

УДК 681.121.842

**РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРОЄКТУВАННЯ ВИТРАТОМІРІВ***Коломієць К. С., Гришанова І. А.**Національний технічний університет України**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна**E-mail: [jk4kostia@gmail.com](mailto:jk4kostia@gmail.com), [irgryshanova@gmail.com](mailto:irgryshanova@gmail.com)*

*У роботі представлено розробку програмного забезпечення для автоматизованого проєктування витратомірів змінного перепаду тиску, яке включає витратоміри зі стандартними первинними пристроями, а саме діафрагмою, соплами та трубою Вентурі. Для виконання поставленої задачі проведено огляд різноманітних програмних рішень, який виявив, що вони повною мірою не розв'язують поставлену задачу, оскільки не розраховує більшість конструктивних параметрів вузла обліку.*

*Авторами здійснено аналіз методу вимірювання витрати за змінним перепадом тиску та на його основі запроваджено математичну модель витратомірів, реалізовану з урахуванням існуючих стандартів. Оцінені вихідні геометричні параметри витратоміра та наведено алгоритм визначення параметрів для діафрагми з камерами відбору тисків.*

*В результаті виконаного аналізу розроблено програмне забезпечення, що дозволяє зручно вводити вхідні параметри, такі як витрата, перепад тиску, діаметр трубопроводу, вид звужувального пристрою та метод відбору тисків, і на виході отримувати відповідне схематичне зображення первинного перетворювача витрати з усіма конструктивними параметрами та формулу розрахунку витрати, виходячи з різниці тисків. Для кращого розуміння роботи програмного забезпечення здійснено огляд його особливостей та продемонстровано приклад розрахунку сопла. Впровадження авторської розробки надає змогу підвищення точності обліку споживаних ресурсів, а також зменшує часові та грошові витрати на проєктування засобу вимірювання.*

*В перспективі планується створення програмного комплексу, який включатиме етапи синтезу калориметричних, ультразвукових витратомірів та ротаметрів, а також дозволить обирати найбільш оптимальний метод вимірювання витрати на основі заданих характеристик вимірюваного середовища, діаметра трубопроводу та діапазону вимірюваних витрат.*

*В подальшому можливе здійснення метрологічного контролю і нагляду за такими вимірювальними комплексами та розробка і атестація методик виконання вимірювання витрат рідин і газів.*

**Ключові слова:** автоматизація; проєктування; витратомір; програмний комплекс; програмне забезпечення.

**Вступ. Постановка задачі**

У системах автоматичного керування, інформаційно-вимірювальних комплексах, системах автоматизації експерименту значна частина вихідної інформації подається в формі результатів вимірювань кількості рідин та газів, особливо важливий для єдності комерційних розрахунків. Досить часто вузли обліку, що є частиною вище згаданих систем, базуються на методі змінного перепаду тиску із застосуванням звужувальних пристроїв (ЗП). Для вимірювання витрати газів та рідин застосовується вимірювальний комплекс: первинний перетворювач витрати, дифманометри, перетворювачі тиску та температури, обчислювач.

Широкого розповсюдження набули первинні перетворювачі витрати у вигляді діафрагми. Діафрагма як ЗП має низку позитивних та негативних якостей, на які необхідно звернути увагу. Наприклад, діафрагми прості у виготовленні та монтажі, встановлюються на трубопроводі діаметром від 50 до 1000 мм. Крім того, невизначеність коефіцієнту витікання у них менша, ніж у інших ЗП (сопла,

сопла та труби Вентурі). Однак негативним наслідком застосування діафрагм є втрати тиску, тобто в процесі експлуатації відбувається притуплення вхідної кромки, що призводить до збільшення коефіцієнту витікання (хоча максимально це впливатиме на трубопроводах малого внутрішнього діаметра за малих значень відносного діаметра).

Для ефективного застосування зазначених ЗП запропоновано впровадження вимірювальних комплексів на базі програмного забезпечення для автоматизації проєктування витратомірів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій**

Хоча витратоміри змінного перепаду тиску достатньо добре описані в літературі, однак для ще більшого спрощення та відповідно здешевлення їхньої розробки, а також зменшення ймовірності людської помилки поставлена задача створення програмного забезпечення для автоматизованого розрахунку параметрів витратоміра.

Отже, мета цієї роботи полягає в тому, щоб процес автоматизованого проєктування витратомі-

рів змінного перепаду тиску згідно діючих стандартів зробити зручним і результативним.

Звичайно, на сьогодні існує багато програм розрахунку. Так, *Pipe Flow Calculators* [1] має до-

волі широкі можливості для знаходження різних параметрів трубопроводу, зокрема його діаметра, падіння тиску тощо (рис. 1).

