УДК 681.121.852

АНАЛІЗ ПОХИБОК ПЛІВКОВОГО ВИТРАТОМІРА ГАЗУ

© Зеновій Теплюх, Оксана Парнета, 2003

Національний університет "Львівська політехніка", кафедра "Автоматизація теплових і хімічних процесів", вул. С. Бандери, 12, 79013, Львів, Україна

Проаналізовано точність вимірювання витрати газу плівковим методом, розглянуто чинники, які впливають на точність, оцінено граничні похибки вимірювання та вказано способи їх зменшення.

Проанализировано точность измерения расхода газа пленочным методом, рассмотрено факторы, которые влияют на точность, оценено граничные погрешности измерения и указаны пути их уменьшения.

In the article the accuracy of measuring the gas flow rate by film flowmeter is analysed, factors which influences on the accuracy are considered, and ways of their improvement are offered.

Вступ. Вирішення проблем економії матеріальних і енергетичних ресурсів значною мірою залежить від точності вимірювання витрати потоків, зокрема і малих витрат природного газу. З відомих методів вимірювання мікро- і малих витрат газу (в інтервалі 10^{-5}...4 м^3/год), придатних як для технологічних, так і для метрологічних потреб, особливо перспективним є плівковий метод. Проте недостатня дослідженість обмежує його широке впровадження. Це стосується, насамперед, вивчення джерел похибок плівкових витратомірів та оцінки їх впливу. Зроблено окремі спроби аналізу деяких джерел похибок плівкових витратомірів, наприклад, впливу деформації витрати досліджуваного газу внаслідок насичення парою плівкоутворювальної рідини або неврахування шару плівкоутворювача на внутрішній поверхні мірної трубки [1, 2]. Найповніше точність проаналізовано A. Levy [3]. Значна ж частина джерел похибок плівкових витратомірів, серед яких, наприклад, вплив кривизни рухомої плівки, трансфузія газу через рухому плівку, досі не була висвітлена. У статті здійснено спробу проаналізувати вплив усіх, зокрема і дотепер не досліджених чинників, та на цій основі оцінити граничні похибки вимірювання.

1. Особливості об'єкта дослідження. Плівковий витратомір (ПВ) реалізує абсолютний метод вимірювання витрати газу. Він полягає у вимірюванні часу τ проходження рухомої рідинної плівки (міткою границі дози газу) між двома (верхньою та нижньою) фіксованими відмітками мірної трубки (МТ), які визначають калібрований об'єм V газу і в обчисленні об'ємної витрати Q за формулою

$$Q = V / \tau . \qquad (1)$$

Калібрований об'єм V газу має два трактування: перше – це місткість МТ між двома фіксованими відмітками; друге – це об'єм дози досліджуваного газу в МТ, обмежений плівкою рідини на внутрішній поверхні МТ і поверхнями рухомої плівки у верхньому та нижньому фіксованому положеннях. У зв'язку з цим відомі різні методи калібрування об'єму V, більшість з яких визначають місткість МТ з подальшим врахуванням змін каліброваного об'єму, спричинених наявністю, а також деформацією форм і розмірів рідинних плівок у МТ. На відміну від цього, метод заміщення визначає об'єм V згідно з другим трактуванням. Як похибки калібрування, так і непостійність каліброваного об'єму під час експлуатації істотно впливають на результат вимірювання.

Важливою особливістю ПВ є те, що газ взаємодіє із плівкоутворювальною рідиною (ПР), внаслідок чого може відзначатись деформація вимірюваної витрати за рахунок припливу газових компонентів з рідини, або, навпаки, їх відпливу в рідину, що спотворює результати вимірювання.

