

УДК 681.121

### ТЕНЗОМЕТРИЧНИЙ ВИТРАТОМІР РІДИНИ

**О.Д. Антохов**

студент

*ant15@inbox.ru*

**Т.О. Гаур**

асистент кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
і засобів автоматики»

*tebarka@gmail.com*

**В.І. Нікіфоров**

студент

*martineden19552@gmail.com*

**В.І. Цацко**

к.ф.-м.н., ст.викладач

кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання  
і засобів автоматики»

*vgik@ua.fm*

*Одеський національний морський університет*

**Анотація.** Розглянутий витратомір рідини, в якому для підвищення надійності та точності вимірювання було запропоновано вимірювання витрат рідини за різницею статичних тисків в двох різних перетинах труби з використанням двох тензорезисторів. Розглянутий вплив геометричних розмірів та фізичних властивостей рідини на величину похибки. Запропонована структурна схема системи тензометричного вимірювання витрат рідин, що дозволяє проводити дослідження в широкому діапазоні швидкостей потоку.

**Ключові слова:** тензометрія, витратомір, вимірювання, погрішність, в'язкість, швидкість потоку, геометричні розміри.

УДК 681.121

### ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИЙ РАСХОДОМЕР ЖИДКОСТИ

**А.Д. Антохов**

студент

**Т.А. Гаур**

асистент

кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»

**В.И. Никифоров**

студент

**В.И. Цацко**

к.ф.-м.н., старший преподаватель

кафедры «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики»

*Одесский национальный морской университет*

---

© Антохов О.Д., Гаур Т.О., Нікіфоров В.І., Цацко В.І., 2018

**Аннотация.** Рассмотрен расходомер жидкости, в котором для повышения надежности и точности измерения было предложено измерения расхода жидкости по разнице статических давлений в двух различных сечениях трубы с использованием двух тензорезисторов. Рассмотрено влияние геометрических размеров и физических свойств жидкости на величину погрешности. Предложена структурная схема системы тензометрического измерения расхода жидкостей, позволяющая проводить исследования в широком диапазоне скоростей потока.

**Ключевые слова:** тензометрия, расходомер, измерения, погрешность, вязкость, скорость потока, геометрические размеры.

UDC 681.121

## THE FLOW METER OF A LIQUID

**A. Antochov**

student

**T. Gaur**

assistant

the department "Operation of ship electrical equipment and automation"

**V. Nikiforov**

student

**V. Tsatsko**

candidate of physical and mathematical sciences, senior lecturer

of the department «Operation of marine electrical equipment and means of automation»

*Odessa National Maritime University*

**Abstract.** The flow meter of a liquid was considered, in which, for increasing the reliability and accuracy of the measurements, liquid flow measurements were proposed for the difference in static pressure in two different pipe sections using two strain gauges. The influence of geometrical sizes and physical properties of a liquid on the magnitude of the error is considered. The structural scheme of the strain gauge measurement system for liquid flows is proposed, which allows conducting research in a wide range of flow rates.

**Keywords:** strain gauge, flow meter, measurement, error, viscosity, flow velocity, geometric dimensions.

**Актуальність теми.** Витратоміри рідини знайшли широке застосування на судах. Вони використовуються як для вимірювання кількості рідких товарів і технічних рідин при завантаженні (розвантаженні), так і в системах подачі палива, змащення, охолодження та нагріву [1].

Тому питання точності та надійності вимірювання витрат рідини досить актуальні.

Існуючі витратоміри рідини можна умовно поділити на дві групи.

У витратомірах першої групи (наприклад індукційних, теплових та ін.) потрібне встановлення всередину рідини тих чи інших елементів вимірювання, що приводить до похибок вимірювання при зростанні часу перебування цих елементів в рідині завдяки забрудненню, зменшує відтворюваність та надійність отриманих результатів.

До другої групи відносяться витратоміри, які не утримують елементів вимірювання усередині рідини.

До них можна віднести витратоміри на основі ефекту Коріоліса [2] та тензометричні витратоміри [3]. Перші не знайшли широкого застосування на судах внаслідок високого рівня паразитних вібрацій як при качці, так і при роботі механізмів в машинному відділенні.

Для підвищення надійності і точності вимірювань в роботі [3] було запропоновано вимірювати витрати рідини за різницею статичних тисків у двох точках за допомогою двох тензорезисторів, які розташовані на ділянках вимірювального трубопроводу з різними перетинами труби.