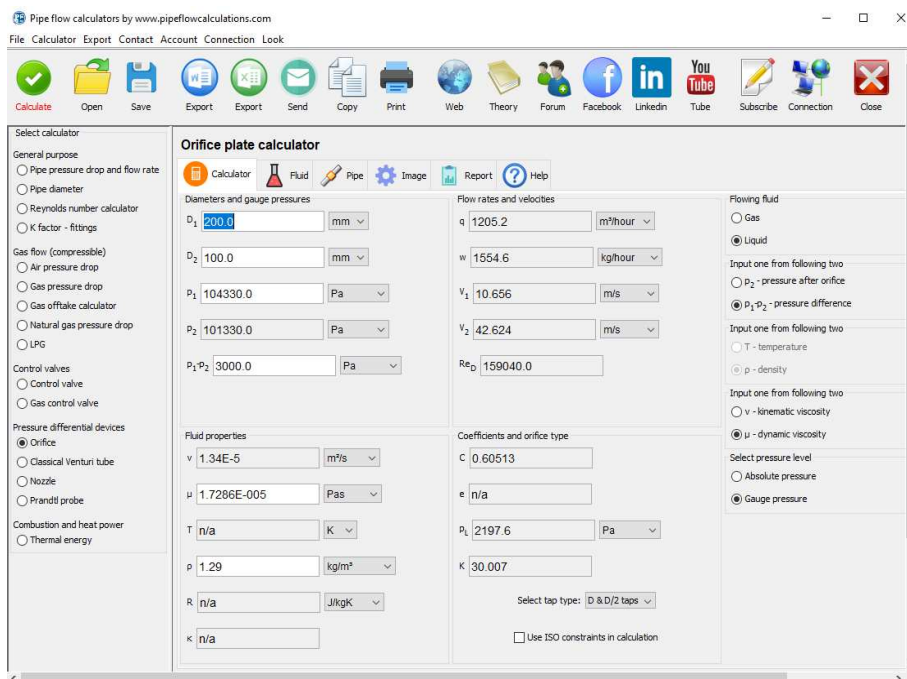


Рис. 1. Інтерфейс програми *Pipe flow calculators* [1]

Для розробки витратоміра змінного перепаду тиску доступні розрахунки діафрагми, труби Вентурі та сопел різних форм. Також автори програми передбачили виведення схематичних рисунків з геометричними параметрами для звужувальних пристроїв та пристроїв відбору тиску (рис. 2). Для труби Вентурі та діафрагми вони дуже спрощені і відображають тільки основні параметри, а для сопел, конструктивна розробка яких є найбільш складною, і зовсім відсутні.

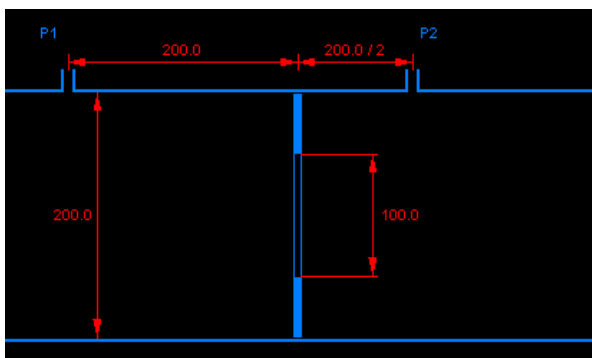


Рис. 2. Приклад розрахунку геометричних розмірів діафрагми [1]

Очевидними перевагами цього програмного комплексу є його доступність завдяки безкоштовній моделі розповсюдження та широкі можливості розрахунку параметрів трубопроводу, неоліком –

обмежені можливості у розрахунку конструктивних параметрів всіх видів звужувальних пристроїв.

Автори *Arian Iso5167 Flow Cad* [2] в інтерфейсі програми передбачили можливість вибору мінімальних та максимальних значень для основних параметрів: тиску та температури вимірюваного середовища, а також різниці тисків (рис. 3).

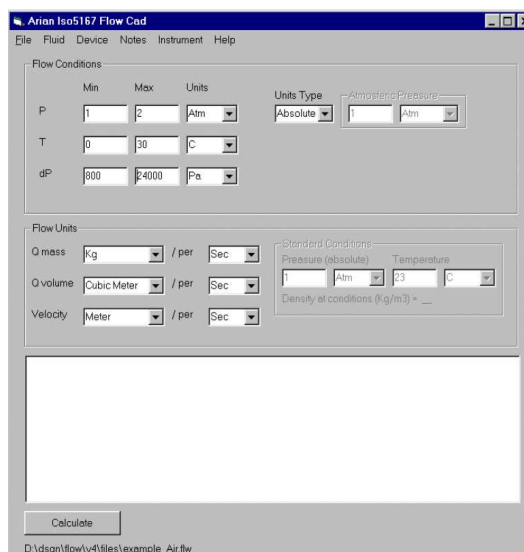


Рис. 3. Інтерфейс програми *Arian Iso5167 Flow Cad* [2]

Середовище та звужувальний пристрій обираються окремо. Вихідними параметрами для цієї програми є густина вимірюваного середовища, його в'язкість (кінематична та динамічна), показник адиабати, масова та об'ємна витрати, число Рейнольда, коефіцієнти витрати та стискуваності.

