

УДК 532.696.1

Н.Б. Долішня,
Л.А. Витвицька, Н.М. Піндус, кандидати техн. наук

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ ГАЗУ ТУРБІННИМИ ЛІЧІЛЬНИКАМИ З ВРАХУВАННЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКУ ТА КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТУРБІНКИ.

Проведено дослідження, які направлені на створення нових засад забезпечення точності вимірювання витрати природного газу з використанням турбінних витратомірів. На основі аналізу характеристик потоку та їх впливу на роботу турбінних лічильників газу отримано залежності, які характеризують цей вплив і дають змогу підвищити точність вимірювання.

Ключові слова: вимірювання витрати природного газу, турбінний лічильник, точність, число Рейнольдса, діаграма впливу.

N.B. Dolishnia,
L.A. Vytvytska, PhD.,
N.M. Pindus, PhD.

AN IMPROVEMENT OF ACCURACY OF THE GAS FLOW MEASUREMENT WITH TURBINE METERS TAKING INTO ACCOUNT CHARACTERISTICS AND DESIGN FEATURES OF THE IMPELLER

There was made a research of principles to ensure the accuracy of flow measurement of natural gas using turbine meters. Based on the analysis of flow characteristics and their effect on the turbine flowmeters there was obtained the dependence of this characteristics that allows more accurate measurement.

Keywords: flow measurement of natural gas, turbine meter, the accuracy, Reynolds number, the chart of influences.

Н.Б. Долишня,
Л.А. Витвицкая, Н.М. Пиндус, кандидаты техн. наук

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ РАСХОДА ГАЗА ТУРБИННЫМИ СЧЕТЧИКАМИ С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА И КОНСТРУКТИВНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ ТУРБИНЫ

Проведены исследования, направленные на создание новых принципов обеспечения точности измерения расхода природного газа с использованием турбинных расходомеров. На основе анализа характеристик потока и их влияния на работу турбинных счетчиков газа получены зависимости, характеризующие это влияние и позволяющие повысить точность измерения.

Ключевые слова: измерения расхода природного газа, турбинный счетчик, точность, число Рейнольдса, диаграмма влияния.

Постановка проблеми

Широке застосування турбінних приладів для вимірювання витрати та кількості рідин та газів базується на результатах досліджень, виконаних різними авторами впродовж останніх 50 років. Однак ці дослідження і їх результати базуються, в основному, на визначенні характеристик самої турбіни, яка в якості первинного перетворювача виявляється достатньо глибоко дослідженою. Обмежимося тут в підтвердження сказаного посиленнями тільки на одну книгу [1], яку можна вважати енциклопедією з порушеного питання. Вкажемо, які ж саме характери-

сти турбінних приладів вирізняють їх серед багатьох інших як позитивні:

робота на високих температурах і тисках (від 240 до 700 °С та до 250 МПа);

встановлення на вертикальних і горизонтальних трубопроводах;

достатньо висока точність (похибка 0,5–1,5 %);

швидкодія (стала часу 1–10 мс);

широкий діапазон вимірювання;

лінійність характеристики в широкому діапазоні витрат;

можливість вимірювання швидкозмінних потоків;

надійність;

простота експлуатації;

© Долишня, Н.Б., Витвицькая Л.А.,
Пиндус Н.М., 2012

відносно низька вартість.

Вказані характеристики можливі, якщо до властивості потоку вимірювального середовища відповідають певним вимогам, зокрема, вимогам до його автономності. Якщо ж характеристики потоку не відповідають вимогам, то залишається відкритим питання підвищення точності вимірювання витрати газу такими засобами, в тому числі, можливості їх використання як зразкових. Це пов'язано з тим, що через конструктивні особливості та фізику процесу вимірювання на результат впливає низка факторів, пов'язаних не так з характеристиками турбіни, як з особливостями потоку. У статті зроблено спробу врахувати в комплексі вплив характеристик потоку та конструктивних особливостей турбіни на результат вимірювання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Зважаючи на актуальність проблеми на даний час аналізом впливу параметрів вимірного потоку та конструкцій лічильників займаються як вітчизняні, так і зарубіжні дослідники, зокрема з вітчизняних науковців слід відзначити роботи Пістуну Є.П., Поджаренка В.О.[3], Чеховського С.А. [4] та Середюка О.Є[5], а із зарубіжних науковців особливу увагу привернула праця Девіда Ведлоу [2]

