

# Метрологія та вимірювальна техніка

УДК 623.004.67

Д.Г. Голуб, А.М. Науменко

Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків

## РОЗРОБКА ВИТРАТОМІРУ РІДИНИ У ТРУБОПРОВОДАХ НА БАЗІ ТЕПЛОВИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

*В статті досліджені та проаналізовані витратоміри рідини на базі теплових перетворювачів, в основі яких покладено вимірювання залежного від витрати ефекту теплової дії на потік або тіло, яке контактує з потоком. Ці прилади дають змогу контролювати витрати будь-якої речовини та підвищити оптимізацію технологічних процесів в усіх галузях промисловості.*

**Ключові слова:** витратомір, термоперетворювач, витрата, тепло, потік.

### Вступ

**Постановка задачі.** Значення витратомірів та лічильників кількості рідини, газу та пари у сучасному індустріальному суспільстві займає велике місце. Їх роль дуже зросла у зв'язку з необхідністю максимальної економії енергетичних та водних ресурсів країни, які стають все більш дорогими. За допомогою цих приладів можливо контролювати витрати як звичайної води, так і таких коштовних речовин, як нафта та газ. Витратоміри забезпечують автоматизацію виробництва і досягнення максимальної ефективності. В промисловості витратоміри отримали застосування при безконтактних вимірюваннях в умовах підвищеної агресивності, токсичності, радіоактивності, температури, підвищеного тиску та за інших специфічних умов. Тому удосконалення побудови витратомірів, їх метрологічних характеристик є дуже актуальною задачею.

**Аналіз літератури.** В відомій літературі [1 – 5] розглядаються існуючі типи теплових витратомірів рідини різних принципів дії та призначення, описуються переваги та недоліки конструкцій, але в цій літературі не розкриваються питання, що пов'язані із розробкою витратоміру рідини в трубопроводах на базі теплових перетворювачів.

**Метою статті** є розробка теплового витратоміру рідини, а саме аналіз побудови та характеристик вимірювальних перетворювачів витрати, формулювання та уточнення вимог, які пред'являються до вимірювання витрати у конкретному випадку.

### Основний матеріал

До витратомірів та лічильників кількості пред'являється велика різноманітність та складність вимог, це є причиною створення великого числа типів та різновидів цих приладів. При виборі необхідно виходити із властивостей і параметрів вимірювальної речовини, а також вимог до точності вимірювання та ступеня важливості відповідності тим чи іншим вимогам.

Тепловими називаються витратоміри, в основу яких покладено вимірювання залежного від витрати ефекту теплової дії на потік або тіло, яке контактує з потоком. Існує багато різновидів теплових витратомірів, які розрізняються способом нагріву, розташуванням нагрівача (зовні або всередині трубопроводу) та характером функціональної залежності між витратою та вимірюваним сигналом.

За характером теплової взаємодії з потоком теплові витратоміри можна поділити на калориметричні, термоконвективні та термоанемометричні. Першими з'явилися термоанемометричні прилади для вимірювання місцевих швидкостей потоків, потім калориметричні витратоміри із внутрішнім нагрівом, але вони не отримали помітного застосування. Пізніше почали розроблятися термоконвективні витратоміри. Завдяки зовнішньому розташуванню нагрівача вони знаходять все більш широке застосування в промисловості. У калориметричних і термоконвективних витратомірів вимірюється різниця температур  $\Delta T$  рідини (при сталій потужності  $W$  нагріву) або при потужності  $W$  (при  $\Delta T = \text{const}$ ). У термоанемометрів вимірюється опір  $R$  тіла, що нагрівається, (при сталій силі струму  $i$ ) або ж сила струму  $i$  (при  $R = \text{const}$ ). Калориметричні та термоконвективні витратоміри вимірюють масову витрату за умови незмінності теплоємності вимірюваної речовини, це є їхньою перевагою. Іншою перевагою термоконвективних витратомірів є відсутність контакту з вимірюваною речовиною. Недоліком тих та інших є велика інерційність. Для поліпшення швидкодії застосовують коректуючі схеми, а також імпульсний нагрів. На відміну від інших теплових витратомірів термоанемометри є досить мало інерційними, але вони використовуються переважно для вимірювання місцевих швидкостей, хоча і є конструкції термоанемометричних витратомірів.