Ця мета досягалася тим, що в тензометричному витратомірі, який утримує вимірювальну ділянку трубопроводу, перший та другий тензорезистори, що встановлені на верхній зовнішній стороні у відповідних перетинах, та тензометричний підсилювач, який виходами з'єднаний зі входами реєстратора, тензорезистори з'єднані у напівміст, а два перетини труби виконані з забезпеченням співвідношення

$$\frac{r_{i1}}{r_{i2}} = \frac{h_1}{h_2}, \quad (1)$$

де  $r_{i1}, r_{i2}$  – внутрішні радіуси двох перетинів трубопроводу;

$h_1, h_2$  – товщини стінок трубопроводу в двох перетинах.

На рис. 1 зображений такий витратомір.

Тензометричний витратомір містить тензометричний підсилювач 1, до виходу якого підключений реєстратор 2, два тензорезистори, з'єднані в напівміст і встановлені зверху перпендикулярно осі на двох різних перетинах 3 і 4 горизонтально розташованої труби. Труби 3 і 4 виготовлені із забезпеченням співвідношення (1).

Устрій працює наступним чином. При русі рідини в трубі в перетинах 3 і 4 із зовнішньої сторони виникають окружні напруги, які при знехтуванні зовнішнім тиском дорівнюють (формули Ламе) [4]

$$\sigma_{r1} = \frac{2p_1 r_{i1}^2}{r_{a1}^2 - r_{i1}^2}; \quad \sigma_{r2} = \frac{2p_2 r_{i2}^2}{r_{a2}^2 - r_{i2}^2}, \quad (2)$$

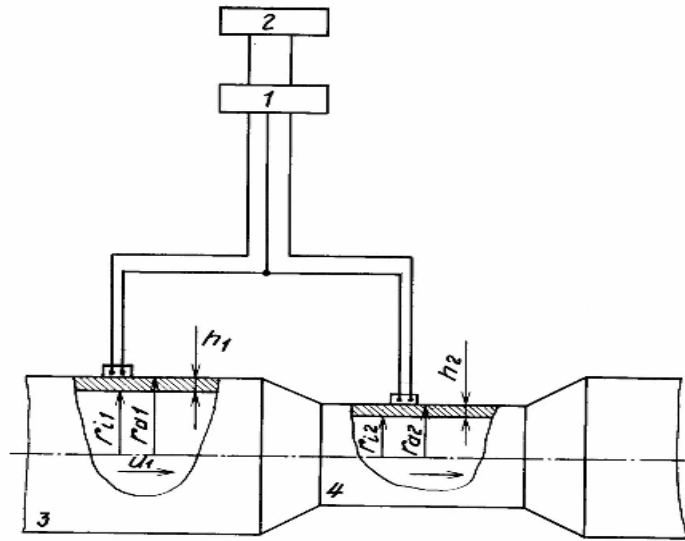


Рис. 1. Тензометричний витратомір

де величини з індексом 1 віднесені до перетину 3, а з індексом 2– до перетину 4

$\sigma_{t1}, \sigma_{t2}$  – окружні напруги зовні циліндру;

$p_1, p_2$  – статичні тиски всередині труби;

$r_{i1}, r_{i2}$  – внутрішні радіуси труби;

$r_{a1}, r_{a2}$  – зовнішні радіуси труби.

З (2) з урахуванням (1) різниця статичних тисків в перетинах 3 і 4 рівна

$$p_1 - p_2 = \frac{1}{2} \left( \frac{r_{a1}^2}{r_{i1}^2} - 1 \right) (\sigma_{t1} - \sigma_{t2}) \quad (3)$$

З рівнянь безперервності і рівняння Бернуллі [5] слідує

$$S_1 v_1 = S_2 v_2 \Rightarrow v_2 = v_1 \frac{r_{i1}^2}{r_{i2}^2} \quad (4)$$

$$p_1 + \frac{\rho}{2} v_1^2 = p_2 + \frac{\rho}{2} v_2^2, \quad (5)$$

де  $S_1, S_2$  – площі перетину труби в перетинах 3 та 4;

$v_1, v_2$  – швидкості течії рідини в перетинах 3 та 4;

$\rho$  – щільність рідини.