Мета статті

Питання підвищення точності вимірювання витрати газу вимагає розробки математичної моделі оцінювання результату вимірювання витрати газу турбінним лічильником із врахуванням конструктивних особливостей самого засобу вимірювання і параметрів вимірного середовища.

Виклад основного матеріалу

Для визначення впливу факторів на результат застосовано графічний метод структурного аналізу причинно-наслідкового зв'язку, так звану діаграму Ісікави, що дає змогу наочно відтворити й узагальнити процес, умови, методи і засоби вимірювання, а в результаті аналізу – виокремити найбільш вагомі з них, що в подальшому підлягають вивченню. На рис. 1 показано складена авторами таку діаграму для турбінного пристрою. Враховуються не лише конструктивні особ-

ливості турбіни, а й параметри вимірного середовища.

Оскільки на роботу турбіни визначально впливає практично лише два фактори (сили газодинамічного опору та завихрення у вимірному потоці), оцінимо їх шляхом застосування методів математичного моделювання.

Турбінні газові лічильники призначені для рівномірного осьового потоку [5] і відкалібровані для таких же. А це означає, якщо у потоці газу виникають завихрення на вході турбіни, то в залежності від напрямку цих завихрень турбіна може збільшити або зменшити швидкість обертання, що призведе до завищених або занижених показань лічильника, а отже споживач або постачальник можуть зазнати втрат.

Сили опору самого середовища, що сповільнюють швидкість обертання турбіни є функцією від числа Рейнольдса. Завихрення потоку викликає пульсації, що в свою чергу, вносить додаткову похибку в результат вимірювання.

Вид потоку робочого середовища визначається його параметрами і геометричними розмірами ділянки труби. Коли мова йде про природний газ, то розписавши коефіцієнт динамічної в'язкості з врахуванням компонентного складу газу [3],

$$\text{Re} = \frac{\rho V d (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_a + x_g))}{3.24(T^{0.5} + 1.37 - 909\rho_c^{0.125})}. \quad (1)$$

Всі необхідні дані для визначення числа Рейнольдса за вищенаведеною формулою відомі. Густина суміші за нормальних умов ρ_c , молярні долі азоту x_a та діоксиду вуглецю x_g – параметри відомі до початку вимірювання витрати. Температура газу T , швидкість потоку V та діаметр труби d визначаються через витрату газу – результат проведення багаторазових вимірювань.

В ідеальних умовах проведення вимірювань реакція лічильника на зміну швидкості потоку ідеально лінійна і визначається виключно геометричними параметрами лопаті. У реальних умовах існують ряд факторів, що сповільнюють рух лопаті турбіни. За умов незмінної витрати крутний момент газового потоку визначається декількома протидіючими моментами.