Програмне забезпечення розраховує параметри для вже попередньо заданого діаметра звужувального пристрою та його виду, що не дозволяє використовувати його для визначення геометричних параметрів при розробці витратоміра.

Програмне забезпечення *TNflow* [3] надає можливість розраховувати діаметр звужувального пристрою, різницю тисків або витрату відносно інших вхідних параметрів (рис. 4).

До переваг цієї програми можна віднести можливість побудови графіків на базі вихідних параметрів (рис. 5).

Недоліком програмного забезпечення є можливість оперувати тільки діаметром звужувального пристрою та параметрами відбору тиску.

Програмний комплекс *Daniel Orifice Plate Flow Calculator* [4] має досить лаконічний інтерфейс (рис. 6).

З вихідних параметрів тут розрахунок витрати, різниці тисків та відношення діаметра звужувального пристрою до діаметра трубопроводу (коефіцієнт бета). До недоліків програми можна віднести її обмежені можливості у конструкторській діяльності при розробці конструкторської документації на витратомір через відсутність багатьох необхідних розмірів.

Аналіз розглянутих прикладів програмного забезпечення свідчить, що вони не придатні для повної розробки витратоміра змінного перепаду тиску, оскільки в них не приділено увагу геомет-

ричним параметрам, які є важливими при проектуванні витратоміра.

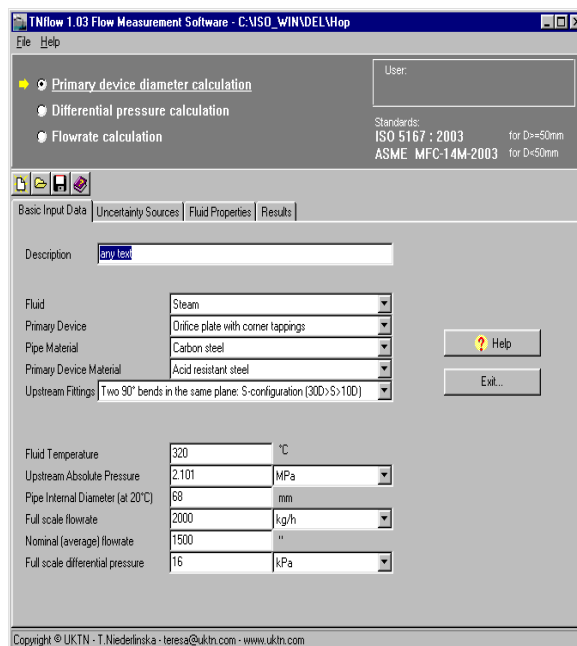


Рис. 4. Інтерфейс програми *Tnflow* [3]

#### Розробка програмного забезпечення для проектування витратомірів змінного перепаду тиску

Ідея програмного забезпечення полягає в тому, щоб надати користувачу всі необхідні параметри перетворювача витрати. Реалізовано воно на прикладі створення витратомірів змінного перепаду тиску. Розглянемо особливості методу вимірювання.