Знайдемо різницю статичних тисків в перетинах 3 та 4

$$p_1 - p_2 = v_1^2 \frac{\rho}{2} \left( \frac{r_{i1}^4}{r_{i2}^4} - 1 \right). \quad (6)$$

Витрата рідини з урахуванням (3) та (6) буде рівна

$$Q = S_1 v_1 = K \sqrt{\sigma_{\tau 1} - \sigma_{\tau 2}}, \quad (7)$$

$$\text{де } K = \pi r_{i1} r_{i1}^2 \sqrt{\frac{r_{a1}^2 - r_{i1}^2}{\rho (r_{i1}^4 - r_{i2}^4)}}.$$

Так як зміна опору тензорезисторів пропорційна окружній напрузі, те загальна зміна опору двох тензорезисторів, що з'єднані в напівміст, буде пропорційна різниці окружних напружень.

Отже, на вході тензометричного підсилювача буде величина, яка пропорційна квадрату витрат рідини.

$$\Delta R \equiv C Q^2, \quad (8)$$

де  $C = 1 / K^2$ .

#### **Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми.**

Слід, однак відзначити, що в наведеній роботі [3]

1) не була проведена оцінка впливу різних факторів (швидкості потоку, в'язкості рідини та ін.) на погрішність вимірювання.

2) не наведені принципи розрахунку геометричних розмірів вимірювальної ділянки.

Це не дозволяє прийняти на віру висновок про підвищення надійності вимірювань та зменшення їх похибок.

**Мета статті.** Метою даної статті є

1) оцінка впливу швидкості потоку на результати вимірювань;

2) оцінка впливу геометричних розмірів вимірювального трубопроводу, та властивостей рідини на погрішність вимірювання витрат рідини;

3) розробка принципів визначення геометричних розмірів вимірювальної ділянки.

**Виклад основного матеріалу.** В роботі [3] не враховувався вплив швидкості та в'язкості рідини на втрати тиску внаслідок тертя по довжині труби.

Закон опору (закон Пуазейля) [6], тобто вираз втрати тиску через швидкість і розміри труби має вигляд

$$\Delta p_{TP} = \frac{64\nu}{v_{CP} d} \frac{l}{d} \frac{v_{CP}^2}{2} \rho = \lambda_L \frac{l}{d} \frac{v_{CP}^2}{2} \rho, \quad (9)$$

де  $\lambda_D = 64 / Re$  – коефіцієнт втрат на тертя для ламінарної течії рідини (коефіцієнт гідравлічного тертя);

$v_{CP}$  – середня швидкість течії;

$l$  – відстань, на якій відбувається зміна тиску.

З урахуванням додаткових опорів, що викликаються в основному спотвореннями поперечного перетину труби та охолодженням зовнішніх шарів рідини при розрахунках слідє приймати  $\lambda_D = 75 / Re$ .

Формула Дарсі-Вейбаха (9) показує, що втрати тиску на тертя по довжині трубопроводу при ламінарному плинні рідини пропорційні швидкості. Коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі) обернено про-порційний числу Рейнольдса, і, отже, швидкості потоку. Крім того він залежить від властивостей рідини і розмірів труби, а шорсткість стінок на втрати тиску практично не впливає.

Особливо слід відзначити, що формула (8) може бути використана як при ламінарному, так і при турбулентному русі рідини, відмінність полягає лише в значеннях коефіцієнта гідравлічного тертя.

Досліди показують, що при переході до турбулентного руху спостерігається деякий стрибок в сторону збільшення тертя і більш круте зростання втрат тиску по кривій близькою до параболі другого ступеня.

При ламінарному плинні втрати на тертя прямо пропорційні в'язкості, а при турбулентному вони пропорційні в'язкості в ступеня  $1/4$ .

Для оцінки впливу падіння тиску за рахунок в'язкості на результати вимірювань тензOMETричними витратоміра нами було запропоновано використовувати порівняння рівнянь (6) і (9) в наступному вигляді

$$N = \frac{\Delta p_{TP}}{p_1 - p_2} = \frac{64\nu l v_{CP}}{d^2 v_1^2 \rho \left( \frac{r_{i1}^4}{r_{i2}^4} - 1 \right)} = \frac{64\nu v_{CP}}{d v_1^2 \rho \left( \frac{r_{i1}^4}{r_{i2}^4} - 1 \right)} \frac{l}{d} \quad (10)$$

При припущенні, що  $v_{CP} = v_1$  слідє, що помилка зворотно пропорційна швидкості, зменшується при зменшенні співвідношення  $\frac{l}{d}$  і збільшенні діаметра трубопроводу  $d$ .

Для кількісної оцінки розглянемо цей вираз для води при нормальних умовах ( $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu = 0,001 \text{ Па} \cdot \text{с}$ ) і розмірах вимірювальної ділянки трубопроводу ( $d = 0,1 \text{ м}$ ;  $\frac{r_{i1}}{r_{i2}} = 1,1$ ). Тоді (10) перетвориться до

$$\text{виду } N = \frac{1,39 \cdot 10^{-1} l}{v_1 d}.$$

На рис. 2-3 показані залежності помилки від швидкості потоку при двох значеннях відношення  $l/d$  (рис. 2), та трьох різних мастил (рис. 4).

