

УДК 621.176:631.3

О. В. Коновалов

М. А. Горкуша

аспірант

Житомирський національний агроекологічний університет

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ВИХРОВИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Розглядається сутність ефекту Ранка і основні поняття, необхідні для його вивчення. Проведений огляд основних конструкцій вихрових трубок та технічні рішення, що забезпечують їх енергоефективність. Для підвищення енергоефективності вихрових трубок пропонується використовувати іонізований потік повітря у полі коронного розряду та енергозберігаючі джерела формування вхідного повітряного потоку. Вхідне сопло обладнати циліндричним сповільнювачем швидкості периферійних шарів повітряного потоку, що забезпечить збільшення нерівномірності швидкості шарів потоку на вході у вихрову трубку.

Ключові слова: ефект Ранка, трубка Ранка–Хільша, газовий потік, енергоефективність, іонізований повітряний потік, електрогідравлічний ефект, сповільнювач.

Постановка проблеми

Отримання тепла і холоду з низькими енергозатратами є одною із першочергових задач у промисловості та переробних галузях сільського господарства. До установок, які здатні одночасно виробляти і тепло, і холод, відносяться вихрові теплові насоси. Робота таких пристроїв базується на використанні ефекту Ранка. Вихрові теплові насоси відносяться до насосів типу «повітря – повітря», які, порівняно з геотермальними тепловими насосами, дешевші, але менш енергоефективні. Коефіцієнт трансформації енергії вихрових теплових насосів менший за одиницю, тому необхідно продовжувати наукову роботу, спрямовану на підвищення енергоефективності вихрових трубок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Перші дослідження ефекту Ранка почали проводитися В. С. Мартиновським і В. П. Алексєєвим в Одеському технологічному інституті в 1952 р. Активний розвиток теорії, розробку методів розрахунку і конструювання вихрових труб проводив А. П. Меркулов [1]. За його ініціативою відбулося шість всесоюзних конференцій. У його роботах розглядається можливість застосування вихрових труб для осушення стислих газів. Широко відома книга А. Д. Сулова [2], в якій запропоновані вихрові апарати, застосовувані для охолодження і нагрівання газів, сепарації двофазних середовищ, розділення газових сумішей і вакуумування. А. Ф. Гуцол провів огляд [3], де узагальнив більшість існуючих на той момент теорій. Також він висунув свою теорію, згідно з якою поділ газу у

вихровий трубі відбувається за допомогою мікрооб'ємів із різною кінетичною енергією і швидкістю. Більш швидкий газ буде рухатися на периферію, тоді як більш повільний – накопичуватиметься у центрі. Широко відомі у світі праці А. І. Леонтєва [4], в яких він пропонує своє пояснення процесів, що відбуваються у вихровій трубі. У роботі [5] розглядаються можливості застосування вихрових трубок у сушильних процесах.

Велике дослідження із застосування вихрових трубок для сепарації газів було проведено в Oak Ridge National Laboratory [6]. У роботі [7] дано припущення про виникнення зворотного циклу Карно всередині вихрової трубки. Обширний огляд літератури, спроба модифікувати теорію з [7], а також ряд нових експериментальних даних були отримані у роботі [8].

Мета, завдання і методика досліджень

Мета досліджень полягала у розробленні технічних рішень, впровадження яких дозволить підвищити енергоефективність вихрових теплових насосів.

Об'єкт дослідження – сучасні конструкції вихрових трубок Ранка. Предмет дослідження – технічні рішення, що забезпечують зменшення теплообміну між холодним і теплим вихровим повітряними потоками у трубках Ранка.

Для проведення дослідження використано комплекс методів наукового дослідження: порівняльний, теоретичний та статистичний, системні методи аналізу і синтезу.

Результати досліджень

Для досягнення мети було розглянуто наукові праці зарубіжних та вітчизняних вчених, у тому числі працю доктора технічних наук Гуцоло А. Ф. «Ефект Ранка», яка наразі найбільш достовірно обґрунтовує сутність газотермодинамічних процесів у трубці Ранка та сучасні конструкції вихрових трубок.

Сутність ефекту Ранка полягає у наступному. При русі потоку газу або рідини по плавно заокругленій поверхні трубки, у її зовнішньої стінки утворюється область підвищеного тиску і температури, а біля внутрішньої (або у центрі порожнини, якщо газ закручений по поверхні циліндричної посудини) – область зниженої температури і тиску.

