування ентропійного коефіцієнта. Далі перевірити ці результати на наявність промахів та відсутність часової залежності;

- на етапі визначення похибки вимірювання витрати пропонується використовувати математичну модель для визначення залежності кутової швидкості обертання турбінки від значення витрати, яка враховує випадкову складо-

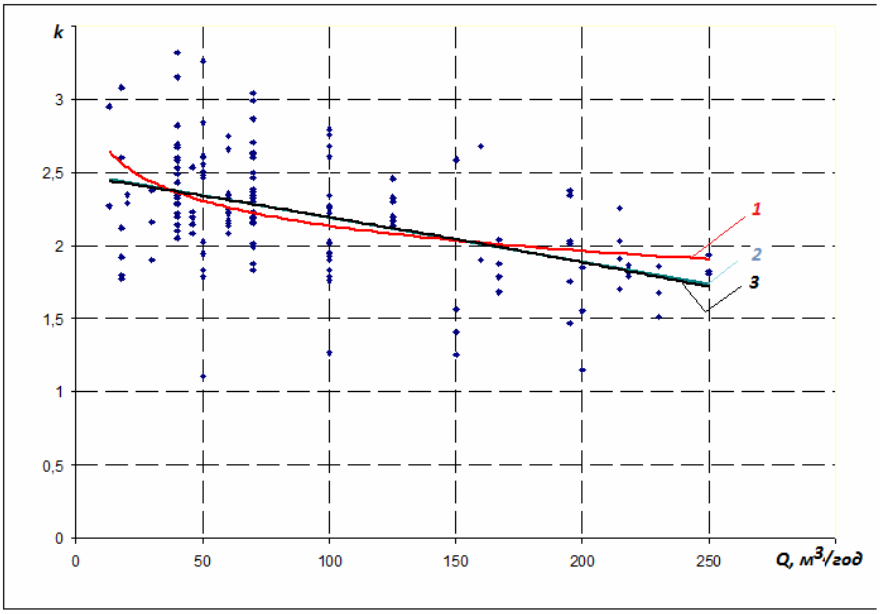


**Рисунок 1 – Залежність ентропійного коефіцієнта від витрати лічильника, що підлягає перевірці**

ву похибки, що вноситься у результат вимірювання внаслідок зміни гідродинаміки процесу вимірювання витрати природного газу, та систематичну складову похибки, тобто вплив конструктивних параметрів лічильника на похибку. Результат застосування математичної моделі підтвердить або ж спростує стабільність газового потоку, відтак на підставі даних висновків можливий перехід до визначення похибки лічильника.

Встановлено [12], що здебільшого закон розподілу відмінний від нормального і досліджено залежність зміни ентропійного коефіцієнта як характеристики форми закону розподілу, від результату вимірювання витрати газу, в результаті чого експериментально отримано графічну залежність (рис. 1).

Результати визначення ентропійного коефіцієнта для різних значень витрати було апроксимовано в середовищі Microsoft Excel трьома лініями тренда: логарифмічною (на рис. 2.6 позначена «1»), лінійною (2) та квадратичною (3). Відповідно отримані наступні рівняння апроксимаційних кривих з точністю апроксимації $R^2$:

*1: k=-0,2501ln(Q)+3,2848;* $R^2$*=0,185*
*2: k=-0,003Q+2,4919;* $R^2$*=0,229*
*3: k=-1E-06Q2-0,0027Q+2,4782;* $R^2$*=0,229*

Відповідно до точності апроксимації, приймаємо, що аналітична залежність *k=f(Q)* матиме такий вигляд:

$$k=-0{,}003Q+2{,}4919, \qquad (6)$$

де $k$ – ентропійний коефіцієнт;

$Q$ – об'ємна витрата природного газу, м$^3$/год.

Отримана за допомогою критеріїв подібності та конструктивних параметрів теоретична модель визначення відношення кутової швидкості обертання до витрати [11] потребує доповнення результатами експериментальних досліджень виду закону розподілу, що відображає (6):

$$\frac{\omega}{Q}=\frac{\tan\beta}{\bar{r}A}-\frac{0.345n(R+a)\dfrac{S}{A^2}\sin\beta}{\bar{r}^2}\times \qquad (7)$$

$$\times\left(\frac{Sh\cdot 4\cdot e^{\frac{2.4919-k}{0.003}}\rho d(\rho_c^{0.5}+2.08-1.5(x_a+x_y))}{D^2\pi(T^{0.5}+1.37-9.09\rho_c^{0.125})}\right)^{-0.2},$$

де $\omega$ – кутова швидкість обертання турбінки;

$\beta$ – кут між віссю і поверхнею лопаті турбінки;

$\bar{A}$ – площа поперечного перерізу потоку;

$\bar{r}$ – середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусів лопаті ($R$, $a$);

$n$ – кількість лопатей;

$S$ – відстань між лопатями;

$Sh$ – число Струхаля;

$\rho_c$ – густина суміші за нормальних умов;

$x_a$, $x_y$ – молярні частки азоту та діоксиду вуглецю відповідно;

$T$ – температура газу;

$D$ – діаметр труби.