Вплив часу τ на процес вимірювання витрати у ПВ також має свої особливості. На результат визначення витрати може впливати не тільки похибка вимірювання часу, а і опосередковано час τ періоду вимірювання, час експлуатації ПР тощо. Так, наприклад, із збільшенням значення τ можуть істотно зрос-

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

тати похибки, пов'язані з деформацією вимірюваної витрати у ПВ із деформацією плівок у МТ. А, з іншого боку, із зменшенням часу τ збільшуються похибки самого вимірювання τ і моментів фіксації положення рухомої плівки. Тому вибір часу τ (а, водночас, і геометричних розмірів МТ) для заданого діапазону витрат необхідно оптимізувати за критерієм точності визначення витрати. Крім того, ПВ за принципом дії є приладом періодичної дії, тобто показує середню витрату за час τ, і тому, вибираючи τ, треба враховувати швидкість зміни витрати на вході ПВ.

Оскільки об'єм V дози газу істотно залежить від абсолютних тиску і температури газу, у МТ важливо оцінити вплив параметрів стану на остаточний результат вимірювання (об'ємна витрата у стандартних умовах або масова витрата).

2. Похибки каліброваного об'єму. Заданий каліброваними мітками (оптичними пристроями) об'єм V у ПВ може не відповідати номінальному внаслідок:

– похибок калібрування;

– теплового розширення скла МТ;

– зміни форми і геометричних розмірів плівки на поверхні МТ;

– змін форми рухомої плівки;

– впливу швидкості рухомої плівки;

– трансфузії газів через рухому плівку.

Розглянемо по черзі вказані фактори впливу.

Похибки калібрування детально розглянуто в [4] і в цій статті ми наводимо лише остаточні значення похибок, що виникають при різних методах калібрування, з незначними доповненнями і уточненнями.

Насамперед відзначимо, що порівняно поширене застосування для ПВ готових хімічних (титрувальних) бюреток [5] із шкалами місткості (похибка 0,5 %) як МТ є обмеженим витратами до 50 л/год і візуальним відліком. Тому МТ, як правило, калібрують індивідуально.

Відомий геометричний метод визначення місткості МТ не може бути рекомендований через недопустимо великі похибки. Дискретне сканування діаметра МТ за висотою та кутом повороту осі вимірювання [6] може істотно підвищити точність визначення місткості, проте недостатньо для ПВ, особливо з МТ складної геометрії (значні зміни діаметрів по висоті, вставні елементи тощо) [7].

Об'ємний і ваговий методи визначення місткості можуть давати значно вищу точність порівняно з геометричним. Ці методи відрізняються лише кінцевим етапом визначення об'єму перелитої з МТ у мірну посудину води – безпосередньо за допомогою мірного циліндра або за допомогою зважування. Тому більшість факторів, що впливають на точність калібрування, у них є спільними.

Для обидвох методів характерні такі основні похибки:

– від залишкових крапель на стінках МТ після зливання води у мірну посудину – до 3 %;

– від випаровування води з мірної посудини – до 0,04 %;

– візуального відліку рівня води у МТ – до 0,5 %;

– кількості води у мірній посудині внаслідок невчасного чи неякісного припинення зливання

– води з МТ – до 2 %.

Тільки об'ємному методу властиві ще похибка відліку рівня води у мірному циліндрі до 2,5 %, похибка зразкових мір об'єму до 2 % і похибка теплового розширення води – 0,018 %/К.

Сумарна гранична похибка об'ємного методу визначення місткості МТ малого об'єму (близько 2 мл) становить 10 %, а для МТ великого об'єму (2...14 л) – 1 %.

Сумарна гранична похибка вагового методу визначення місткості МТ малого об'єму дорівнює 5 %, а для МТ великого об'єму – 0,6 %.

Неврахування наявності шару ПР на стінках МТ під час визначення об'єму V об'ємним і ваговим методами призводить до похибки 1...12 % залежно від об'єму МТ. Водночас гранична похибка визначення об'єму плівки на стінках МТ, одержана, наприклад, багаторазовим зважуванням МТ з плівкою і без неї, становить 0,2...0,3 %.