Калориметричні витратоміри засновані на залежності від потужності нагріву середньомасової різниці температур потоку. Такий витратомір скла-

дається з нагрівача, який розташовано всередині трубопроводу, та двох термоперетворювачів. Термоперетворювачі розташовуються звичайно на рівних відстанях від нагрівача. Розподілення температур по обидві сторони від джерела нагріву буде залежить від витрати речовини. Зведена похибка калориметричних витратомірів звичайно знаходиться в межах  $\pm (0,3 - 1)\%$ .

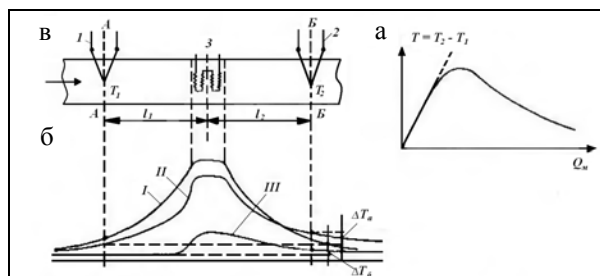


Рис. 1. Калориметричний витратомір:  
а – принципова схема;

б – розподілення температур;

в – залежність  $\Delta T$  від витрати  $Q_x$  при  $W = \text{const}$

Із зростанням витрати зростає різниця температур  $\Delta T = T_2 - T_1$ . Але при достатньому збільшенні витрати  $Q_x$  температура  $T_1$  стане сталою, і буде дорівнювати температурі протікаючої речовини, в той час як  $T_2$  буде спадати. При цьому різниця температур  $\Delta T$  буде зменшуватись із збільшенням витрати  $Q_x$ . Залежність між потужністю  $W$  та витратою  $Q_x$  калориметричних витратомірів можна знайти із рівняння теплового балансу

$$W = k c_p \Delta T Q_x ; \quad (1)$$

звідки

$$Q_x = W / k c_p \Delta T , \quad (2)$$

де  $c_p$  – теплоємність при  $(T_1 - T_2)/2$ , Дж/кг·К;

$k$  – поправочний коефіцієнт, який враховує втрати тепла в навколишнє середовище, похибку вимірювання  $\Delta T$  через нерівномірність розподілення температур по перерізу трубопроводу та можливість підвищення  $T_1$  за рахунок теплопередачі від нагрівача.

При  $W = \text{const}$  витрата  $Q_x$  зворонь пропорційна  $\Delta T$ . При цьому чутливість приладу із зростом витрати спадає. Якщо ж автоматично підтримувати  $\Delta T = \text{const}$  шляхом вимірювання потужності  $W$  нагріву, то між  $Q_x$  та  $W$  буде пряма пропорційність, за винятком області малих швидкостей. Пропорційність між  $Q_x$  та  $W$  є перевагою даного методу, але пристрій витратоміра стає більш складним.

На відміну від калориметричних, у термоконвективних витратомірів відсутній контакт із вимірювальною речовиною. Це витратоміри, у яких як нагрівач, так і термоперетворювач не вводяться всередину тру-

бопроводу, а розташовуються зовні. Це суттєво підвищує експлуатаційну надійність витратомірів і робить їх зручними до застосування. Передача тепла від нагрівача до вимірюваної речовини здійснюється через стінку труби за рахунок конвекції. Вони мають більш велику похибку, яка складає  $\pm(1,5-3)\%$ .

