

УДК 681.12.08

**ВИМІРЮВАЛЬНІ БЮРЕТКИ ПЛІВКОВИХ ВИТРАТОМІРІВ ГАЗУ**

© Теплюх З. М., Парнета О. З., 2000

Національний університет "Львівська політехніка"

**Розглянуто різні варіанти вдосконалення вимірювальних бюреток плівкових витратомірів з метою розширення діапазону вимірювання і підвищення точності та надійності результатів вимірювання малих витрат газів.**

Плівкові витратоміри використовують як основний засіб точного вимірювання витрат газів в діапазоні  $3 \cdot 10^{-5} \dots 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$ , тобто 1...80 л/год. У цьому інтервалі похибка вимірювання може бути зведеною до 0,25 % для різних умов використання (вид газу, тиск і температура газу та середовища тощо). Розширення діапазону вимірювання призводить до зростання похибки, зменшення надійності результатів вимірювання, а також до збільшення громіздкості вимірювальних бюреток [1,2]. У зв'язку з тим, що плівкові витратоміри застосовують в основному в лабораторній практиці, виконані вони є досить спрощеними, наприклад, у наступному варіанті.

До скляної циліндричної трубки з мітками в прикінцевих її ділянках, що визначають певний об'єм, через трійник під'єднують гумовий балон з плівкоутворюючою рідиною (водяний розчин мила або шампуню), а бічний кінець трійника використовують для вводу досліджуваного газу [3]. При цьому відлік часу проходження плівкою заданого відмітками шкали бюретки об'єму здійснюють візуально за допомогою секундоміра. Така конструкція задає ручний характер вимірювання і низьку його якість (наприклад, проблеми з утворенням і стабільністю плівок). Аналіз похибки такого витратоміра показує, що вона в багатьох випадках може суттєво перевищувати декілька відсотків, зокрема, внаслідок насичення газу водою, наявності шару плівкоутворювача на стінках бюретки, трансфузії газу через рухому плівку, взаємодії газу з плівкоутворювачем, похибок вимірювання об'єму бюретки, часу, температури, тиску [2,4,5]. Відомі також більш досконалі конструкції плівкових витратомірів, метою яких є в основному підвищення надійності та точності результатів вимірювання, а також автоматизація процесу вимірювання з можливістю використання витратоміра в автоматизованих інформаційних чи керуючих системах. У промисловому виконанні плівковий витратомір з додатковими пристроями представляє собою доволі складний прилад з організованими газовими і рідинними потоками, а також різними електричними системами [6...9]. Проте основним елементом, що визначає точність вимірювання плів-

кового витратоміра, є вимірювальна бюретка.

Основна функція вимірювальної бюретки - набирання заданої відмітками або автоматичними фіксаторами (переважно оптично-електронними) [8...12] дози газу з допомогою проштовхуваної газом плівки рідини. Замість вимірювальних бюреток застосовують переважно скляні циліндричні трубки з внутрішнім діаметром 10...35 мм і довжиною 100...500 мм. Діапазон діаметрів пов'язаний в основному з умовами існування рухомої плівки, а діапазон довжин обмежений з одного боку мінімальним часом набирання заданої дози (проходження плівкою каліброваного об'єму), а з другого - габаритними розмірами приладу. Саме ці параметри і визначають діапазон вимірювання витрат газів плівковими витратомірами. Так, наприклад, при використанні трубок з діаметрами 10...20 мм діапазон вимірювання витрати, як правило, становить 1...10 л/год.

Для зменшення нижнього значення діапазону вимірювання витрат газів плівковим витратоміром необхідно зменшувати діаметр вимірювальної бюретки до декількох міліметрів. При цьому суттєво зростає похибка вимірювання, зокрема за рахунок збільшення відносного об'єму плівкоутворюючої рідини у каліброваному об'ємі.