Для калібрування ваговим методом із заміщенням каліброваної дози газу в МТ відповідним об'ємом проміжної рідини (метод заміщення) характерні такі основні похибки:

– від випаровування води з мірної посудини – до 0,04 %;

– візуального відліку положення рухомої плівки у МТ – до 0,5 %;

– внаслідок невчасного (неякісного) припинення зливання води з проміжної посудини – до 2 %;

– від різної кривизни рухомої плівки при фіксації верхнього і нижнього положень – до 0,25 %.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Сумарна гранична похибка визначення об'єму V методом заміщення з візуальним відліком для МТ малого об'єму становить 3 %, а для МТ великого об'єму – 0,5 %.

Якщо забезпечено спеціальні умови калібрування (зокрема, застосування оптико-електронних пристроїв як каліброваних позначок МТ, стабілізація температури приміщення, мінімізація втрат і стабілізація витрати заміщувальної води), гранична похибка визначення каліброваного об'єму V методом заміщення може не перевищувати 0,02 %. Водночас визначення місткості МТ, наприклад, геометричним методом і неврахування наявності шару ПР на стінках МТ може призвести до сумарної граничної похибки об'єму V на рівні двох десятків відсотків.

Теплове розширення скла МТ призводить до змін місткості МТ на значення близько 0,003 %/К і здебільшого, використовуючи ПВ, ним можна знехтувати [8].

Непостійність форми і геометричних розмірів рідинної плівки на поверхні МТ залежить від багатьох чинників і може істотно впливати на якісні показники ПВ, зокрема на точність і надійність вимірювання, і навіть на працездатність приладу.

Рідинна плівка може мати неоднакову товщину по висоті МТ внаслідок стікання під дією сил гравітації, випаровування і старіння ПР, причому всі ці процеси залежать від часу – часу τ набирання дози газу, періодів між окремими вимірюваннями і часу експлуатації ПР. Інтенсивність стікання залежить від поверхневих сил взаємодії ПР і стінок МТ, а також густини і в'язкості ПР. Старіння ПР може бути спричинене структурними змінами ПР або його взаємодією з газом, що характерно, наприклад, для водних розчинів мила [1]. Випаровування плівки може бути доволі інтенсивним, коли її основу становить рідина з низькою температурою кипіння, наприклад, вода, а газ є сухим. Нерівномірність товщини може бути локальною внаслідок часткових забруднень поверхні і слідів неякісних рухомих плівок.

Певний вплив може мати також теплове розширення рідини плівки для МТ малих розмірів і особливо за наявності газорідинних утворень на плівці. Відповідна похибка для різних ПР становить до 0,03 %/К.

Сумарна гранична похибка від непостійності форми і розмірів рідинної плівки на поверхні МТ залежно від об'єму МТ може дорівнювати 0,2...1 %, але урахування вищевказаних факторів (зокрема, правильний вибір ПР і застосування пристроїв відведення відпрацьованих плівок) зводить цю похибку до настільки малого значення, що нею можна нехтувати.

Вплив форми рухомої плівки. Рухома плівка внаслідок неякісної роботи генератора або стікання решток зруйнованих плівок може набирати нерегламентовану форму, зокрема, мати випадковий газорідинний супровід (піна, окремі бульбашки, потовщений меніск тощо), який під час проходження плівки вздовж МТ від нижньої до верхньої міток може змінити форму або відокремитися від рухомої плівки, внаслідок чого виникає похибка об'єму V, значення якої, як показав експеримент, до 0,5 %.

Форма регламентованої рухомої плівки залежно від витрати газу може змінюватися від плоскої до випуклої і в зв'язку з цим похибка об'єму V від різної кривизни плівки при фіксації верхнього і нижнього положень може досягати, як показав розрахунок, 0,25 %. Аналогічно на точність вимірювання впливають імпульси тиску в газі, а також механічні коливання плівок значних розмірів. Прогин плівки може змінюватися навіть за незмінної витрати внаслідок старіння плівки, особливо за великих значень часу τ.

Отже, гранична похибка від впливу форми рухомої плівки становить 0,56 %, а з урахуванням всіх чинників, які впливають на неї (наприклад, застосування якісних генераторів плівок [9], газодинамічних ланок ємність–резистор для згладжування імпульсів тиску і відповідних до умов вимірювання ПР), її можна звести до нехтовного значення.