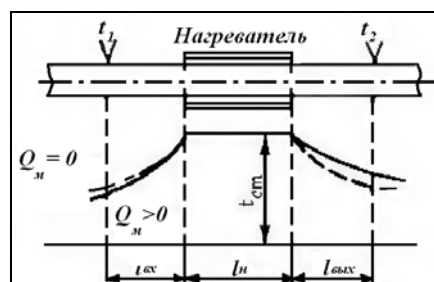


Рис. 2. Термоконвективний  
квазікалориметричний витратомір

При конструюванні теплового витратоміру із зовнішнім розташуванням нагрівача, який зображено на рис. 2, важливо правильно обрати довжину нагрівача і відносно нього – розташування термоперетворювачів. Найчастіше застосовується симетричне розташування термоперетворювачів, але також інколи розташовують перший перетворювач за ходом потоку подалі від нагрівача, а другий поблизу до нагрівача. Для вимірювання витрати високотемпературних середовищ і різноманітних речовин в потенційно небезпечних технологічних процесах знайшли застосування теплові витратоміри із рідинним теплоносієм, зазвичай водою. При цьому в більшості випадків вода охолоджує, а не нагріває вимірювальну речовину. Первинні перетворювачі термоанемометрів розподіляються на дровові, плівкові та терморезисторні. Чутливий елемент дровового перетворювача – це тонкий і зазвичай короткий дріт з платини, вольфраму, нікелю. Кінці дроту приварюють до кінців двох манганінових стрижнів, які закріплені на жорсткій основі.

Теплова потужність  $W$ , яка втрачаються дротом діаметром  $d$  і довжиною  $l$  при обтіканні її перпендикулярним потоком повітря, що має швидкість  $v$ , визначається за формулою

$$W = (T_d - T_c) l (a + b v^n), \quad (3)$$

де  $a = \lambda$ ;  $b = (2\pi\rho c d)^{0,5}$ ;  $n = 0,5$ .

$\lambda$ ;  $\rho$ ;  $c$  – коефіцієнт теплопровідності, щільність і теплоємність відповідно.

Плівковий перетворювач складається з круглого скляного пологого стрижня діаметром в декілька міліметрів з клиновидним кінцем, на який розпилена плівка платини у вигляді невеликої смужки. Кінці смужки з'єднані із дротами, які проходять всередині скляного стрижня.

Плівкові перетворювачі є значно прочнішими за дровові і можуть служити для вимірювання швидкостей газу від 1,5 м/с аж до 400 – 500 м/с при температурах до 500 °С і швидкостей рідини до 18 м/с

при температурі до 60 °С. Їх інерційність трохи більша, ніж у дротових і зростає із зменшенням швидкості. Верхня частотна межа зменшується від 100 кГц при швидкості повітря 300 м/с до 1 кГц при швидкості 1 м/с.

В якості чутливого елемента терморезисторного перетворювача використовується мініатюрний напівпровідниковий терморезистор, виконаний зазвичай у вигляді кульки або намистинки. Перевагою таких перетворювачів є простота конструкції, механічна міцність і висока чутливість. Все більш поширюється застосування їх в якості термоанемометрів для вимірювання швидкостей рідин та газів при дуже високій температурі. Стала часу в них декілька більше, ніж у дротових і плівкових термоанемометрів, і в залежності від розміру терморезистора складає 0,5 – 2,5 с.

Перетворювач термоанемометричного витратоміру відрізняється від перетворювача звичайного термоанемометра тим, що чутливий елемент (термомонітка) знаходиться не в якійсь одній точці потоку, а більш менш рівномірно розподілено по всьому його перерізі.

Витратомір води в трубопроводі на основі теплових перетворювачів термоанемометричного типу може використовуватися в різноманітних гідротехнічних об'єктах (наприклад насосних станціях), де контролюється не тільки швидкість та витрата води, але в ряді випадків напрямок і наявність потоку. Це вирішується за допомогою теплових перетворювачів термоанемометричного типу, які конструктивно виконуються у вигляді стрижневих теплопроводів з напівпровідниковими термочутливими елементами.

На рис. 3 наведені основні варіанти конструкцій теплових перетворювачів стрижневого типу, де 1 – теплопровід з нагрівачем, який розташований із зовнішньої сторони трубопроводу; 2 – теплопровід з нагрівачем в потоці вимірюваного середовища; 3 – теплопровід без нагрівача.

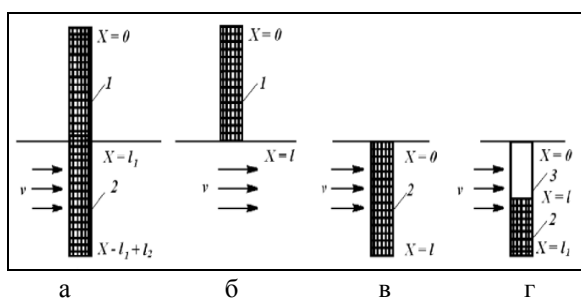


Рис. 3. Основні типи стрижневих теплових перетворювачів

На першій схемі зображено розташування ділянки теплопроводу, яка нагрівається, в потоці та на зовні. На другій – теплопровід знаходиться на зовні, на третій – теплопровід повністю занурюється в потік, і на четвертій – нагрівач лише частково розташовується у потоці. Термочутливі елементи розта-

шовують по різному в залежності від поставленої мети (наприклад збільшення чутливості, розширення діапазону тощо).