З метою збільшення верхнього значення діапазону вимірювання слід застосовувати бюретки з більшими діаметрами, проте збільшення діаметра призводить до збільшення площі поверхні плівки, а тим самим до її нестабільності, а також збільшення деформації плівки. Ці явища в сукупності з високою швидкістю руху плівки визначають верхній діапазон вимірювання витратоміра, який може в окремих випадках досягати 3600 л/год [1]. Проте застосування бюреток з діаметрами, більшими за 50 мм, практично унеможливує надійне вимірювання витрати, зокрема при застосуванні органічних плівкоутворюючих речовин [4]. Нижній діапазон вимірювання бюреток з великими діаметрами обмежений часом проходження каліброваного об'єму, який практично не повинен перевищувати кількох хвилин. Збільшення тривалості часу проходження каліброваних міток призводить до зростання похибки вимірювання (значна трансфузія газу через плівку, зростання

впливу об'єму плівкоутворюючої рідини у каліброваному об'ємі тощо).

Як вимірювальні бюретки на практиці часто застосовують скляні хімічні (титрувальні) бюретки [13]. При цьому відлік, як правило, здійснюють візуально. Такі бюретки мають шкалу в одиницях об'єму, що дозволяє застосовувати їх без градування, проте похибка при цьому може досягати 6 %. При цьому враховуються лише похибки місткості (до 0,5 %), похибки відліку (до 0,2 %) і похибки від налипання плівкоутворюючої рідини на стінках бюретки (до 5 %) [13, 14]. Градуванням бюретки і автоматичними фіксаторами можна суттєво зменшити ці похибки. Перевагою хімічних бюреток є можливість вибору об'єму дози з метою мінімізації похибки вимірювання.

Крім скляних використовують також металічні вимірювальні бюретки [15], які одночасно є рухомим елементом електромагнітного генератора плівок. Недоліком такої бюретки є неможливість контролю існування рухомої плівки, а також зростання температурних впливів.

Для вимірювання витрат, більших 80 л/год, з метою побудови компактною вимірювальною бюретки запропоновано розширювати її середню частину [16]. При цьому переходи до розширення повинні бути плавними, щоб запобігати руйнуванню плівки. Проте надійність вимірювань у цьому випадку зменшується.

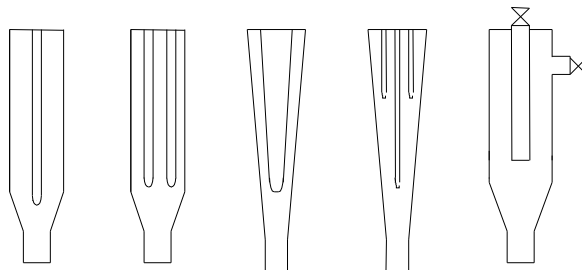
Описана вище конструкція найпростішого плівкового витратоміра не дає можливості надійно генерувати якісні плівки при витратах, більших 80 л/год. Тому в таких випадках для генерації плівок застосовують різні пристрої для встановлення короткочасного контакту нижньої кромки вимірювальної бюретки з поверхнею плівкоутворюючої рідини в резервуарі [9,11,15]. При витратах газу, більших 480 л/год, запропоновано робити розширеним нижній кінець вимірювальної бюретки [8], що робить плівку міцнішою при проходженні каліброваної ділянки бюретки.

Підвищення надійності та точності результатів вимірювань з допомогою бюреток з діаметрами більше 50 мм досягають коаксіальним встановленням в них різної форми вставних елементів [17-19], які відіграють роль додаткової опори для рухомої плівки. Як приклад можна навести бюретки, в які встановлені один або декілька скляних стержнів (рис. 1а і 1б), що зменшує відстань між опорами плівки, внаслідок чого зменшується її кривизна [17]. Коли в середині бюретки є один стержень, то рухома плівка замість форми круга має форму кільця, що дозволяє підвищити верхній діапазон вимірювання витрати. Кращий ефект досягається встановленням декількох стержнів.

Для зменшення нижнього діапазону вимірю-

вання широкою бюреткою вставний стержень і саму бюретку виконують конічними [18] так, щоб відстані між внутрішньою поверхнею бюретки і зовнішньою поверхнею стержня по всій довжині були однаковими (рис. 1в). Завдяки тому, що прохідний переріз такої бюретки є різним по висоті, нижню частину її використовують для вимірювання витрат в діапазоні 1...10 л/год, а верхню - 10...100 л/год. Замість конічного стержня може бути група стержнів різної довжини (рис. 1г). В іншому варіанті [19] з цієї ж метою вставний елемент виконаний у вигляді вимірювальної бюретки малого діаметра (рис. 1д), призначеної для витрат до 10 л/год. На виходах зовнішньої та вкладеної бюреток встановлені запірні елементи для забезпечення роботи кожної із бюреток.