Вплив швидкості рухомої плівки. Значний вплив на точність задання об'єму V може мати швидкість рухомої плівки біля каліброваних міток, особливо якщо відлік візуальний. Ця швидкість залежить переважно від витрати газу і діаметра МТ в околі каліброваних міток, проте може змінюватись від імпульсів тиску і механічних коливань рухомої плівки. Експериментально доведено, що вона не повинна перевищувати 4 м/с для візуального відліку, хоча для автоматичного може бути істотно вищою. Єдиним способом зменшення швидкості плівки є збільшення діаметра, що має, проте, певні обмеження. Похибка об'єму V від невідповідності положень рухомої плівки і каліброваної позначки залежить від об'єму V, якості відліку і діаметра МТ в зоні позначки. Цей діаметр доцільно зменшувати для зменшення похибки об'єму

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

V. Отже тут виникає протиріччя: з одного боку, для зниження швидкості треба збільшувати діаметр, а з іншого із зростанням діаметра збільшується похибка від невідповідності положень рухомої плівки в моменти фіксації та каліброваних позначок, а також збільшуються похибки, пов'язані із змінами форми плівки. Крім того, для зміцнення плівки рекомендовано збільшувати діаметр нижньої кромки МТ [10]. Звідси випливає, що вибір діаметрів входу біля каліброваних міток і центральної частини МТ необхідно оптимізувати за критерієм максимальної точності визначення витрати. Граничне значення похибки від впливу швидкості становить 0,2 %, але може бути зменшене на один–два порядки, якщо правильно вибрано діаметри, застосовано якісні пристрої автоматичного відліку та усунено причини зміни швидкості упродовж циклу вимірювання.

Вплив трансфузії газів через рухому плівку. Під час вимірювання витрати газів змінного складу з добре розчинними компонентами може відзначатись трансфузія цих компонентів через рухому плівку, внаслідок чого рухома плівка, яка є міткою межі дози газу, може зміститися щодо цієї дози, що спричиняє похибку об'єму V значенням до 0,5 %.

Сумарна гранична похибка визначення каліброваного об'єму V залежить переважно від похибки калібрування і, з урахуванням усіх факторів, які впливають на об'єм V, може знаходитися на рівні 0,02 %. Проте неякісне градуювання і неврахування усіх вищевказаних факторів впливу фактично робить ПВ доволі грубим приладом.

3. Деформація витрати досліджуваного газу у ПВ. Витрата досліджуваного газу в ПВ може змінюватися внаслідок дії таких факторів:

- насичення газу парою ПР;
- поглинання газу (окремих компонентів) рідиною;
- дегазації ПР;
- хімічної взаємодії газу з ПР;
- теплового розширення газу в МТ.

Насичення газу парою ПР. Як основу (розчинник) у ПР дотепер переважно застосовують воду [3,11,12], внаслідок чого можлива деформація витрати газу парою води, що спричиняє похибку визначення об'єму V до 3 % [13]. Тому для цього треба використовувати рідини з високою температурою кипіння, наприклад, етиленгліколь, формамід тощо [1, 14]. У такому разі гранична похибка від насичення газу парою розчинника може бути зменшена на один–два порядки і для етиленгліколю не перевищує 0,1 %, що, зрештою, також можна істотно зменшити засобами контролю випаровування складників ПР і відповідно враховувати, обчислюючи витрати. Найпростіше це зробити, застосувавши сатуратор, що дає змогу зменшити вказану похибку на порядок. Зауважимо принагідно, що використання сатуратора [3] для зниження впливу зволоження досліджуваного газу може бути ефективним, тільки якщо відома вологість газу (наприклад, в тих рідкісних випадках, коли газ є практично сухим) з подальшим перерахунком результатів вимірювання у витрату газу з початковою вологістю. В принципі, у такому разі можна додатково застосовувати вологомір.