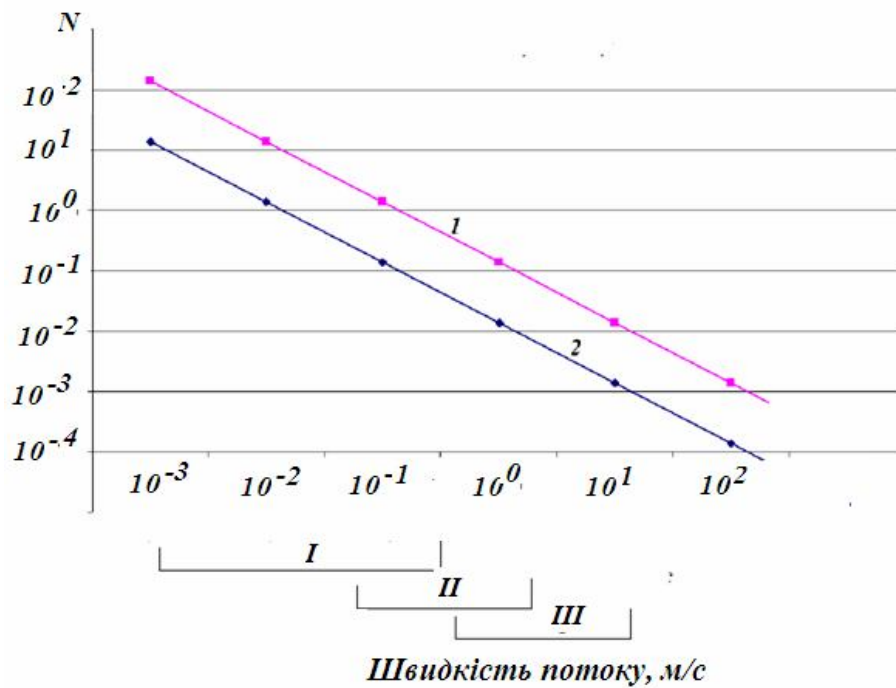


Рис. 2. Вплив співвідношення  $l/d$  на величину похибки:  
(1-  $l/d = 0,1$ ; 2 -  $l/d = 0,01$ ) (тут римськими цифрами означені діапазони зміни швидкості потоку:  
I – палива; II – мастила; III – охолоджуючої рідини)

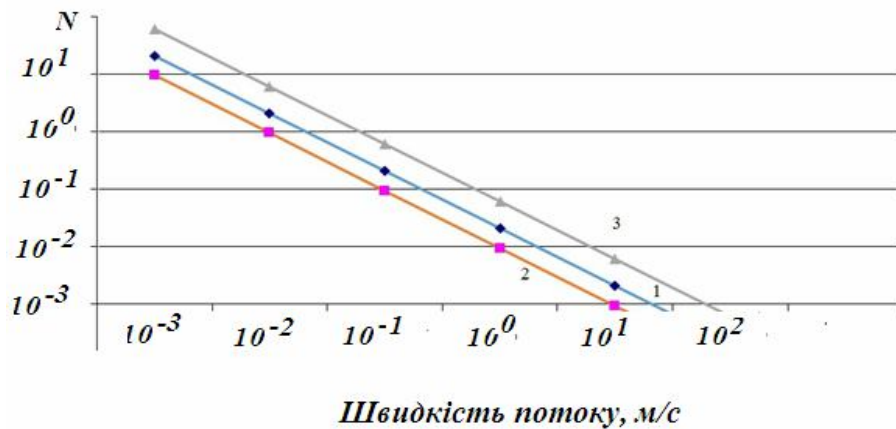


Рис. 3. Вплив властивостей мастил на величину похибки

- 1 – Esso Unapharm SAE 10W-30 ( $\rho = 883 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu = 0,060397 \text{ Па}\cdot\text{с}$ );
- 2 – Esso Compressor Oil RS 32 ( $\rho = 840 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu = 0,02604 \text{ Па}\cdot\text{с}$ );
- 3 – Esso HLPD-Oel 22 ( $\rho = 865 \text{ кг/м}^3$ ;  $\nu = 0,173 \text{ Па}\cdot\text{с}$ ).