Вимірювальна бюретка в процесі вимірювання повинна мати змочену плівкоутворюючою рідиною внутрішню поверхню, тобто на цій поверхні повинен існувати стабільний шар плівкоутворюючої рідини. Товщина цього шару впливає на об'єм газу або враховують при калібруванні [20], або при вимірюванні [7]. Вимірювальні бюретки, як правило, виконані із скла і тому для підвищення змочуваності необхідно вживати додаткових заходів [21...24].



а) один стержень, б) два стержні, в) конічний стержень у конічній бюретці, г) група стержнів різної довжини у конічній бюретці, д) вкладена бюретка

Рис. 1. Бюретки із вставними елементами.

Для врахування наявності шару плівкоутворювача на внутрішній поверхні вимірювальної бюретки і його товщини запропоновано на кінцях бюретки встановлювати кільцеві електроди, під'єднані до електронного блоку [7]. Якщо поверхня бюретки є недостатньо змочена плівкоутворювачем, електронний блок сигналізує про неготовність приладу і необхідність додаткового змочення. Якщо ж шар плівкоутворювача є достатнім для проходження плівки по всій довжині бюретки, то електронний блок враховує об'єм плівкоутворювача при обчисленні витрати газу. Обладнання бюретки такою системою дозволяє підвищити надійність і точність результатів вимірювання, проте цей метод придатний лише для електропровідних плівкоутворювачів.

В базовому виконанні бюретка розміщена у ве-

ртикальному положенні і якщо не вживати спеціальних заходів, то залишки плівки, яка руйнується на виході бюретки, стікають вниз по внутрішній поверхні бюретки. Це, з одного боку, підтримує змочування поверхні, проте, з другого - ускладнює вимірювання та призводить до зміни товщини шару плівкоутворювача в процесі експлуатації. Зміна товщини шару плівкоутворювача призводить до зміни об'єму газу між каліброваними мітками бюретки, що викликає додаткову похибку вимірювання. Для виключення цієї похибки бюретку запропоновано розміщувати горизонтально [12] або загинати вниз вихідний кінець бюретки [10]. В інших варіантах пристрої для відведення плівкоутворюючої рідини є складнішими [8, 25, 26]. При цьому рідина відводиться або в дренаж [25], або повертається у резервуар [8, 26], з якого знову використовується для формування плівки.

При вимірюванні витрати легких газів (наприклад,  $H_2$ , He,  $CH_4$ ) і відкритому виході бюретки в атмосферу доза газу під плівкою може деформуватися внаслідок трансфузії газів через рухому плівку. Рушійною силою цього руху є різниця парціальних тисків газів по обидві сторони плівки: парціальні тиски компонентів повітря над плівкою вищі, ніж під плівкою, а парціальний тиск легкого газу над плівкою є нижчий. Для зменшення трансфузії газів треба запобігати появі різниці парціальних тисків. Найпростіше це зробити загинанням вниз вихідного кінця бюретки [10].

Для вимірювання витрати газів при високих тисках (10 бар і більше), скляна вимірювальна бюретка повинна мати стінку такої товщини, при яких трудно фіксувати переміщення плівки вздовж бюретки. Тому запропоновано запаковувати вимірювальну бюретку в оболонку, яка може витримувати значні тиски [11]. В оболонці є отвори, в які встановлюють фотоелектричні фіксатори переміщення плівки в бюретці.

Плівковий витратомір вимірює об'ємну витрату і тому для визначення її величини необхідно знати з високою точністю тиск і температуру відміряної бюреткою дози газу [1, 27]. У зв'язку з тим вимірювальна бюретка повинна бути обладнаною відповідною контрольною апаратурою [12]. Проте на практиці такі вимірювання здійснюються за межами вимірювальної бюретки [28], що також може призводити до значних похибок визначення витрати. Врахування тиску і температури газу виконують переважно за допомогою рівняння Клапейрона [1], що допустимо для тисків, близьких до атмосферного.

Іншими надійнішим шляхом зменшення температурних впливів є термостатування досліджуваного газу і вимірювальної бюретки [6]. При цьому вимірювальну бюретку і теплообмінник для газу помі-

щають в герметичний корпус, температура в якому підтримується електричними нагрівачами або з допомогою водяного термостату [6].