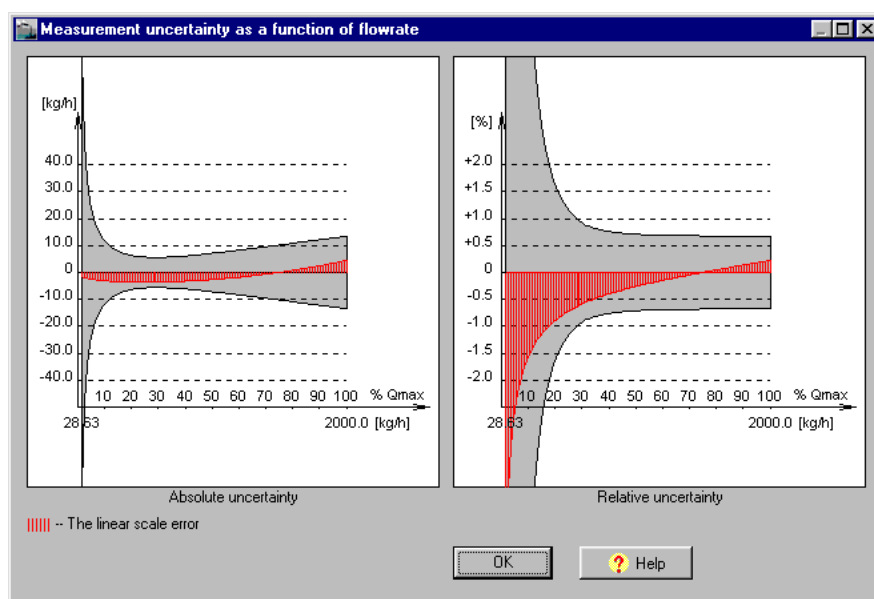


Рис. 5. Приклад побудови графіку похибки визначення витрати в програмі *TNflow* [3]

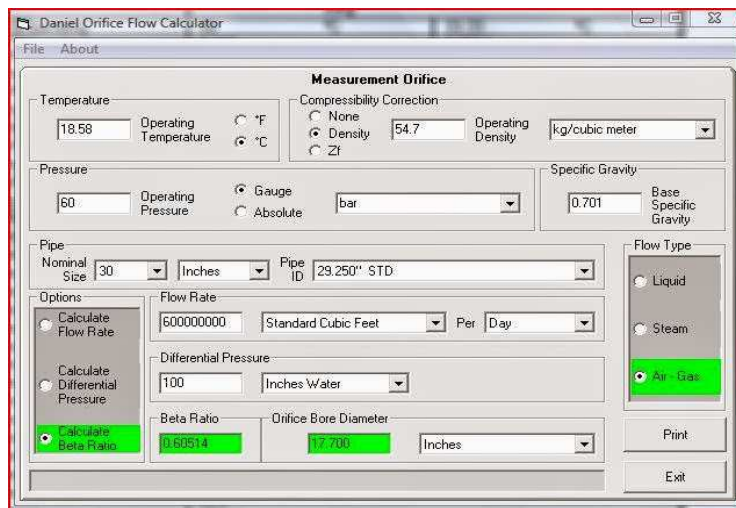


Рис. 6. Інтерфейс програми Daniel Orifice Plate Flow Calculator [4]

**Метод вимірювання витрати.**

Вимірювання витрати засновано на принципі змінного перепаду тиску, що створюється звуженням в каналі трубопроводу. Саме за різницею тиску і розраховується витрата.

Витратомір зазвичай складається зі звукувального пристрою, з'єднуючих труб та диференціального манометра. Також можуть бути додаткові пристрої, наприклад, випрямляч потоку [5].

Стандартно звукувальний пристрій може представляти собою діафрагму, сопло, сопло Вентурі або трубу Вентурі (рис. 7).

Більше ніж половину всіх витратомірів складають прилади змінного перепаду тиску внаслідок таких переваг як [6]:

- стандартизація, завдяки чому не обов'язково проводити калібрування на еталонних проливних установках, і це зменшує собівартість приладу [7];
- простота конструкції, що, в свою чергу, спрощує їхнє серійне виробництво;
- досить висока точність вимірювання;

- відсутність рухомих частин, що збільшує надійність;
- можливість заміни певних елементів (наприклад, манометра) без демонтажу всього приладу.

Проте цей метод вимірювання має і свої недоліки, а саме створення гідравлічного опору і, як наслідок, втрата тиску після витратоміра.

При вимірюванні цим методом важливо приділяти увагу тому, що перепад тиску після проходження звукувального пристрою не призводить до зміни фази вимірювального середовища (наприклад, рідина не повинна випаровуватись) [8].

Вихідним параметром є витрата. Об'ємна витрата ( $Q_v$ ) пов'язана з масовою ( $Q_m$ ) залежністю

$$Q_m = Q_v \cdot \rho = v S_{труби} \cdot \rho = v \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 \rho,$$

де  $\rho$  – густина вимірюваного середовища,  $кг/м^3$ ;  $v$  – швидкість потоку,  $м/с$ ;  $D$  – діаметр трубопроводу,  $м$ ;  $S_{труби}$  – площа поперечного перерізу трубопроводу,  $м^2$ .