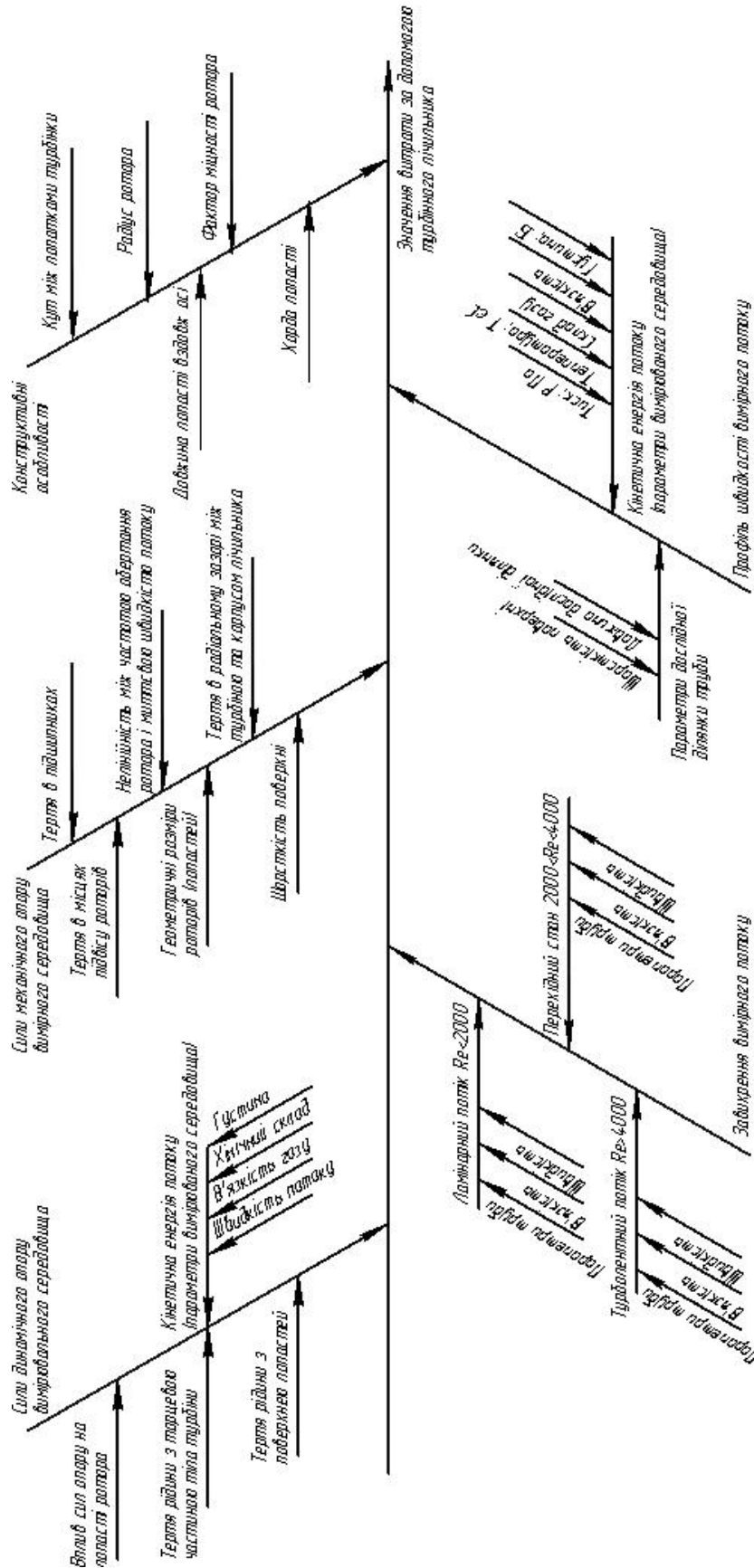


Рис. 1. Діаграма Ісікави для визначення причин виникнення похибки вимірювання витрати газу турбінним лічильником

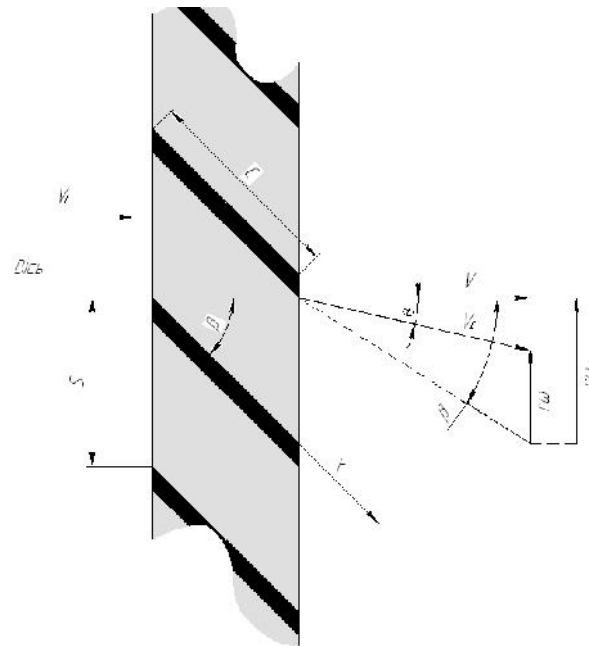


Рис. 2. Векторна діаграма для аксіальної турбіни:

V_i – вектор швидкості потоку; V_p – реальний вектор швидкості на виході потоку; Θ – кут завихрення на виході потоку із врахуванням моменту сповільнюючих сил; β – кут між віссю і поверхнею лопаті турбіни; ω – вектор кутової швидкості турбіни; r – вектор радіуса турбіни; F – сили газодинамічного опору, що діють на поверхні кожної лопаті; c – хорда лопаті; S – відстань між лопатями

Для моделювання впливу параметрів, що формують вищевказані гальмівні моменти, на частоту обертання турбіни ω в залежності від витрати Q доцільно розглянути вектори сил, які діють на турбінку. На рис. 2 подано векторну діаграму для аксіальної турбіни. Без врахування сил, що уповільнюють швидкість обертання турбіни, її ідеальна швидкість V_i буде точно відтворювати вектор швидкості потоку на поверхню лопаті турбіни.

Припускаючи, що лопаті турбіни плоскі, швидкість однорідна і паралельна осі, згідно з рис. 2 запишемо

$$r\omega_i = \tan \beta V. \quad (2)$$

Якщо ввести в рівняння значення об'ємної витрати, то

$$\frac{\omega_i}{Q} = \frac{\tan \beta}{rA}, \quad (3)$$

де ω_i – ідеальна швидкість обертання; Q – об'ємна витрата, A – площа поперечного перерізу потоку; r – середньоквадратичне значення внутрішнього та зовнішнього радіусів лопаті (R, a).

Різниця між фактичною швидкістю обертання турбіни $r\omega$ та ідеальною $r\omega_i$ є швидкість ковзання турбіни за рахунок сукупного впливу моментів сил, що діють на турбінку, сповільнюючи її швидкість в результаті чого вектор швидкості руху робочого середовища відхиляється на кут θ . В роботах [2, 6, 7] отримано залежність, що враховує сповільнюючий момент турбіни внаслідок зміни моменту імпульсу робочого середовища і крутний момент, який виникає за рахунок вимушеного опору руху середовища по всій поверхні лопаті, та загалом описує аналітично зміну швидкості обертання турбіни по відношенню до зміни витрати із врахуванням виду потоку вимірного середовища.

Подамо цю залежність без змін як базову для використання в подальших міркуваннях:

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{\tan \beta}{rA} - \frac{0.036n(R+a)}{r^{-2}} \times \frac{SA^2 \text{Re}^{-0.2} \sin \beta}{r^{-2}}, \quad (4)$$

де n – кількість лопатей.

Рівняння (4) показує, що лінійність зміни кутової швидкості за рахунок зміни витрати при нормальних умовах експлуатації є функцією основних геометричних параметрів і числа Рейнольдса. Отже, якщо брати до уваги і конструктивні особливості турбінки, і аеродинамічні властивості потоку робочого середовища, то нелінійність функції вимірювання витрати $\omega=f(Q)$ з врахуванням (1) можна описати так:

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{\tan \beta}{rA} - \frac{0.036n(R+a)SA^2 \sin \beta}{r^2} \times \left(\frac{\rho V d (\rho_c^{0.5} + 2.08 - 1.5(x_a + x_y))}{3.24(T^{0.5} + 1.37 - 9.09\rho_c^{0.125})} \right)^{-0.2} \quad (5)$$

Для перевірки одержаної залежності необхідно дослідити вплив числа Рейнольдса, як основної характеристики виду потоку, на нелінійність вищевказаної залежності. Для цього було проведено експериментальні дослідження двох турбінних лічильників газу, як робочих, та двох роторних, як зразкових, на максимальних витратах 0,12 м³/с (400 м³/год) з використанням випробувальної установки, що працює на природному газі. На основі експериментальних даних отримано залежність $Re=f(Q)$ і виведено максимально наближені до дійсного її апроксимацій-

ні моделі. На рис. 3 показано графічну інтерпретацію цієї залежності, аналогічні залежності отримано і для решти лічильників.

З урахуванням формули для визначення Re через параметри природного газу після встановлення апроксимаційної залежності згідно з рис. 3 для спрощення вищевказаної формули отримано нові залежності. Так, для турбінного лічильника G400 на низьких тисках подачі газу в установку формула (5) набуде вигляду

$$\frac{\omega}{Q} = \frac{\tan \beta}{rA} - \frac{0.036n(R+a)SA^2 \sin \beta}{r^2} \times \left(\frac{879.2Q^2 - 13242Q + 51463}{r^2} \right)^{-0.2} \quad (6)$$

Аналогічно отримано залежності для вимірювання витрати газу турбінними лічильниками типорозмірів G160 та G400 на низьких та середніх тисках у реальних умовах проведення випробувань із врахуванням властивостей природного газу та конструктивних особливостей турбінки, дають змогу з більш високою вірогідністю оцінити реальні метрологічні характеристики турбінних витратомірів.

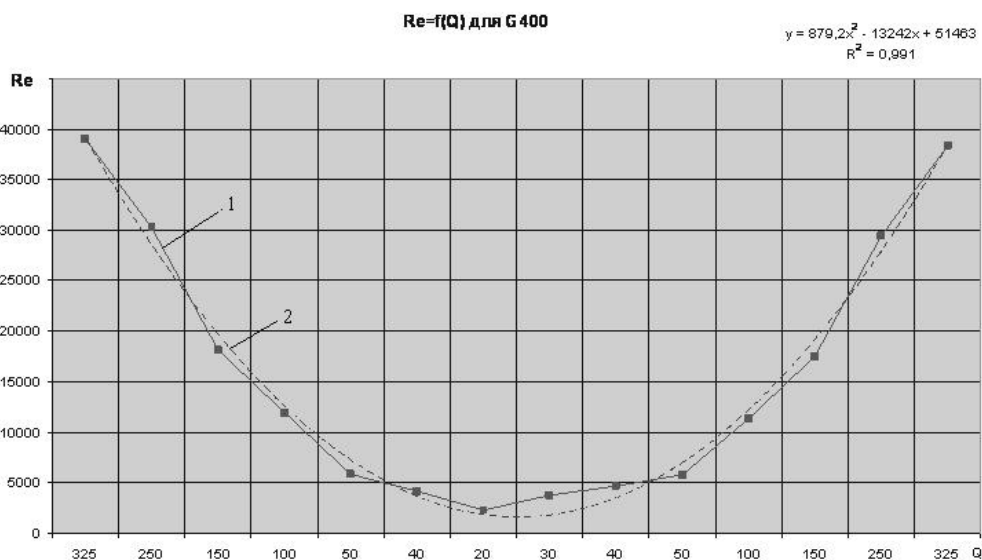


Рис. 3. Графік залежності числа Рейнольдса від витрати на низьких робочих тисках в установці при випробуванні турбінного лічильника типорозміром G400: 1 – $Re_{turbine}$; 2 – поліноміальний ($Re_{turbine}$)

Висновки

1. Виділено причини виникнення похибки при вимірюванні витрати газу турбінними лічильниками із застосуванням причинно-наслідкової діаграми Ісікави.

2. Нехтування газодинамічних впливів середовища на результат вимірювання витрати може призвести до втрат вимірювальної інформації.

3. Проведено моделювання аеродинамічних та механічних процесів при обертанні турбінок потоком газу, встановлено вплив параметрів на нелінійність залежності частоти обертання турбінки від витрати, що дає можливість оцінити точність вимірювання на основі визначення впливу значень параметрів потоку та турбінки.