Із наведеної вище залежності видно, що вагомий вплив на результат визначення співвідношення між кутовою швидкістю обертання турбінки і витратою мають внутрішній та зовнішній радіуси турбіни, кут атаки лопаті. Число Струхаля та коефіцієнт ентропії набагато менше впливають на такі результати, проте нехтувати ними не варто, оскільки вони несуть в собі корисну інформацію про фізичний зміст вимірювального процесу. Другий доданок у правій частині моделі вносить правки на сповільнюючі моменти під час обертання лопатей турбінки та, власне, тут і враховуються фізичні властивості природного газу.

У підсумку, пропонується, що скоригований алгоритм із застосуванням методів статис-

тичної обробки результатів вимірювання та із врахуванням фізичних процесів та явищ, що відбуваються в процесі руху газового потоку через лопаті турбінки, повинен містити такі етапи:

– запуск лічильників для перевірки, запис протоколів перевірки;

– аналіз отриманих протоколів, відбір репрезентативних вибірок за результатами вимірювання витрати природного газу;

– перевірка нормальності закону розподілу результатів вимірювання витрати критеріальним шляхом. Визначення ентропійного коефіцієнта;

– відсіювання промахів із результатів вимірювання витрати за допомогою критеріїв математичної статистики;

– перевірка відтворюваності дослідів. У випадку, якщо присутня часова залежність у результатах експериментальних даних вимірювання витрати, даною вибіркою результатів нехтують, в протилежному випадку рекомендується переходити до наступного етапу;

– корекція результату розрахунку відносної похибки лічильника з використанням математичної моделі для визначення відношення кутової швидкості до витрати;

– подання результату перевірки турбінного лічильника, що працює на природному газі, із відповідним висновком.

## Висновки

Методом Латинського квадрату підтверджено, що немає необхідності у додатковій корекції на вплив температури та тиску на результат вимірювання.

На основі результатів теоретичних та експериментальних досліджень турбінних лічильників газу отримано математичну модель для визначення кутової швидкості обертання турбіни від витрати із врахуванням виду закону розподілу та фізичних процесів, що відбуваються при проходженні через лопаті турбіни газового потоку.

Під час опрацювання результатів вимірювання витрати природного газу пропонується враховувати результати досліджень, що підвищить точність вимірювання витрати.

### *Література*

1 Бродин І.С. Державний спеціальний еталон одиниць об'єму та об'ємної витрати газу / [І.С. Бродин, І.С. Петришин, А.Г. Бестелесний, П.І. Дикий] // Український метрологічний журнал. – 1997. – № 3. – С. 31–34.

2 Петришин І.С. Аналіз комплексного показника якості турбінних лічильників газу / І.С.Петришин, Д.О. Середюк. // Матеріали третьої науково-технічної конференції "ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи": Збірка наукових праць. – Київ, 2004. – С.242

3 Вощинський В.В. Математична модель швидкостей потоку в кільцевому січенні турбінного лічильника газу / В.В. Вощинський // Методи та прилади контролю якості. – 2000. – № 6. – С.61-63.

4 Кремлевский П.П. Расходомеры и счётчики количества / П.П. Кремлевский. – Л.: Машиностроение, Ленинградское отделение, 1989. – 701 с.

5 Чеховський С.А. Дослідження теоретичних методів статистичної обробки вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників / С.А. Чеховський, Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус // матеріали 7-ї всеукр. наук.–техн. конф. [Вимірювання витрати та кількості газу], Івано-Франківськ, 25–27 жовтня 2011 р. – Івано-Франківськ, 2011.– С.88-90.

6 Wadlow D. Chapter 28.4 Turbine and vane flowmeters / Wadlow D., Webster J.G. // The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook. – Boca Raton, FL: CRC Press. – Dec. 1998.

7 Демидова Н.М. Дослідження метрологічних характеристик турбінного витратоміра автомобільного палива / Н.М. Демидова, В.О. Поджаренко // Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація : [зб. наук. пр.]; / відп. ред. О. Грабовська. – Л.: Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка", 2007. – С. 42-49.

8 Облік природного газу: довідник / [М.П. Андріїшин, О.М. Карпаш, О.Є. Середюк [та ін.]; за ред. С.А. Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП «Сімик», 2008. – 180 с.

9 W. F. Z. Lee and H. J. Evans, Density effect and Reynolds number effect on gas turbine flowmeters, Trans. ASME, J. Basic Eng., 87 (4), 1965, p.1043-1057.

10 R. E. Thompson and J. Grey, Turbine flowmeter performance model, Trans. ASME, J. Basic Eng., 92(4), 1970, p. 712-723.

11 Долішня Н.Б. Підвищення точності опосередкованого вимірювання витрати газу з урахуванням властивостей потоку та фізичних основ роботи турбінних лічильників / Н.Б. Долішня, Л.А. Витвицька, Н.М. Піндус// Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2012. – № 06(82). – С.198-204.

12 Долішня Н.Б. Застосування параметричних підходів для перевірки закону розподілу статистичних даних в умовах обмеженого об'єму вибірок / Н.Б. Долішня, Н.М. Піндус, С.А. Чеховський // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. – 2010. – Вип. 4 (26). – С.112-114.

13 ПР 50.2.019-2006 ГСИ. Методика выполнения измерений при помощи турбинных, ротационных и вихревых счетчиков.

14 ДСТУ EN 12261:2006 Лічильники газу турбінні. Загальні технічні умови (EN 12261:2002, IDT).

15 Планирование и организация измерительного експреимента / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз – К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. – 280 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії 21.11.12*
*Рекомендована до друку професором* ***С. А. Чеховським***