Тиск насичення істотно залежить також від температури, наприклад, для води відповідна похибка визначення витрати становить 0,2 %/К, що вимагає враховувати цей вплив під час відповідальних вимірювань.

Поглинання і виділення рідиною газу (чи окремих компонентів). Явищами сорбції–десорбції можна нехтувати, тільки якщо ПВ використовують для одного і того самого газу (або суміші постійного складу) і при тому газ (або всі компоненти суміші) є слабкорозчинним у ПР. Прикладом таких газів може бути повітря, водень, окис вуглецю. Якщо ці умови не задовольняються, то відповідна похибка не дорівнює нулеві.

Полярно протилежний випадок відзначається для сильнорозчинних у воді газів (амоняк, бромистий водень, двоокис сірки), навіть якщо склад газу постійний, коли вимірювання є практично неможливим. Так, наприклад, розчинність амоняку у воді в звичайних умовах становить 62300 об.% [15]. В таких випадках необхідне тільки ПР з основою, в якій не розчиняються компоненти досліджуваного газу.

У проміжних випадках похибка може змінюватись від зникомо малої до недопустимо великої залежно від розчинності газових компонентів, діапазону і швидкості зміни концентрацій компонентів досліджуваного газу, властивостей і об'єму ПР, площі та часу контактування газу з ПР. Оцінка цієї похибки для конкретного випадку може бути достатньо складним завданням [16], зокрема може вимагати експериментальних (аналітичних) досліджень. І окремо слід звернути увагу на ймовірність впливу неконтрольованої вологості газу для ПР на неводній основі, коли водяна пара зі

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

збільшенням вологості поглинається ПР, або, навпаки, виділяється з ПР зі зменшенням вологості газу.

Хімічна взаємодія газу з ПР призводить до тих самих наслідків щодо точності вимірювання, що і поглинання газу, тому слід вживати заходів для її уникнення (наприклад, відповідно підбираючи ПР).

Теплове розширення газу в МТ при зміні температури газу призводить, як випливає з рівняння стану, до похибки вимірювання на рівні 0,34 %/К і мусить бути або враховане, або усунене.

4. Похибки визначення часу. Під час візуального відліку з використанням секундоміра похибка визначення часу τ може не перевищувати ±0,2 с [3], що при малому часі τ може значно впливати на результат. Наприклад, якщо τ=20 с, похибка визначення часу становить 1%. Цю похибку можна зменшити на порядок, збільшивши час τ до 200 с, але це може виявитися неможливим для цього об'єму V МТ. Крім того, збільшення часу τ може спричиняти деструктивні зміни у рухомій плівці та у плівці на стінках МТ. Тому єдиним радикальним способом зменшення цієї похибки є встановлення автоматичних фіксаторів з електронним секундоміром, що зводить цю похибку до такої, яку можна не враховувати.

5. Вплив температури. Температура впливає на результат вимірювання багатьма способами, основні з яких були згадані вище, а саме теплове розширення скла МТ, плівки рідини на внутрішній поверхні МТ і досліджуваного газу в МТ, а також зміна концентрації пари ПР у досліджуваному газі. Тільки перший з вказаних чинників призводить до заниження результатів зі зростанням температури, але оскільки його вплив є набагато меншим за вплив решти факторів, то загальний вплив температури визначається сумою впливів останніх трьох факторів, що становить разом 0,57 %/К. У зв'язку з цим радикальним способом істотного зменшення впливу температури є стабілізація температури основних вузлів ПВ (насамперед МТ) і досліджуваного газу на вході МТ з точністю ±0,1 К.

6. Похибки нормування витрати. Витрата, визначена за (1), є об'ємною витратою газу в реальних ("робочих") умовах, тобто при абсолютних тиску P і температурі T, які відзначаються у МТ. Щоб можна було порівняти об'ємні витрати, виміряні в різних умовах, їх зводять до так званих нормальних (стандартних) умов за формулою

$$Q_н = Q \frac{T_н P}{T P_н k}, \qquad (2)$$

де $P_н$ = 101325 Па; $T_н$ = 293,15 К (або $T_н$ = 273,15 К); k – коефіцієнт стискуваності.