Як впливає з попереднього, точність вимірювання витрати газу плівковим витратоміром суттєво залежить від точності визначення каліброваного об'єму газу в бюретці. Для визначення об'єму в основному застосовують геометричний, об'ємний та ваговий методи [29].

Геометричний метод градування оснований на припущенні, що бюретка має правильну геометричну форму і що лінійні розміри, необхідні для обчислення місткості, можуть бути визначені з допомогою вимірювальних засобів з достатньою точністю. Однак цей спосіб не забезпечує високої точності визначення місткості вимірювальної бюретки, яка продиктована вимогами до точності вимірювання плівкових витратомірів.

Об'ємний спосіб визначення місткості бюретки включає наповнення каліброваної ділянки вимірювальної бюретки водою, переливання води, об'єм якої дорівнює місткості каліброваної ділянки бюретки, у зразкову міру місткості, попередньо наповнену водою до нижньої поділки шкали [30]. Місткість бюретки визначається за положенням меніска перелитої води відносно шкали зразкової міри місткості. Однак цей спосіб також не забезпечує високої точності визначення місткості вимірювальної бюретки. Для даного способу характерна наявність похибки за рахунок змочування внутрішньої поверхні вимірювальної бюретки водою, краплини якої залишаються на цій поверхні і впливають на результат вимірювання. Крім того, цей спосіб не враховує зміну місткості бюретки внаслідок наявності шару плівкоутворюючого розчину на її внутрішній поверхні під час вимірювання витрати газу. І нарешті, похибка визначення місткості бюретки залежить від точності зразкових мір місткості, яка в багатьох випадках не задовольняє вимог до точності вимірювання малих і мікровитрат газів.

Ваговий метод градування включає наповнення каліброваної ділянки вимірювальної бюретки дистильованою водою, переливання у попередньо зважену колбу дистильованої води, об'ємом, що дорівнює місткості каліброваної ділянки бюретки, зважування колби з перелитою в неї дистильованою водою, вимірювання температури води і визначення її густини для цієї температури, визначення маси перелитої води [31]. Місткість бюретки визначається за масою перелитої дистильованої води та її густиною. Цьому методу притаманні в основному ті ж похибки вимірювання, що і об'ємному.

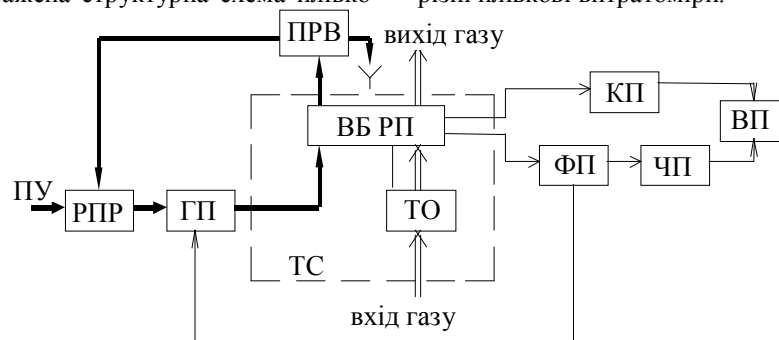
Слід відзначити, що всі вищеописані методи градування визначають місткість самої бюретки, в той час коли для точного вимірювання витрати потрібний калібрований об'єм газу з врахуванням ша-

ру плівкоутворювача на стінках вимірювальної бюретки, форми рухомої плівки тощо. У зв'язку з тим для градування вимірювальної бюретки доцільно використовувати ваговий метод із заміщенням об'єму газу об'ємом рідини [20]. Стінки внутрішньої частини бюретки перед градуванням добре змочують розчином плівкоутворюючої рідини шляхом багаторазового пропускання плівки через вимірювальну бюретку. Протягування плівки у вимірювальній бюретці здійснюють за рахунок розрідження, яке створюється внаслідок витікання дистильованої води із герметично під'єднаної до виходу бюретки проміжної ємності, з допомогою якої доза газу перетворюється у дозу рідини. Вважається, що об'єм випущеної рідини рівний об'єму дози газу між каліброваними мітками бюретки. По масі заміщеної дистильованої води та її густині при температурі вимірювання обчислюють місткість каліброваної ділянки вимірювальної бюретки з врахуванням налипання плівкоутворюючої рідини на стінках її внутрішньої частини. Описаний метод градування дозволяє знаходити об'єм дози газу з похибкою, що не перевищує 0,09 % [32].