Найбільш ефективною є остання конструкція, в якій завдяки розташуванню нагрівача у потоці та віддаленню його від стінки труби уся теплова міцність нагрівача приймає участь у теплообміні із середовищем та не виникає паразитних втрат тепла, що забезпечує високу точність вимірювання.

## Висновки

1. На основі проведених досліджень можна сформулювати багаточисленні вимоги, що пред'являються до витратомірів та лічильників, головними з яких є висока точність вимірювання, надійність, мала залежність точності вимірювання від вимірювання щільності речовини, швидкодія приладу або високі динамічні характеристики, великий діапазон вимірювання, забезпечення метрологічною базою, необхідність вимірювання витрати як в звичайних, так і в експериментальних умовах.

2. Проаналізувавши характеристики розглянутих витратомірів можна зробити висновки, що витратоміри термоанемометричного типу є найбільш відповідними вищеперерахованим вимогам. Термоанемометри є досить мало інерційними, вони мають великий діапазон вимірювальних швидкостей, починаючи від досить малих. Відносна похибка знаходиться в межах 0,2 – 0,5%, що свідчить про достатню точність вимірювання. Лише ці витратоміри мають малу залежність точності вимірювання від вимірювання щільності речовини. Також вони характеризуються досить високою швидкодією, яка дозволяє вимірювати швидкості, що змінюються з частотою в декілька тисяч герц. Отже термоанемометричний витратомір є найбільш доцільним для застосування в конкретних поставлених умовах.

## Список літератури

- 1 Кремлевский П.П. – Расходомеры и счетчики количества веществ: Справочник: Кн. 2 / под общ. ред. Е.А. Шорникова. – 5 – е изд., перераб. и доп. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.: ил.
- 2 Кремлевский П.П. – Расходомеры и счетчики количества: справочн. / П.П. Кремлевский – 4 – е изд., перераб. и доп. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1989. – 701с.: ил.
- 3 Преображенский В.П. Теплотехнические измерения и приборы: учебн. для вузов. – М.: Энергия, 1998. – 704 с.
- 4 Таиматов Х.К. – Датчики и системы. Журнал / Х.К. Таиматов. ООО «СенСиДат - Контрол», Номер выпуска – 4, 2006. – 77 с.
- 5 Чинков В.М. Основы метрологии та вимірювальної техніки / В.М. Чинков. – М.: МО, 2001. – 424 с.

Надійшла до редколегії 10.04.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Б. Кононов, Харківський університет Повітряних Сил ім. І. Кожедуба, Харків.

**РАЗРАБОТКА РАСХОДОМЕРА ЖИДКОСТИ В ТРУБОПРОВОДАХ  
НА ОСНОВЕ ТЕПЛОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ**

Д.Г. Голуб, А.Н. Наumenко

*В статье исследованы и проанализированы расходомеры жидкости на основе тепловых преобразователей, в основу которых положено измерение зависящего от расхода эффекта теплового действия на поток или тело, контактирующее с потоком. Эти приборы дают возможность контролировать расход любого вещества и повысить оптимизацию технологических процессов во всех областях промышленности.*

**Ключевые слова:** расходомер, термопреобразователь, расход, тепло, поток.

**DEVELOPMENT OF THE FLOWMETER OF LIQUID IN PIPELINES  
ON THE BASIS OF THERMAL CONVERTERS**

D.G. Golub, A.N. Naumenko

*In article flowmeters of liquid on the basis of thermal converters in which basis measurement of effect of thermal action dependent on an expense on a stream or a body contacting to a stream is necessary are investigated and analyzed. These devices give the chance to supervise an expense of any substance and to increase optimization of technological processes in all areas of the industry.*

**Keywords:** a flowmeter, the thermoconverter, expense, heat, a stream.