З цією самою метою виміряну об'ємну витрату Q в реальних умовах переводять у масову, домножуючи розраховану, як вказано вище, об'ємну витрату $Q_н$ на густину газу $\rho_н$ у нормальних умовах. В обидвох випадках необхідно знати точні значення параметрів стану газу в МТ, а також коефіцієнта стискуваності (якщо умови значно відрізняються від атмосферних).

Як випливає із (2), похибка визначення витрати прямо залежить від похибки визначення температури і становить 0,34 %/К. Якщо вимірювати температуру в МТ з мінімально можливою похибкою ±0,05 К, то відповідна похибка визначення витрати дорівнюватиме 0,017%. Проте досягнення такої точності є проблематичним. Однією з основних причин цього є необхідність забезпечити однорідність температурного поля у МТ, що потребує окремих заходів, особливо для МТ значних розмірів. Різниця температур в 1К є далеко не значенням, особливо якщо температура газу, що надходить, значно відрізняється від температури МТ. У такому разі доцільно обладнати МТ двома окремими термодавачами біля каліброваних міток, а також теплообмінником на вході ПВ. Радикальним способом зменшення впливу температури є обладнання ПВ системою термостабілізації та вирівнювання температури всередині теплового контуру ПВ, в якому знаходяться МТ, генератор плівок і теплообмінник. Якщо температура стабілізується на рівні ±0,1 К, відповідна похибка вимірювання витрати дорівнюватиме 0,034 %, що є прийнятним значенням.

Похибка визначення витрати від впливу тиску газу в МТ відповідно до (2) дорівнює похибці визначення абсолютного тиску і становить для відкритих на атмосферу МТ 0,135 %/ммHg. Тому, якщо не враховано зміни атмосферного тиску, наприклад, на 30 ммHg, фактичні витрати відрізнятимуться на 4%. Тому ПВ повинен бути обладнаний барометром для ручного або автоматичного перерахунку результатів вимірювань. Якшо використовуються барометри з абсолютною похибкою вимірювань 30 Па, відносна похибка визначення витрати становитиме 0,03 %, що є здебільшого допустимим.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

Отже, загалом, для ПВ з тиском у МТ, близьким до атмосферного (k=1), при якісних стабілізації температури і вимірюваннях абсолютного тиску, враховуючи незалежність цих параметрів, мінімально можлива похибка нормалізації витрати становить 0,045 %. Водночас відзначимо, що неврахування взагалі впливу тиску і температури взагалі може призвести до похибки на рівні багатьох відсотків.

Набагато складніша ситуація виникає, коли газ у МТ є під тиском, що істотно відрізняється від атмосферного, наприклад, тиском близько 40 атм [17]. У такому разі можна застосовувати манометр абсолютного тиску (або барометр і манометр надлишкового тиску), похибки вимірювання яких є, проте, набагато меншими (наприклад, клас точності приладів фірми "FISHER-ROSEMOUNT" – 0,075) за похибку визначення коефіцієнта стикуваності газу [16, 18], внаслідок чого похибка нормалізацій витрати може досягати кількох відсотків, здебільшого за рахунок коефіцієнта k.

Додаткова похибка для масової витрати виникає внаслідок неточності визначення густини $\rho_{н,}$ похибка якої становить 0,1...0,5 % [18] і є вирішальною для ПВ з відкритою на атмосферу МТ.

7. Сумарна похибка ПВ. Очевидно, що сумарна похибка ПВ залежить насамперед від його виконання, методу і якості градуювання, а також властивостей досліджуваного газу і може бути розрахована за оцінками складових похибок, розглянутих у цій роботі. Загальна похибка вимірювання може не перевищувати 0,1 %, з урахуванням вищенаведених рекомендацій для газів, які практично не взаємодіють з ПР і з тиском, близьким до атмосферного. Для газів під тиском, що істотно відрізняється від атмосферного, ця похибка збільшується до кількох відсотків. Загальна похибка вимірювання може зростати до недопустимо великих значень для газів, які сильно взаємодіють з ПР.