На рис. 2 зображена структурна схема плівко-

вого витратоміра, вимірювальна бюретка якого обладнана згаданими в даній роботі додатковими пристроями, які дозволяють підвищити точність і надійність витратоміра. Так, зокрема, плівкоутворювач складається з резервуара з плівкоутворюючою рідиною [10, 11, 25, 26], генератора плівок [6, 9, 25], а також пристрою руйнування плівок і відведення плівкоутворюючої рідини [8, 12, 25]. Інформаційні канали містять пристрої фіксування проходження плівки (фотоелектричні елементи) [9...12, 25], часовий пристрій [10, 11, 15, 25], відліковий пристрій для індикації вимірюваної витрати газу [10, 12], а також коректуючий пристрій [12] для врахування зовнішніх впливів (температури, тиску). Слід відзначити зв'язок між фіксаторами проходження плівки і генератором плівок для забезпечення автоматичного пуску чергового циклу вимірювання. В залежності від умов вимірювання і потрібної точності плівковий витратомір може включати ті чи інші елементи системи.

Вказані вище вдосконалення плівкових витратомірів і зокрема вимірювальних бюреток дозволяють в залежності від конкретних умов створювати різні плівкові витратоміри.



ВБ РП - вимірювальна бюретка з рухомою плівкою; ГП - генератор плівок; РПР - резервуар з плівкоутворюючою рідиною; ПРВ - пристрій руйнування плівок і відведення плівкоутворюючої рідини; ПУ - плівкоутворююча рідина; ФП - фіксатори проходження плівки; ЧП - часовий пристрій; КП - коректуючий пристрій; ВП - відліковий пристрій; ТО - теплообмінник; ТС - термостат;

- інформаційні канали,
- газовий тракт,
- коло ПУ.

Рис. 2. Повна структурна схема плівкового витратоміра.

1. Levy A. I. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements // J. Scien. Instrum. - 1964. - V. 41. 2. Горшенин П. А. Измерение малых расходов газа с использованием метода "мыльной пленки" // Научные труды Всесоюзного заочного машиностроительного института, Т. 7, 1976. 3. Кремлевский П. П. Расходомеры и счетчики количества. - 4-е изд. - Л.: Машиностроение, 1989. 4. Теплюх З. М., Парнета О. З. Робоча рідина плівкового витратоміра // Вісник ДУ "Львівська політехніка"

Теплоэнергетика. Инженерия довідля. Автоматизация. - 1999. - № 378. - С. 73-76. 5. Белошицкий А. П. и др. Анализ погрешности "пузырькового" метода измерения малых расходов газа // Измерительная техника. - № 9. - 1983. - С. 65-66. 6. Шмулевич Э. А., Большаков Д. А., Чехов Е. Е. Прибор для измерения объемных скоростей газового потока при атмосферном и пониженном давлениях // ЖФХ. - 1973. - Т. 47, № 1. - С. 264-265. 7. Пленочно-пузырьковый расходомер: А. с. 1631285 СССР, МКИ G 01 F 1/42. /