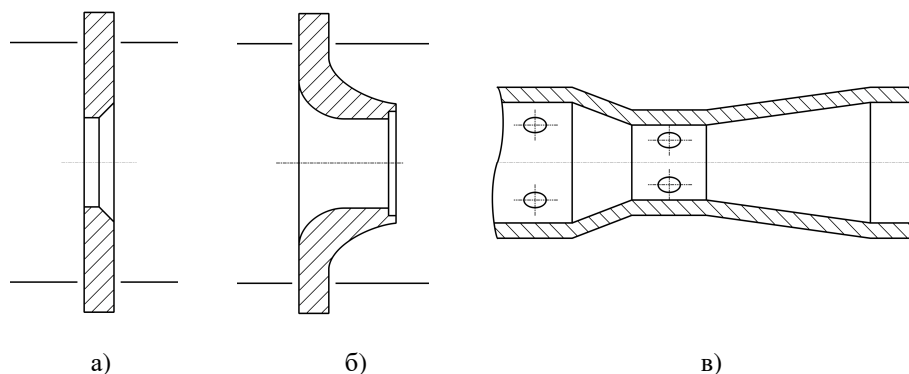


Рис. 7. Види звукувальних пристроїв: а) діафрагма, б) сопло, в) труба Вентурі

Більш коректно застосовувати масову витрату [9], оскільки об'єм речовини, особливо газів, сут-

тєво залежить від температури та тиску. Тому при вимірюванні об'ємної витрати газів її приводять

до нормальних умов (20 °C та 101,325 кПа). Отже, маємо формулу розрахунку масової витрати у вигляді [10]:

$$Q_m = C\varepsilon \frac{\pi}{4} d^2 \frac{\sqrt{2\Delta p\rho}}{\sqrt{1-\beta^4}},$$

де  $C$  – коефіцієнт витрати;  $\varepsilon$  – коефіцієнт стискуваності;  $d$  – діаметр звужувального пристрою, м;  $\Delta p$  – різниця тисків, Па;  $\beta = \frac{d}{D}$  – коефіцієнт відношення діаметра отвору звужувального пристрою до діаметра трубопроводу.

Ця формула застосовується для всіх стандартних видів звужувальних пристроїв, відрізняється тільки розрахунок коефіцієнтів витрати та стискуваності. Коефіцієнт витрати (необхідний для визначення витрати), розраховується з тієї ж витрати, тому шляхом експериментів були виведені формули та таблиці для спрощення обчислень.

#### Параметри первинного перетворювача.

Вхідними параметрами є:

- Параметри трубопроводу:
  - діаметр;
- Параметри середовища:
  - густина;
  - в'язкість;
- Номінальна витрата,
- Вид звужувального пристрою.

Вихідні геометричні параметри для кожного звужувального пристрою є різними, і наведені у ISO 5167 [10, 11].

Для прикладу розглянемо геометричні стандарти для діафрагми з камерами відбору тиску, що показана на рис. 8 [11], при цьому потік спрямований зліва направо.

Вхідним параметром для розрахунків є діаметр трубопроводу  $D$ . Також потрібно знати різницю тисків за нормальних умов або номінальну витрату, густину і в'язкість вимірюваного середовища. Знаючи ці параметри, за умови використання відповідних формул потрібно розрахувати розмір отвору звужувального пристрою, а на його основі – коефіцієнт  $\beta$ . Після цього ми стикаємось з першим обмеженням, а саме, для такого звужувального пристрою мінімальний діаметр отвору становить 12,5 мм, а коефіцієнт  $\beta$  повинен бути в межах від 0,1 до 0,75.

Якщо один або обидва параметри вийшли за межі, є декілька опцій:

- 1) обрати інший діаметр трубопроводу;
- 2) змінити номінальну витрату (або різницю тисків за нормальних умов);
- 3) змінити вид звужувального пристрою.

Далі обираємо довжину циліндричної частини -  $e$ , вона повинна бути в межах від  $0,005D$  до  $0,02D$ , після чого можна вибрати товщину діафрагми -  $E$ , яка повинна знаходитись в діапазоні від  $e$

до  $0,05D$ . Наступним кроком обираємо кут вихідної поверхні  $\alpha$  від  $30^\circ$  до  $60^\circ$  та вимогу до гостроти передньої кромки  $G$  - менше за  $0,0004d$ .

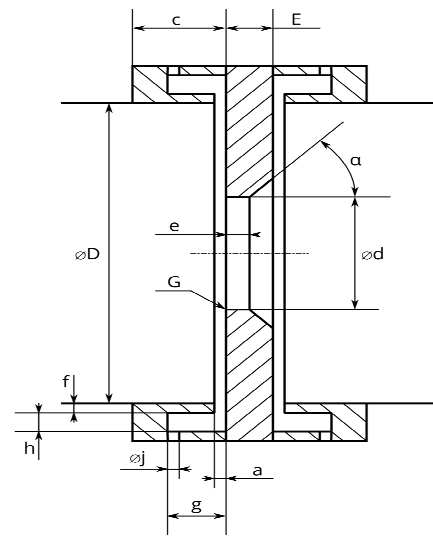


Рис. 8. Схема з розмірами стандартної діафрагми з камерами відбору тиску, де:  $D$  – діаметр трубопроводу,  $E$  – товщина діафрагми,  $\alpha$  – кут нахилу вихідної частини діафрагми,  $e$  – товщина циліндричної частини діафрагми,  $G$  – максимальний радіус вхідної кромки,  $d$  – діаметр звужувального пристрою,  $c$  – довжина корпусу камери усереднення,  $f$  – глибина щілини,  $a$  – розмір щілини,  $h$  та  $g$  – розміри камери усереднення,  $j$  – діаметр отвору в камері для передавання тиску на вимірювальний пристрій

На цьому етапі діафрагма повністю розрахована, можна переходити до тиск-відбірних фланців.

Перш за все визначаємо ширину кільцевих отворів ( $a$ ), яка становить:

при  $\beta \leq 0,65$ : від  $0,005D$  до  $0,03D$ , а при  $\beta > 0,65$ : від  $0,01D$  до  $0,02D$ , але не менше 1 мм і не більше 10 мм.

Наступним кроком визначаємо ширину фланця ( $c$ ), яка має бути меншою за  $0,5D$ . Після цього знаходимо розміри стінки камери ( $f$ ), яка повинна бути більшою за  $2a$ . Розміри камери відповідають співвідношенню

$$g \cdot h \geq \frac{f \cdot a}{2}.$$

Залишилось тільки призначити діаметр трубки передачі тиску ( $j$ ) в межах від 4 до 10 мм.

Як видно, це не дуже складний, але трудомісткий процес, і задля його спрощення було розроблено відповідне програмне забезпечення.

#### Особливості програмного забезпечення проектування витратомірів.

Програмне забезпечення розроблено мовою програмування C# з використанням API WinForms,

що дозволило досить легко втілити його в зручно-му графічному інтерфейсі.

Інтерфейс програми складається з двох основних частин, розділених по вертикалі (рис. 9). В лівій частині інтерфейсу в основному вибираються

параметри та задаються їхні значення, а в правій частині інтерфейсу схематично зображується зву-жувальний пристрій з відповідними геометричними розмірами.

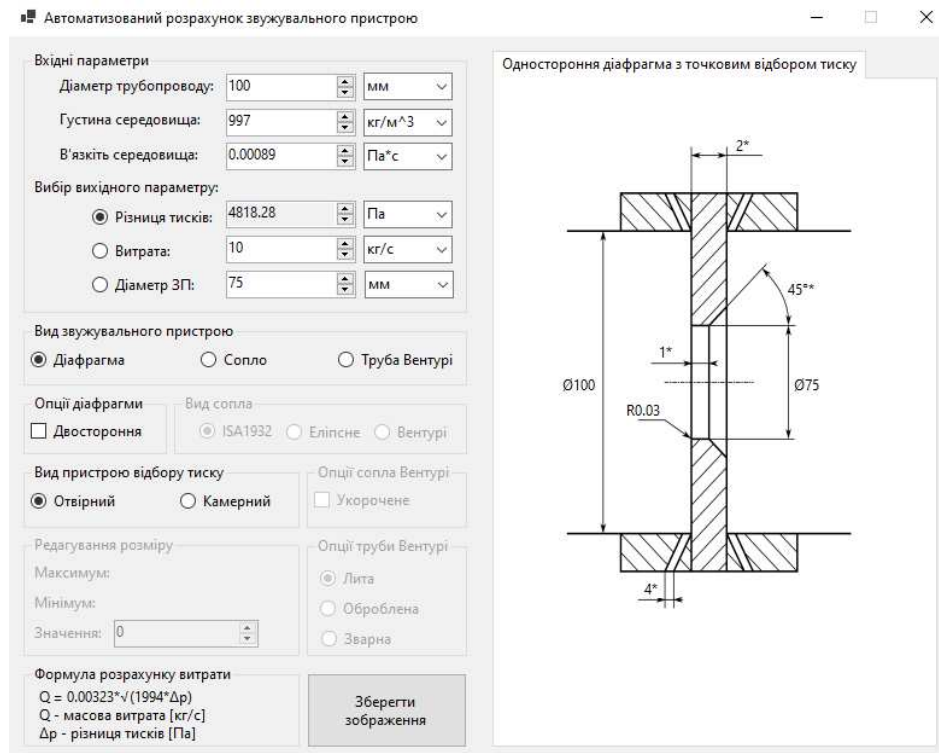


Рис. 9. Інтерфейс програмного забезпечення автоматизованого розрахунку витратомірів змінного перепаду тиску

Розглянемо детальніше ліву частину. Вона поділена на декілька секцій: вхідні параметри, вибір вихідного параметру, вид звукувального пристрою, опції діафрагми, вид сопла, вид пристрою відбору тиску, опції сопла Вентурі, опції труби Вентурі, редагування розміру, формула розрахунку витрати.

Секція вхідних параметрів дозволяє обрати величини та відповідні їм одиниці вимірювання для діаметра трубопроводу, густини та в'язкості середовища.

Секція вибору вихідного параметра пропонує обрати один з вихідних параметрів, який буде розраховано відносно інших параметрів. Це може бути різниця тисків, витрата або діаметр звукувального пристрою. При виборі вихідного параметра поле введення його значення блокується, а інші два параметри потребують введення. При цьому, якщо назва вихідного параметра відображена червоним кольором, це означає, що програма визначила некоректність введених даних.

Нижче розташовано секції вибору звукувального пристрою. Це може бути діафрагма, сопло або труба Вентурі. При виборі певного пристрою відкривається можливість застосувати додаткові

опції. Зокрема, для діафрагми - це вибір одно- чи двосторонньої, для сопла - стандарт його форми (ISA1932, еліпсне, Вентурі або укорочене Вентурі), для труби Вентурі - технологія виготовлення: лиття (без обробки), лиття з обробкою, зварна.

Також для діафрагм та сопел є можливість обрати вид пристрою відбору тиску: отвірний або камерний. При виборі певного виду пристрою та його опцій відповідним чином змінюється схематичне зображення в правій частині програмного інтерфейсу.

Секція редагування розміру надає можливість корегувати деякі розміри. Для цього на схематичному зображенні потрібно натиснути на одному з відповідних розмірів (позначені зірочкою), тоді значення цього розміру та його границі скопіюються в секцію редагування, після чого значення можна скоригувати, що призведе до відповідної зміни на схемі.

В нижній частині розташована секція з виведеною формулою розрахунку витрати та кнопка, при натисканні якої схематичне зображення звукувального пристрою збережеться для зручного подальшого використання.

На рис. 10 наведено приклад розрахунку різниці тисків для сопла виду ISA1932 з діаметром трубопроводу 125 мм, вимірюваним середовищем

– водою (за нормальних умов), діаметром звукувального пристрою 60 мм, за масової витрати 15 кг/с.

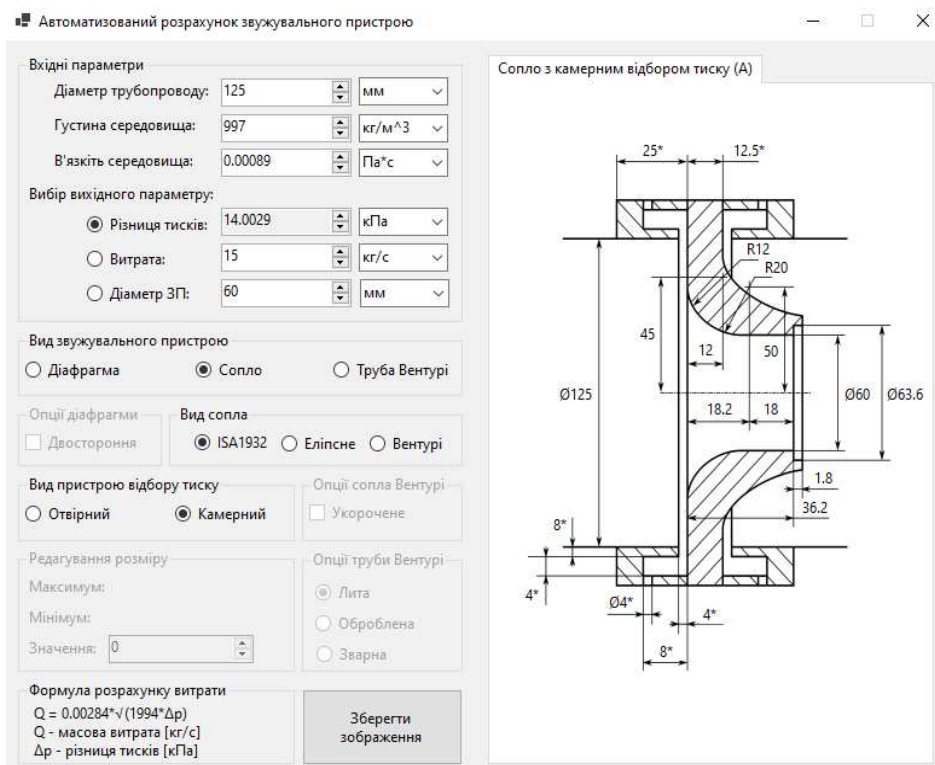


Рис. 10. Приклад автоматизованого розрахунку сопла (ISA1932) з камерним відбором тиску

### Висновки

В ході даної роботи проаналізовано сучасні стандарти створення витратомірів змінного перепаду тиску, вибрані та розглянуті математичні моделі, які дозволили успішно розробити програмне забезпечення для автоматизованого проектування витратомірів із зручним графічним інтерфейсом.

Результати цього проекту продемонстрували, що перспективними напрямами подальших досліджень слід вважати:

- розрахунково-експериментальне уточнення характеристик витратомірів змінного перепаду тиску для підвищення точності автоматизованого проектування;
- розширення можливостей програмного забезпечення за рахунок проектування калориметричних, ультразвукових витратомірів та ротаметрів;
- створення програмного комплексу для підбору найбільш оптимального методу вимірювання витрати на основі заданих параметрів вимірюваного середовища, діаметра трубопроводу та діапазону витрат;
- здійснення метрологічного контролю і нагляду за подібними комплексами, а також розробка і атестація методик виконання вимірювання витрат рідин і газів на базі таких комплексів.

### Література

- [1] Pipe flow calculators (2021). Режим доступу: <https://www.pipeflowcalculations.com/index.xhtml>
- [2] Arian Iso5167 Flow Cad V2. Режим доступу: <http://www.arian.cl/ingles/support.htm>
- [3] TNflow (2011). Режим доступу: <http://www.uktn.com/tnflowe.html>
- [4] Daniel Orifice Plate Flow Calculator 3.0 (2008). Режим доступу: <https://daniel-orifice-flow-calculator.software.informer.com/>
- [5] American Society of Mechanical Engineers. Fluid Meters: Their Theory and Application. 6th ed. New York: ASME RCFM; 1971.
- [6] E. L. Upp, Paul J. LaNasa, *Fluid flow measurement: a practical guide to accurate flow measurement*. Second edition. Houston, TX, USA, 2002. DOI: 10.1016/B978-0-88415-758-8.X5000-5
- [7] С. П. Пістун, Л. В. Лесовой Нормування витратомірів змінного перепаду тиску. Видавництво ЗАТ „Інститут енергоаудиту та обліку енергоносіїв”, Львів, 2006.
- [8] D. W. Spitzer. *Industrial Flow Measurement*, 2nd ed., Research Triangle Park, NC: ISA, 1990.
- [9] Emerson Automation Solutions, *The Engineer’s Guide to DP Flow Measurement*. Shakopee, MN, USA, 2020.

[10] ISO 5167-1:2022. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 1: General principles and requirements, 2022.

[11] ISO 5167-2:2022. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full – Part 2: Orifice plates, 2022.

УДК 681.121.842

**Kostyantyn Kolomiets, Iryna Gryshanova**

*National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, Ukraine*

#### SOFTWARE DEVELOPMENT FOR AUTOMATED DESIGN OF FLOW METERS

This work presents the development of a software complex for the automated design of variable pressure drop flowmeters. It includes flowmeters with standard primary devices, namely a diaphragm, nozzles and a venturi tube. To fulfill the task, a review of various software solutions has been conducted. As a result, it was concluded that the existing software does not fully solve the task, because it does not calculate most of the design parameters for metering device. The next stage was a review of the flow rate measuring method by variable pressure drop, and based on it, a mathematical model of flow meters has been implemented taking into account the existing standards. Next, the initial geometric parameters of the flow meter were evaluated and the parameter selection algorithm for the diaphragm with pressure taking chambers was given.

As a result of the performed analysis, developed software allows you to conveniently enter input parameters, such as flowrate, pressure drop, pipeline diameter, type of constriction device, method of pressure selection, and at the output receive a corresponding schematic image of the flowmeter with all design parameters and the flow calculation formula, based on the pressure difference. For a better understanding of the software operation, an overview of it was offered and an example of a nozzle calculation has been demonstrated.

The implementation of the created software application makes it possible to increase the accuracy of the accounting of consumed resources, and also reduces time and money costs for measuring instrument development.

In the future, it is planned to create the software complex by adding to it the design capabilities of calorimetric, ultrasonic flowmeters and rotameters, as well as special software for selecting the most optimal flow measurement method based on the specified parameters of the measured medium, pipeline diameter and flow measurement range.

Therefore, it will be possible to carry out metrological control and supervision of such measuring complexes, develop and certify methods for measuring the flow of liquids and gases.

**Key words:** automation; design; flow meter; software complex.

*Надійшла до редакції  
02 листопада 2022 року*

*Рецензовано  
29 листопада 2022 року*



© 2022 Copyright for this paper by its authors.  
Use permitted under Creative Commons License Attribution 4.0 International (CC BY 4.0).