Аналіз наведених графіків дозволяє отримати висновок, що при наявності відповідних швидкостей потоків та геометричних розмірів вимірювального трубопроводу впливом швидкості потоку на результати вимірювання витрат рідини можна знехтувати лише при визначенні витрат охолоджуючої рідини (область *III*).

У витратомірах, які використовуються при швидкостях потоку з області *II* (до них відносяться витратоміри мастила та ті, що застосовуються при завантаженні (розвантаженні) рідких товарів та технічних рідин), зменшення похибок можна досягти зміною розмірів вимірювального трубопроводу: зростанням діаметру і (або) зменшенням відстані між тензо-резисторами.

У витратомірах, які використовуються при швидкостях потоку з області *I*, знехтувати впливом тертя на результати вимірювання практично неможливо.

Крім того, як показано на рис. 3, на величину похибки суттєвий вплив оказують і властивості рідини.

Наведені результати розрахунків говорять про те, що при малих швидкостях потоку похибки тензометричного витратоміра, які пов'язані з в'язкістю рідини, мають великі значення, вони залежать як від фізичних властивостей рідини, так і від геометричних розмірів вимірювальної ділянки трубопроводу.

Тому нами запропонована наступна схема системи вимірювання витрат рідини (рис. 4).

Схема працює наступним чином. У блоці зрівняння почергове відбувається вимірювання різниці сигналів, що отримуються від тензорезисторів 1 і 2 та 1 і 3. У випадку, коли різниця сигналів між тензорезисторами 1 і 2 значно перевищує ту, що спостерігається між тензорезисторами 1 і 3, впливом гідравлічного тертя можна знехтувати і вимірювання витрат рідини проводяться аналогічно устрою, що наведений раніше.

Сигнал підсилюється і перетворюється у форму, що є зручною для передачі в приймач від передавача бездротовим радіозв'язком. Реєстратор перетворює отримані дані в показники витрат згідно з різницею гідростатичних тисків в трубопроводах різного діаметру. В зворотному випадку, коли різниця сигналів між тензорезисторами 1 і 3 значно перевищує ту, що спостерігається між тензорезисторами 1 і 2, то вимірювання витрат рідини проводяться за допомогою виразу (9).





Рис. 4. Структурна схема тензометричного витратоміра

### Висновки

1. Наведені результати розрахунків говорять про те, що швидкість потоку оказує значний вплив на величину похибки вимірювання тензометричного витратоміра з двома тензорезисторами, розміщеними в перетинах трубопроводу з різними діаметрами.

2. Вибором відповідних розмірів вимірювальної ділянки трубопроводу можливе досягнути задовільних результатів для витратомірів охолоджуючої рідини, змащення, й тих витратомірів, що використовуються при завантаженні і розвантаженні рідких товарів і технічних рідин.

3. Запропонована схема вимірювання з трьома тензорезисторами, яка дозволяє проводити вимірювання у великому діапазоні зміни швидкостей потоку, у тому числі при відносно малих швидкостях потоку, які спостерігаються в системах подачі палива.

4. В подальшому буде проведено вивчення впливу тиску і температури на показання тензометричного витратоміру, бо в'язкість рідини суттєво залежить від цих параметрів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Сайт компанії «Прамень». – URL: <http://www/npropramen.ru> (дата звернення 14.05.2018).
2. Патент № 2007129984 РФ. Способ повышения точности проверки расходомера / М.Ю. Михеев, В.А. Юрманов, К.И. Володин, К.В. Гудков, А.В. Куц заявители / Пензенская государственная технологическая академия правообладатель. – Заявл. - 06.08.2007 зарег. 20.02.2009 – Федеральная служба по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам.
3. Тензометрический расходомер // Патент России № 2037796.19.06.1995 // Д.С. Петросов, Н.Г. Гурюшкина, О.Н. Коришунова, А.Д. Ильясафов.
4. Справочник машиностроителя. – Т. 3. – М.: Машигиз, 1962. – С. 211-212.
5. Кухлинг Х. Справочник по физике. – М.: Мир, 1985. – С. 123-125.
6. Симанин Н.А., Сазанов И.И. Гидравлика: Учебник. – Пенза, Изд-во ПГТА, 2012. – 267 с.

Стаття надійшла до редакції 26.11.2018

#### Рецензенти:

доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Експлуатація суднового електрообладнання і засобів автоматики» Одеського національного морського університету **В.О. Яровенко**

доктор технічних наук, доцент кафедри ІБтаПД Одеської національної академії зв'язку ім. О.С. Попова **В.В. Корчинський**