- Н. Д. Дубовой, В. Ф. Илясов, А. Ю. Лукичев (СССР). - № 4627415/10; Заявл. 28.12.88; Оpubл. 28.02.91, Бюл. № 8. - 4 с. 8. Пат. 4.691.577 США, МКИ G 01 F 1/708. Soap film gas flowmeter / Hill S. Lalin (США). - № 837,847; Заявл. 10.03.86; Оpubл. 08.09.87. - 11 с. 9. Патент 13107 України, МКИ G 01 F 1/70. Плівковий витратомір / А. Ф. Данько, І. С. Ігнашкін. - № 5100024/ SU; Заявл. 08.05.91; Оpubл. 28.02.97, Бюл. № 1. - 5 с. 10. Пат. 4.879.907 США, МКИ G 01 F 1/708. Soap film flowmeter / Dwight Patterson (США). - № 14.577; Заявл. 13.02.87; Оpubл. 14.11.89. - 7 с. 11. Пат. 2 092 742 А Великобританії, МКИ G 01 P 5/18. Bubble flowmeter / Peter Small (Великобританія). - № 8104006; Заявл. 10.02.81; Оpubл. 18.08.82. - 5 с. 12. Пат. 143 823 НДР, МКИ G 01 F 1/70. Seifenfilmstromungsmesser mit digitaler Anzeige der Stromungsgeschwindigkeit / Schone, Gerd (НДР). - Заявл. 22.05.79; Оpubл. 10.09.80. - 8 с. 13. ГОСТ 20292-74. Бюретки, пипетки. Приборы мерные лабораторные стеклянные. Технические условия. - М.: Изд-во стандартов, 1983. 14. А.с. 982439 СССР, МКИ G 01 F 15/00. Рабочая жидкость для пленочного расходомера / В. Г. Березкин (СССР). - № 3291329/18-10; Оpubл. 28.04.81. - 4 с. 15. А.с. 1017929 СССР, МКИ G 01 F 1/70. Пленочный расходомер / В. П. Делямуре, С. А. Сирота (СССР). - № 2661116/18-10; Заявл. 05.09.78; Оpubл. 15.05.83, Бюл. № 18. - 3 с. 16. Пат. 3.748.902 США, МКИ G 01 F 1/00. Gas flow meter / Lloyd V. Guild (США). - № 244, 314; Заявл. 14.04.72; Оpubл. 31.07.73. - 6 с. 17. А.с. 657256 СССР, МКИ G 01 F 1/70. Пленочный расходомер / П. Г. Тишин (СССР). - № 2573017/18-10; Заявл. 25.01.78; Оpubл. 15.04.79, Бюл. № 14. - 2 с. 18. А.с. 769338 СССР, МКИ G 01 F 1/70. Пленочный расходомер / П. Г. Тишин (СССР). - № 2687566/18-10; Заявл. 22.11.78; Оpubл. 07.10.80, Бюл. № 37. - 3 с. 19. А.с. 930011 СССР, МКИ G 01 F 1/70. Пленочный расходомер / П. Г. Тишин (СССР). - № 2899366/18-10; Заявл. 24.03.80; Оpubл. 23.05.82, Бюл. № 19. - 3 с. 20. Пат. 23852 України, МКИ G 01 F 1/704. Спосіб визначення місткості вимірювальної трубки плівкового витратоміра / Є. П. Пістун, І. Д. Стасюк (Україна). - № 95073236; Заявл. 10.07.95; Оpubл. 31.08.98, Бюл. № 4. - 5 с. 21. Горюнов Ю. В., Сумм Б. Д. Смачивание. - М.: Знание, 1972. 22. Адам Н. К. Физика и химия поверхностей. - М.: Гостехмиздат, 1947. 23. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание. - М.: Химия, 1974. 24. Адамсон А. Физическая химия поверхностей. - М.: Мир, 1979. 25. Пат. 4.914.955 США, МКИ G 01 F 1/708. Soapfilm flowmeter device for measuring gas flow rates / David A. Stonestrom (США). - № 258955; Заявл. 29.08.88; Оpubл. 10.04.90. - 5 с. 26. Пинкава Я. Лабораторная техника непрерывных процессов. - М.: Изд-во иностр. лит., 1961. 27. Френкель Б. А. Измерение расхода жидкостей и газов в малотоннажных производствах и на экспериментальных установках. - М., 1989. 28. Пистун Е. П., Теплох З. Н., Стасюк И. Д. Определение расходных характеристик дроссельных элементов // Автоматизация и контрольно-измерительные приборы в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. - 1982. - № 4. - С. 28-30. 29. Гаузнер С. И. и др. Измерение массы, объема и плотности. - М.: Изд-во стандартов, 1982. 30. ГОСТ 8.269-77. ГСИ. Бюретки измерительные стеклянные для химических неавтоматических газоанализаторов. Методы и средства поверки. - М.: Изд-во стандартов, 1977. 31. ГОСТ 8.100-73. ГСИ. Меры вместимости стеклянные образцовые. Методы и средства поверки. - М.: Изд-во стандартов, 1973. 32. Стасюк І. Д. Методика визначення місткості вимірювальної трубки плівкового витратоміра // Вісник ДУ "Львівська політехніка" Теплоенергетика. Інженерія довкілля. Автоматизація, 1999. - № 378. - С. 70-73.