3. Виведено апроксимаційні залежності $Re=f(Q)$ для турбінних газових лічильників типорозмірів G400 та G160, які були випробувані на природному газі в умовах діючої випробувальної установки, що уможливають підвищення точності вимірювання витрати газу.

Наступним етапом дослідження поведінки турбінних лічильників газу є введення коригуючих коефіцієнтів як поправки на систематичну похибку, викликану конструктивними параметрами турбінки, та випадкову похибку, як функцію параметрів вимірних середовища та процесу.

Список використаної літератури.

1. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества веществ [Книга 1] / П. П. Кремлевский. – СПб.: Политехника, 2002. – 409 с.

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

3. Демидова Н. М. Дослідження метрологічних характеристик турбінного витратоміра автомобільного палива / Н. М. Демидова, В. О. Поджаренко // Теплоенергетика. Інженерія доквілля. Автоматизація: [зб. наук. пр.] відп. ред. О. Грабовська. –

Львів : Вид-во Нац. ун-ту "Львів. політехніка". – 2007.

–С. 42–49.

4. Облік природного газу: довідник / [М. П. Андрієшин, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський]; за редакцією С.А. Чеховського. – Івано-Франківськ: ПП«Сімик»,2008.–180 с.

5. Вимірювання витрати та кількості газу: довідник / [М. П. Андрієшин, С. О. Канівський, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, А. А. Руднік, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський]; за редакцією О. М. Карпаша. – Івано-Франківськ: ПП«Сімик»,2004.–160 с.

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

7. Thompson R. E. and Grey J. Turbine flowmeter performance model, Trans. ASME, J. Basic Eng., 92(4). – 1970. – P. 712–723.

Отримано 25.05.2012

References

1. Kremlovskiy P. P. Flowmeters and meters of the substances amount [Book 1] / P. P. Kremlovskiy. – SPb.: Polytechnika, 2002. – 409 p. [in Russian].

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

3. Demydova N. M. The research of metrological characteristics of turbine flowmeter car fuel / N. M. Demydova, V. O. Podzharenko // Теплоенергетика. Environmental Engineering. Futomation: [scientific papers] – Lviv: V-vo National Univ. "Lvivska Politechnika". – 2007. –P. 42–49 [in Ukrainian].

4. Accounting for natural gas: a guide / [М. П. Андрієшин, О. М. Карпаш, Я. С. Марчук, І. С. Петришин, О. Є. Середюк, С. А. Чеховський]; for version S. A. Chahovskyi. – Ivano–Frankivsk: private

enterprise «Simyk», 2008. – 180 p. [in Ukrainian].

5. Measuring the costs and amount of gas: a guide / [M. P. Andriishyn, S. O. Kanivskiy, O. M. Karpash, Ya. S. Marchyk, I. S. Petryshyn, A. A. Rudnik, O. Ye. Sereduk, S. A. Chehovskiy]; for version O. M. Karpasha. – Ivano-Frankivsk: private enterprise «Simyk», 2004. – 160 p. [in Ukrainian].

6.. Lee W. F. Z and Evans H. J. Density effect and Reynolds number effect on gas turbine flowmeters, Trans. ASME, J. Basic Eng., 87 (4). – 1965. –P.1043–1057 [in English].

7. Thompson R. E. and Grey J. Turbine flowmeter performance model, Trans. ASME, J. Basic Eng., 92(4).–1970. –P.712–723 [in English].



Долишня
Наталія Богданівна,
аспірантка
каф.інформаційно-
вимірювальної техніки Івано-
Франківського нац. технічн.
ун-ту нафти і газу (ІФТУНГ),
тел.: (097)653-70-72



Вітвицька
Лідія Андріївна,
канд.техн.наук, доц. каф. Ін-
формаційно-вимірювальної
техніки ІФТУНГ.



Піндус
Наталія Миколаївна,
канд.техн.наук, доцент каф.
Інформаційно-вимірювальної
техніки