Висновки. Як випливає з вищенаведеного, похибка вимірювання витрати за допомогою ПВ залежить від дуже багатьох факторів і може бути як мізерно малою, так і недопустимо великою. Ігнорування розглянутих факторів впливу робить ПВ фактично індикатором витрати, а не вимірювальним приладом. Водночас правильна побудова ПВ, зокрема обгрунтований вибір ПР, генератора плівок, пристрою відведення зруйнованих плівок, форми і розмірів МТ, автоматичних фіксаторів положення плівки з електронним таймером, якісна стабілізація температури, згладження імпульсів тиску і якісне градуювання дає змогу одержати високоточний прилад для вимірювання мікро- і малих витрат газів, придатний і для метрологічного забезпечення промислових витратомірів.

1. Березкин В.Г., Заходский Л.В. Способ уменьшения погрешности измерения расхода газа // Журнал аналитической химии. – 1986. – Вып. 4. – С. 750–752. 2. Пистун Е.П., Стасюк И.Д., Теплюх З.Н. Определение расходных характеристик дроссельных элементов // Автоматизация и контрольно-измерительные приборы в нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности. – М., – 1982. – №4. – С. 28–30. 3. Levy A. The accuracy of the bubble meter method for gas flow measurements // J. Scien. Instrum., V. 41, 1964. 4. Теплюх З.М., Парнета О.З. Похибки визначення каліброваного об'єму газу в бюретці плівкового витратоміра // Вісник НУ "Львівська політехніка". – 2001. – № 432. – С. 121–125. 5. ГОСТ 20292-74. Бюретки, пипетки. Приборы мерные лабораторные стеклянные. – М., 1983. 6. Бродин Ю. Градуювання та метрологічні дослідження дзвонових витратовимірювальних установок // Транспортування, контроль якості та облік енергоносіїв. – Львів, 1998. – С. 155–167. 7. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вимірювальні бюретки плівкових витратомірів газу // Методи та прилади контролю якості. – № 6. – 2000. – С. 64–68. 8. Белошицкий А.П., Ланина Г.В., Симулик М.Д. Анализ погрешности "пузырькового" метода измерения малых расходов газа // Измерительная техника. – № 9. – 1983. 9. Теплюх З.М., Парнета О.З. Генератори плівок мікровитратомірів газів // Вісник НУ "Львівська політехніка". – № 460. – 2002. – С. 78–81. 10. Патент 4.691.577 США, G 01 F 1/708. Soap film gas flowmeter / Hill S. Lalin (США). – № 837,847; Заявлений 10.03.86; Опублікований 08.09.87. – 11 с. 11. Френкель Б.А. Измерение расхода жидкостей и газов в малотоннажных производствах и на экспериментальных установках. – М., 1989. 12. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. 4-е изд. – Л., 1989. 13. Теплюх З.М., Парнета О.З. Робоча рідина плівкового витратоміра // Вісник НУ"Львівська політехніка".– 1999, – № 378. – С. 73–76. 14. Теплюх З.М., Парнета О.З. Вплив високомолекулярних домішок на якість плівок у мікровитратомірах // Вісник НУ"Львівська політехніка". – 2000. – № 404. – С. 103–105. 15. Мюллер Г., Гнаук Г. Газы высокой чистоты. – М., 1968. 16. Рид Р.К., Шервуд Т.К. Свойства газов и жидкостей. Определение и корреляция. – Л., 1971. 17. Köpnick R.,Günschel H. Messung kleiner Gasvolumenströme unter Druck // Messen-Steuern-Regeln. 1980. Bd.23. – №4. – S.192. 18. Морачевский А.Г., Сладков И.Б. Физико-химические свойства молекулярных неорганических соединений (Экспериментальные данные и методы расчета). – Л., 1987.

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua