

## ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ АПАРАТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ПРИНЦИПІ РУХОМОГО ПОТОКУ РІДИНИ АБО ГАЗУ

Бойко В. С., к.т.н.,

ORCID: 0000-0003-1530-4368

Тарасенко В. Г., к.т.н.

ORCID: 0000-0002-0275-0281

*Таврійський державний агротехнологічний університет*

*імені Дмитра Моторного*

Тел. (0619) 42-13-06

*Постановка проблеми.* Кожній конструкторській розробці передуює теоретичне дослідження процесу, на якому заснована робота створюваного апарату. Іноді доводиться дивуватися, на якому простому принципі гідродинаміки або теплопередачі працюють дуже складні апарати.

Особливо важливо, щоб при навчанні студентів, елементи теорії досліджуваного процесу, які викладаються, завжди були підкріплені практичним застосуванням. Це відповідає більш повному розумінню значущості теоретичних основ, необхідності засвоєння цього матеріалу і не призводить до відторгнення або зниження інтересу до теоретичних основ, як обґрунтованій, автономній частини матеріалу, який викладається.

*Аналіз останніх досліджень.* Розглянемо один з гідродинамічних процесів – течія рідини по трубопроводу з різним діаметром труб з чисто теоретичних позицій.

Потік ідеальної рідини рухається в трубопроводі змінного перетину (рис.1). В перетинах 1-1 і 2-2 нівелірні висоти дорівнюватимуть відповідно  $z_1$  і  $z_3$ , а площі поперечних перетинів  $f_1$  і  $f_2$ . Геометричні напори  $z_1$  і  $z_2$  будуть рівні ( $z_1 = z_2$ ), тому що вісь трубопроводу встановлена строго паралельно горизонтальній площині порівняння 0-0 [1].

Встановимо в перетинах 1-1 і 2-2 п'езометричні трубки і трубки Піто. Як відомо, за допомогою п'езометричних трубок вимірюють статичний напір, а трубками Піто, які представляють собою п'езометричні трубки з загнутим нижнім кінцем назустріч потоку рідини, вимірюють повний гідродинамічний напір [2].

Різниця висот, вимірюваних трубками Піто і звичайною п'езометричною трубкою дорівнює  $h_\omega = \omega^2/2g$ , представляє собою висоту, відповідну швидкісному напору.

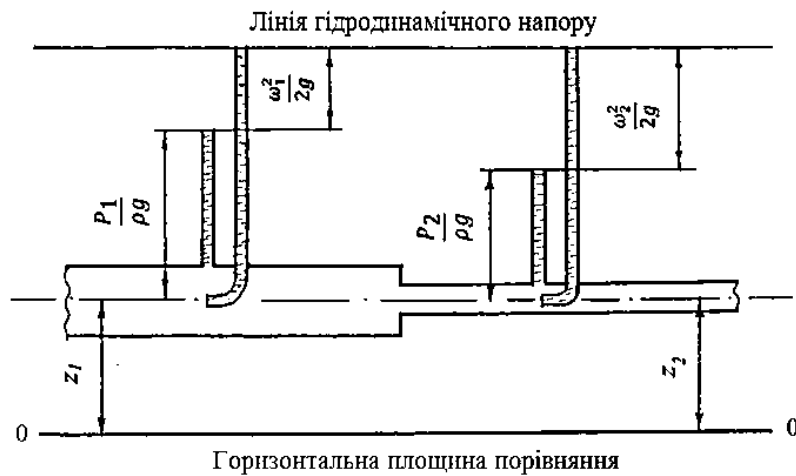


Рис.1. Схема напорів в потоці ідеальної рідини.

*Формулювання цілей статті (постановка завдання).* Основне завдання, яке ми повинні вирішити – теоретичним шляхом визначити зміну тиску в трубах з різною площею поперечного перерізу  $f$  при різних швидкостях руху рідини.

*Основна частина.* Скористаємося рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини:

$$z_1 + \frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha \omega_1^2}{2g} = z_2 + \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha \omega_2^2}{2g} + h_{\text{п}} \quad (1)$$

Всі доданки рівняння мають розмірність довжини:  $z$  – геометрична (геодезична нівелірна) висота;  $P/\rho g$  – п'єзометрична висота;  $\omega^2/2g$  – швидкісна (динамічна) висота;  $h_n$  – висота втрат енергії (напору).

Дані величини можуть мати інші назви:  $z$  – геометричний напір;  $P/\rho g$  – п'єзометричний напір;  $\omega^2/2g$  – швидкісний напір.

Через те, що труба розташована горизонтально  $z_1 = z_2$ . Відстань між перерізами 1 і 2 порівняно невелика, тому втратами енергії на тертя  $h_n$  можна знехтувати. Вважаємо сталою рівномірну течію рідини в трубі і приймаємо  $\alpha = 1$ . Тоді рівняння Бернуллі прийме вигляд:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (2)$$

Скористаємося рівнянням нерозривності потоку:

$$\omega_1 \cdot f_1 = \omega_2 \cdot f_2 \quad (3)$$

Виразимо швидкість  $\omega_1$  в перерізі 1-1 через швидкість  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = \omega_2 \frac{f_2}{f_1} \quad (4)$$

Підставимо значення  $\omega_1$  в рівняння (2):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g} \quad (5)$$

Перегрупуємо рівняння (5):

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\omega_1^2}{2g} \cdot \frac{f_2^2}{f_1^2} = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{\omega_2^2}{2g}$$

або

$$\frac{P_1 - P_2}{\rho g} = \frac{\omega_2^2}{2g} \cdot \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right) \rightarrow \quad (6)$$

Помножимо ліву і праву частини рівняння (6) на  $\rho \cdot g$ :

$$\frac{(P_1 - P_2) \cdot \rho g}{\rho g} = \frac{\omega_2^2 \cdot \rho g}{2g} \cdot \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right).$$

Скоротивши однакові множники, отримаємо рівняння:

$$P_1 - P_2 = \frac{\omega_2^2 \cdot \rho}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right). \quad (7)$$

З рівняння (7) визначимо тиск рідини в трубі з площею поперечного перетину  $f_2$  (перетин 2 - 2).

$$-P_2 = -P_1 + \frac{\omega_2^2 \cdot \rho}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right).$$

Помноживши праву і ліву частину рівняння на  $-1$ , отримаємо необхідне нам рівняння:

$$P_2 = P_1 - \frac{\omega_2^2 \cdot \rho}{2} \cdot \left(1 - \frac{f_2^2}{f_1^2}\right). \quad (8)$$

де  $P_1$  і  $P_2$  – тиск рідини в перетинах 1-1 і 2-2;  $\omega$  – лінійна швидкість потоку в трубі;  $\rho$  – щільність рідини;  $g$  – прискорення вільного падіння.

В рівнянні (8) параметри  $\rho$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  для даного випадку постійні, тому тиск в малому перерізі труби  $P_2$  повністю залежить від квадрату швидкості  $\omega_2^2$  руху потоку перерізі 2-2. Чим вище швидкість  $\omega_2$ , тим менше тиск  $P_2$  в даному перерізі і може настати такий момент, коли тиск стане рівним нулю або опуститься нижче атмосферного. При зменшенні труби в 1,5 рази, в порівнянні з діаметром перерізу 1-1, живий переріз зменшиться у 2,25 рази, а висота динамічного напору збільшиться майже в 5 разів. Це збільшення динамічного напору компенсується зменшенням п'єзометричного напору, який в стисненому перерізі може мати, як уже було сказано, негативний знак.

Негативний п'єзометричний тиск – це тиск нижче атмосферного, тобто в перерізі 2-2 утворився вакуум і рідина в звичайному п'єзометрі не тільки не піднімається, але навпаки, через трубку в перерізі 2-2 буде засмоктуватися атмосферне повітря. Щоб цього не сталося, п'єзометр слід повернути вниз і до нижнього кінця його піднести стакан з рідиною (рис. 2). Тепер рідина встановиться на висоті, відповідній  $P_2/\rho g$ . Відкладаючи динамічний напір  $\omega_2^2/2g$  в перерізі 2-2 в масштабі креслення, ми бачимо, що висота динамічного напору і геометрична висота  $z_2$  частково накладаються одна на іншу. Це означає, що рівняння Бернуллі геометрично справедливо, якщо п'єзометричний напір  $P_2/\rho g$  має негативний знак, а величина його відповідає довжині відрізка, на якому відбувається накладання  $\omega_2^2/2g$ .

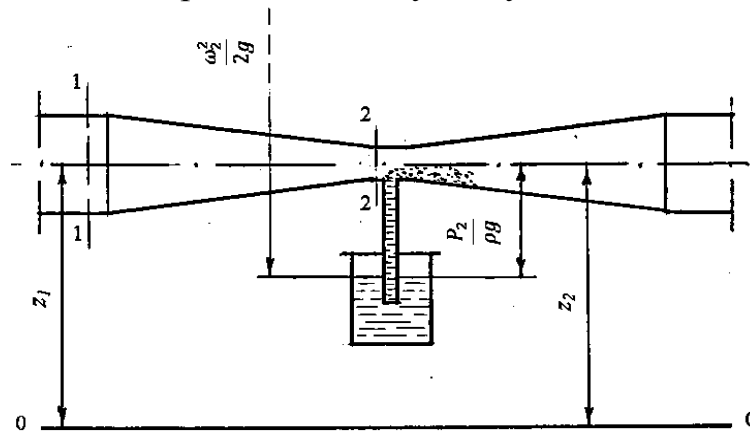


Рис. 2. Принцип роботи струминного насоса.

Якщо до кінця п'єзометра піднести склянку з рідиною таким чином, як це показано на рис. 2, рідина зі склянки буде засмоктуватися до перерізу 2-2 і далі транспортуватися по трубі разом з рештою рідини. У цьому полягає принцип роботи струминних насосів, пульверизаторів, карбюраторів автомобілів, інжекторних і ежекторних насосів, наприклад, ежекторного пристрою, змонтованого на вихлопній системі трактора, для створення вакууму у висівних апаратах сівалок. Пристрій зі стисненим перерізом буде працювати, якщо по трубі рухається повітря, газ або пар. Засмоктуватися по нижній трубці також може будь-яке з цих середовищ.

Широке поширення даний принцип отримав при вимірюванні параметрів рідини, що рухається – швидкості руху і витрати рідини.

Для вимірювання локальних швидкостей в закритих каналах, рух рідини в яких називають напірним, використовуються трубка Піто – Прандтля, яка являє собою комбінацію трубки Піто і п'єзометра (рис.1), які зазвичай об'єднуються в одну конструкцію.

Трубка Піто-Прандтля вводиться в точку потоку таким чином, щоб відкритий кінець трубки Піто був спрямований перпендикулярно до вектора швидкості, а відкритий кінець п'єзометра – по дотичній. Оскільки рідина проковзує близько вхідного перерізу п'єзометра не

загальмовуючись, то в ньому буде діяти такий же тиск, як і в рідині, що рухається.

Локальну швидкість знаходимо за формулою:

$$u = \sqrt{2gh} \quad (9)$$

де  $h$  – різниця рівнів рідини в трубці Піто і в п'єзометрі.

Для безпосереднього вимірювання витрати рідини велике поширення в практиці знайшли витратомір Вентурі і мірні діафрагми, які працюють за таким же принципом.

Витратомір Вентурі (рис. 3) має великі переваги за рахунок простоти конструкції і відсутності будь-яких рухомих частин. Він може бути розташований горизонтально, вертикально і під будь-яким кутом, що принципово значення не має.

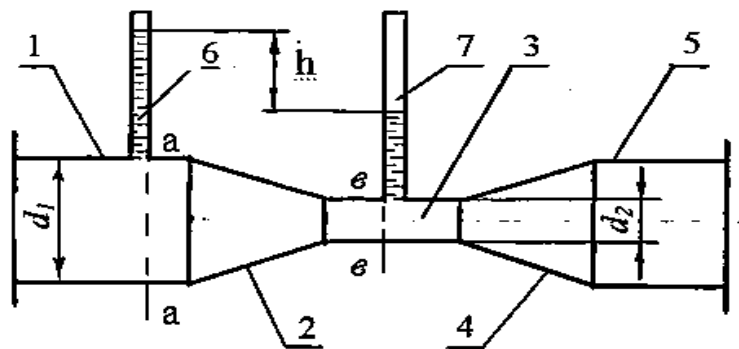


Рис. 3. Витратомір Вентурі.

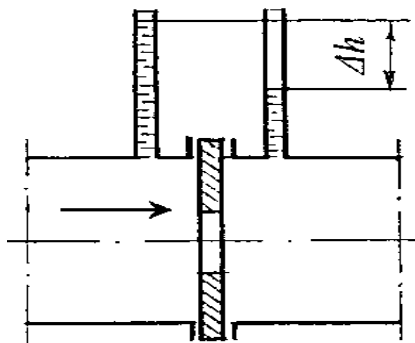


Рис. 4. Мірна діафрагма.

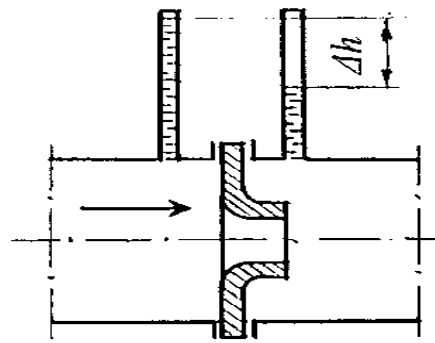


Рис. 5. Мірне скло.

Витратомір з горизонтальною віссю складається з двох циліндричних труб 1 і 5 діаметром  $d_1$ , сполучених за допомогою двох конічних ділянок (патрубок) 2 і 4 з циліндричною вставкою 3 меншого діаметра  $d_2$ . В перерізах  $a-a$  і  $в-в$  до витратоміра приєднані п'єзометри 6 і 7, різницю рівнів рідини в яких показує різниця тисків в цих перерізах. Витрата рідини розраховується за рівнянням:

$$W = K\sqrt{\Delta h}, \quad (10)$$

$$\text{де } K - \text{постійна витратоміра; } K = \frac{\pi d^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2g}{(d_1^4/d_2^4)-1}};$$

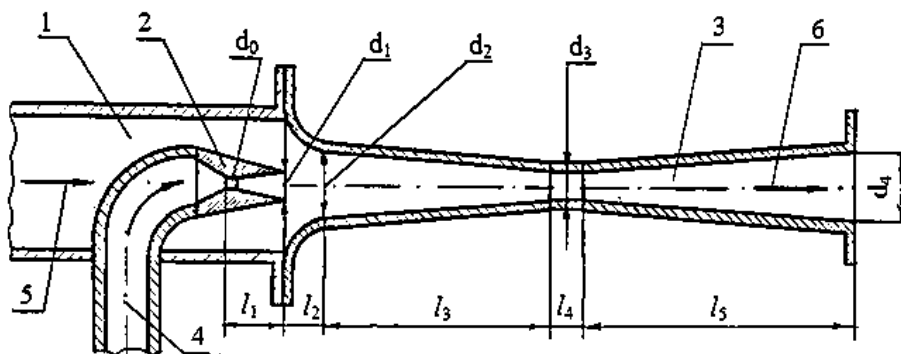
$\Delta h = \frac{P_1}{\rho g} - \frac{P_2}{\rho g}$  – різниця п'єзометричних напорів в перетинах *a-a* і *в-в*.

Найбільш простий звужуючий пристрій – мірна діафрагма (рис. 4). Вона зазвичай виконана у вигляді тонкого диска з отвором, центр якого збігається з віссю труби і діаметром  $d_2$  менше діаметра труби  $d_1$ . Краї отвору найчастіше мають гострі входні кромки або закруглюються за формою струменя рідини, що випливає в отвір. Для вимірювання перепаду тиску до і після діафрагми зазвичай використовують дифманометри [3].

Мірне сопло (рис. 5) мало відрізняється від діафрагми, але характеризується меншим гідравлічним опором. Формули, отримані для витратоміра Вентурі справедливі і для діафрагм. Витрата  $w$  визначається за формулою (10), а коефіцієнт  $K$  знаходять дослідним шляхом для кожного типу діафрагми окремо.

Для відведення повітря з конденсаторів, створення вакууму у випарних установках, в ежекторних холодильних машинах застосовуються головним чином пароструминні апарати – ежектори, для термокомпресії вторинних парів – інжектори. Істотної різниці в будові та принцип дії вони не мають, тільки інжектор призначений для нагнітання, а ежектори – для відсмоктування.

Пристрій інжектора приведена на рис. 6.



1 – всмоктуючий паропровід; 2 – сопло; 3 – дифузор; 4 – патрубок входу робочої пари; 5 – вхід вторинної пари; 6 – вихід стисненої пари.

Рис. 6. Пароструминний термокомпресор.

Гостра пара в паровому соплі адіабатично розширюється, і пара виходить з сопла зі швидкістю, яка перевищує швидкість звуку. Струмień пари, що рухається з такою швидкістю, має велике поверхневе тертя, тому захоплює вторинні пари, що обумовлює його всмоктування. В камері змішування гостра пара не перемішується з вторинною парою. Швидкість руху різко знижується, і суміш

надходить в дифузор (камеру стиснення), де тиск суміші підвищується.

Основною характеристикою пароструминних термокомпресорів (інжекторів) є коефіцієнт інжекції і ККД. Коефіцієнт інжекції  $I$  показує, яка кількість вторинної пари або повітря засмоктується на кожен кілограм гострої пари, тобто

$$I = D_v/D_o, \quad (11)$$

де  $D_v$  – масова кількість вторинної пари, кг;  $D_o$  – кількість гострої пари, кг.

Коефіцієнт корисної дії  $\eta$  інжектора обчислюється за формулою

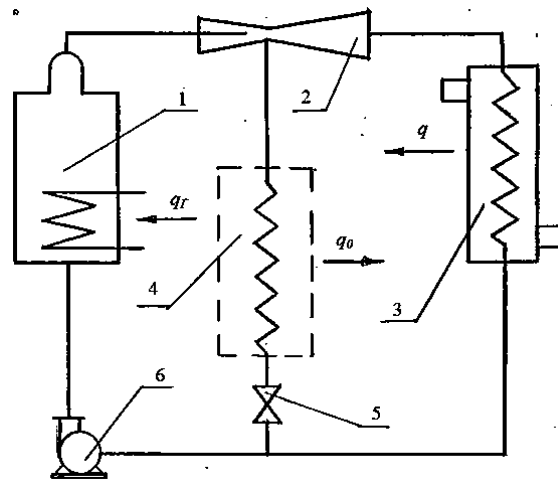
$$\eta = \frac{0,56}{I + 1}.$$

Пароструминні інжектори працюють в складі однокорпусних вакуум-випарних установок, які використовуються для виробництва згущеного молока з цукром або для попереднього згущення молока перед сушінням. В цих двох інжекторах підігрівається і нагнітається вторинна пара, яка в подальшому використовується в якості нагрівальної пари в калоризаторах (нагрівальних камерах). Зазвичай другий термокомпресор вводять в роботу в другій половині процесу згущення, коли кількість вторинної пари починає зменшуватися.

У випарних вакуум-апаратах роторного типу, які використовуються для випарювання нестійких до підвищених температур в'язких і пастоподібних розчинів, для створення вакууму в нагрівальній камері та підтримання його в процесі роботи, служать двоступеневі пароструминні вакуум-насоси, які складаються з двох ежекторів. На інжектори пара надходить з надлишковим тиском не менше 0,8 МПа (витрата 100 кг/год) [4, 5].

Пароежекторні холодильні машини (рис. 7) працюють з холодильним агентом, в якості якого зазвичай використовують воду, яка має більшу приховану теплоту пароутворення [6]. Щоб знизити температуру кипіння води у випарнику, необхідно створити вакуум. В пароежекторних холодильних машинах вакуум створюється пароструменевим вакуум-насосом – ежектором [7].

Робоча пара, яка утворилася в парогенераторі, куди підводиться теплота  $q_2$ , під тиском подається в ежектор [8]. З ежектора суміш, яка має тиск нижче атмосферного, надходить в конденсатор. В конденсаторі в результаті відведення тепла  $q$  пари конденсуються в умовах вакууму. Цей вакуум підтримується ежектором, який відсмоктує пари з випарника [9, 10].



1 – парогенератор; 2 – ежектор; 3 – конденсатор; 4 – випарник;  
5 – регулюючий вентиль; 6 – насос.

Рис. 7. Схема паро ежекторної холодильної машини.

Переваги пароежекторних пристроїв – їхня повна безпека і простота будови.

*Висновки.* Теоретичне обґрунтування руху потоку рідини або газу дає широкі можливості для конструювання апаратів і пристроїв зі стисненим перетином. За допомогою теоретичних досліджень, знаючи граничні можливості основних робочих параметрів процесу, можна значно розсунути граничні можливості пристроїв, які конструюються.

Наведені схеми приладів і пристроїв, які працюють за даним принципом, підтверджують простоту їх будови, безпеку роботи та економічну ефективність.

#### Література:

1. Обладнання підприємств переробної і харчової промисловості / І. С. Гулий та ін. За ред. І. С. Гулого. Вінниця; Нова книга. 2001. 576с.
2. Механізація переробки і зберігання плодоовочевої продукції : навч. посібник. / О. В. Дацишин та ін. За ред. О. В. Дацишина. К.: Мета, 2003. 288с.
3. Мирончук В. Г. Розрахунки обладнання підприємств переробної та харчової промисловості. Вінниця: Нова книга, 2004. 288 с.
4. Шалугін В. С., Шмандій В. М. Процеси та апарати промислових технологій. Київ: Центр учбової літератури., 2008. 392 с.
5. Плаксин Ю.М., Малахов Н.Н., Ларин В.А. Процессы и аппараты пищевых производств. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Колос, 2007. 760 с.



6. Остриков А.Н., Абрамов О.В. Расчет и конструирование машин и аппаратов пищевых производств. Учебник для вузов, СПб.; ГИОРД, 2003. 352с.

7. Процеси і апарати харчових виробництв : лабораторний практикум : навч. посібник. / О. І. Черевко та ін. ; Харків : Світ Книг, 2013. 168 с.

8. Стабников В. Н., Лысянский В. М., Попов В. Д. Процессы и аппараты пищевых производств : учебник. 3-е изд., испр. и доп. М. : Пищевая промышленность, 1976. 663 с.

9. Процеси та апарати харчових виробництв : підручник / Поперечний А. М., Черевко О. І., Гаркуша В. Б., Кирпиченко Н. В. ; за ред. А. М. Поперечного. К. : Центр учбової літератури, 2007. 304 с.

10. Малежик І. Ф. Процеси і апарати харчових виробництв: лабораторний практикум. За ред. І. Ф. Малежика. К. : НУХТ, 2006. 224 с.

## **ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЙ АПАРАТІВ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ НА ПРИНЦИПІ РУХОМОГО ПОТОКУ РІДИНИ АБО ГАЗУ**

Бойко В. С., Тарасенко В. Г.

### **Анотація**

У статті розглянуті елементи теорії досліджуваних процесів в термодинаміці. Досліджений один з гідродинамічних процесів – течія рідини по трубопроводу з різним діаметром труб з теоретичних позицій. Представлена схема напорів в потоці ідеальної рідини. Основне завдання, вирішене в даній статті – визначення теоретичним шляхом зміни тиску в трубах з різною площею поперечного перерізу при різних швидкостях руху рідини. Теоретичне обґрунтування руху потоку рідини або газу дає широкі можливості для конструювання апаратів і пристроїв зі стисненим перетином. За допомогою теоретичних досліджень, знаючи граничні можливості основних робочих параметрів процесу, можна значно розсунути граничні можливості пристроїв, які конструюються. Наведені схеми приладів і пристроїв, які працюють за даним принципом, підтверджують простоту їх будови, безпеку роботи та економічну ефективність.

**Ключові слова:** гідродинамічний процес, потік рідини, швидкість руху, обґрунтування, паро ежекторний пристрій, парогенератор, термокомпресор.

## **ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ АППАРАТОВ, РАБОТАЮЩИХ НА ПРИНЦИПЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ПОТОКА ЖИДКОСТИ ИЛИ ГАЗА**

Бойко В. С., Тарасенко В. Г.

### **Аннотация**

В статье рассмотрены элементы теории исследуемых процессов в термодинамике. Исследован гидродинамический процесс – течение жидкости по трубопроводу с различным диаметром труб. Представлена схема напорів в потоке

идеальной жидкости. Решена задача определения теоретическим путем изменения давления в трубах с разной площадью поперечного сечения при различных скоростях движения жидкости. В статье использовано уравнение Бернулли для потока реальной жидкости. Уравнение Бернулли геометрически справедливо, если пьезометрический напор имеет отрицательный знак, а величина его соответствует длине отрезка, на котором происходит наложение. Теоретическое обоснование движения потока жидкости или газа дает широкие возможности для конструирования аппаратов и устройств со сжатым сечением. Приведенные схемы приборов и устройств, работающих по данному принципу, подтверждают простоту устройства, безопасность работы и экономическую эффективность.

**Ключевые слова:** гидродинамический процесс, поток жидкости, скорость движения, обоснование, парожеторное устройство, парогенератор, термокомпрессор.

## **THEORETICAL SUBSTANTIATION OF DESIGNS OF APPARATUS OPERATING ON THE PRINCIPLE OF MOVING FLOW OF A LIQUID OR GAS**

V. Boiko, V. Tarasenko

### **Summary**

The article discusses elements of the theory of the processes under study in thermodynamics. One of the hydrodynamic processes is studied – fluid flow through a pipeline with various pipe diameters from theoretical positions. A diagram of the pressure in the ideal fluid flow is presented. Piezometric tubes measure static pressure, and Pitot tubes, which are piezometric tubes with a bent lower end towards the fluid flow, measure the total hydrodynamic pressure. The main problem solved in this article is to determine theoretically the change in pressure in pipes with different cross-sectional areas at different fluid speeds. A device with a compressed section will work if air, gas or steam moves through the pipe. This principle has become widespread when measuring the parameters of a moving fluid - the speed of movement and fluid flow. For direct measurement of fluid flow rate, a Venturi flow meter and orifice plates, which operate on the same principle, are widely used in practice.. It can be located horizontally, vertically and at any angle. The theoretical rationale for the movement of a fluid or gas stream provides ample opportunity for the design of apparatuses and devices with a compressed section. With the help of theoretical studies, knowing the limit capabilities of the main operating parameters of the process, it is possible to significantly expand the limit capabilities of the constructed devices. The above diagrams of devices and devices operating according to this principle confirm the simplicity of their device, safe operation and economic efficiency.

**Key words:** hydrodynamic process, fluid flow, movement speed, justification, steam ejector device, steam generator, thermocompressor.