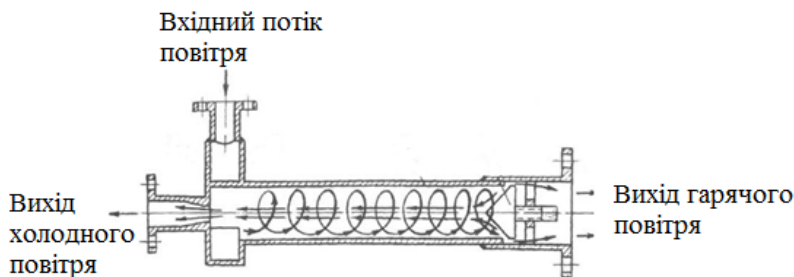


Рис. 1. Формування потоків холодного і гарячого повітря у вихровій трубці

Парадоксальність ефекту Ранка полягає у тому, що відцентрові сили в обертовому потоці спрямовані назовні. Як відомо, тепліші шари газу або рідини мають меншу щільність і повинні підніматися вгору, а в разі відцентрових сил – до центру, більш холодні мають велику щільність і, відповідно, повинні прагнути до периферії. Тим часом, при великій швидкості обертового потоку все відбувається навпаки, а саме – гарячий потік повітря формується біля стінок трубки, а холодний – у приосьовій області. Між гарячим і холодним потоками відбувається в деякій мірі теплообмін, який найбільший біля гарячого кінця трубки. Обертання гарячого і холодного потоків здійснюється у протилежних напрямках.

Вихрові трубки (рис. 2), будують за двома основними схемами: прямоточною і проти точною. Перевага надається проти точним трубкам, бо вони мають більшу ефективність.

Сучасні конструкції вихрових трубок Ранка дозволяють при кімнатній температурі вхідного повітря отримати на виході трубки температуру гарячого потоку до $+300\text{ }^{\circ}\text{C}$ і температуру холодного потоку до $-90\text{ }^{\circ}\text{C}$, при вхідному тиску повітря в межах $0,5\text{--}100\text{ атм}$.

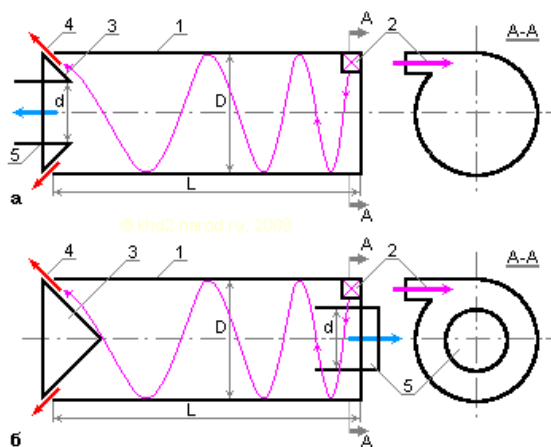


Рис. 2. Класичні схеми прямоточної (а) і проти точної (б) вихрових труб на ефекті Ранка:

1 – гладка циліндрична труба; 2 – вхід газу (завихрювач тангенціального або раєликового типу); 3 – дросель; 4 – вихід гарячого газу через кільцеву щілину; 5 – діафрагма для виходу холодного газу.

На ряду зі значними перевагами, до яких відносяться висока роздільна здатність за температурою вихідних потоків повітря, невеликі габарити, проста конструкція, відсутність рухомих частин і, відповідно, висока надійність, трубка Ранка має недоліки. Оптимальна швидкість повітряного потоку на вході трубки немала – $0,4\text{--}0,5\text{ М}$ (тобто $40\text{--}50\%$ швидкості звуку). З цієї причини, через

практично неминучих при таких швидкостях потужних турбулентностей, пристрій виявляється гучним. Характерно, що як при сильному зменшенні швидкості вхідного потоку, так і при її наближенні до швидкості звуку, ефективність вихрової труби прагне до нуля.

Коефіцієнт енергоефективності трубки, який пропорційний відношенню холодопродуктивності пристрою у кВт до 1 кВт енергозатрат, – низький. У сучасних кондиціонерів парокомпресійного типу на 1 кВт енергозатрат приходить не менше 4-х кВт холодопродуктивності, а у вихрових трубках Ранка класичного виконання на 1 кВт енергозатрат – до 0,4–0,5 кВт холодопродуктивності. Низька енергоефективність сучасних конструкцій вихрових трубок пояснюється, у першу чергу, тим, що ефект Ранка наразі не отримав глибокого теоретичного обґрунтування, запропоновані математичні моделі теплогазодинамічних процесів у трубці не достатньо відображають процес енергетичного розділення газового потоку. Найбільш досконалим поясненням ефекту Ранка є запропонована доктором технічних наук А. Ф. Гуцалом нова гіпотеза, згідно з якою вхідний потік повітря представляє собою сукупність шарів повітря, які рухаються з різними швидкостями, а механізмом, що забезпечує їх розділення, є поле відцентрових сил. А саме, завдяки наявності тертя і турбулентності, як на виході із тангенціального сопла, так і в самій трубці, є елементи потоку, що рухаються з різними швидкостями, тобто вони мають різну кінетичну енергію. Припустимо, що на одному і тому ж радіусі у газі, що обертається (рис. 3), є два мікрооб'єкти,

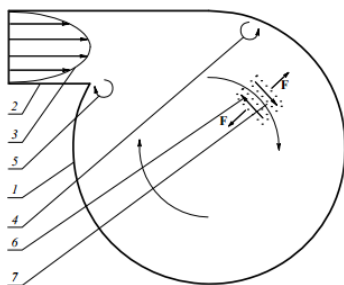


Рис. 3. Формування на вході у вихрову трубу турбулентних елементів і їх поділ у полі відцентрових сил:

1 – стінка труби; 2 – тангенціальне вхідне сопло; 3 – профіль швидкості газу на вході у вихрову трубу; 4 – мікрівихор, що утворюється при взаємодії тангенціального потоку з циліндричною стінкою; 5 – мікрівихор, що утворюється при взаємодії тангенціального потоку з вихровим потоком; 6 – елемент газу з від'ємною пульсацією швидкості; 7 – елемент газу з позитивною пульсацією швидкості; F – результуюча сила.

Один із яких має позитивну пульсацію тангенціальної швидкості, а другий – негативну. Наявність різних тангенціальних швидкостей при одному і тому доцентровому прискоренні призведе до розділення цих елементів, і більш швидкий віддаляється від центра потоку, а більш повільний – зсунеться до центра.

Таким чином периферія потоку буде збагачуватися швидким газом, а центральне ядро – повільним.

У результаті, в центральній області з пониженим статичним тиском збереться загальмований газ, який отримає, у силу низької теплопровідності, практично адіабатичне охолодження, розширюючись в умовах падіння тиску від початкового тиску на вході у трубу до атмосферного.

На периферії швидкий газ отримає часткове гальмування об стінки, що призведе до його нагрівання. Таким чином, причиною енергетичного розділення газу у вихрових трубах є відцентрова сепарація турбулентних елементів за величиною тангенціальної швидкості. Із наведеної гіпотези можна зробити важливий висновок, який пояснює причину виникнення і роль турбулентності в енергетичному розділенні газу. Центральну частину перерізу вихрової трубки займає примусовий вихор, для якого виконується критерій стійкості Релея (1), означає, що виникаючі турбулентності повинні затухати, а не наростати:

$$\frac{d\left(\frac{pv}{r}\right)}{dr} > 0, \quad (1)$$

Високий рівень турбулентності потоку у вихрових трубах, що спостерігається при проведенні експериментів, є наслідком радіального перемішування повільних газових елементів, тобто турбулентність у примусовий вихор привноситься ззовні – з неоднорідного вхідного тангенціального потоку. Зрозуміло, якщо масштаб цієї внесеної турбулентності буде малий порівняно з розмірами системи, то енергетичне розділення відбудеться незначне – повільні елементи потоку розмиються до попадання в центр вихору. Характерні розміри мікрооб’єктів із суттєво різною поступальною швидкістю, які формуються у тангенціальному соплі, визначаються поперечними розмірами цього сопла. Із цих міркувань можна зробити висновок відносно конструкції соплового входу – його розміри повинні бути максимальними. Очевидно, саме з цим пов’язаний той факт, що у більшості конструкцій вихрових труб використовується однозахідний спіральний або тангенціальний завихрювач, розміри сопла якого значні. На температурне розділення впливає не тільки турбулентність вхідного потоку, але і турбулентність, що виникає у самій камері температурного розділення, джерелами якої є зона змішування вхідного потоку з вихровим потоком (рис. 3) і циліндричний прикордонний шар. Турбулентні

збурення із центрального прикордонного шару переносять у холодний центральний потік енергію гарячого периферійного газу, тому необхідно прагнути до зменшення периферійної турбулентності (полірування стінок, обертання камери) або додаткового охолодження циліндричного прикордонного шару (вихрові труби з водяним охолодженням, камери температурного розділення). Негативну роль на температурне розділення відіграють прикордонні шари, що утворюються поблизу циліндричної стінки і, головним чином, поблизу діафрагми і дроселя. По торцевим прикордонним шарам гарячий чи нерозділений газ попадає у центральний зворотній вихор або прямо у діафрагму холодного потоку. Стікання у зворотній вихор гарячого газу вдалося зменшити різними методами. До них можливо віднести збільшення довжини камери температурного розділення до величини, що перевищує довжину зворотнього виходу, хрестовину на осі біля гарячого виходу (рис. 4), яка гальмувала обертання потоку і також призводила до скорочення довжини зворотнього виходу, конічну форму камери температурного розділення (рис. 5), що розширюється у сторону виходу гарячого газу, яка зменшувала радіальний градієнт тиску в районі дроселя.

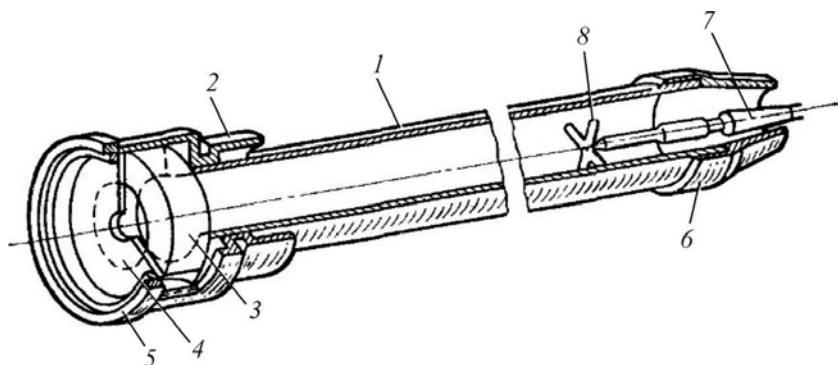


Рис. 4. Вихрова трубка зі штучним гальмуванням вихрового потоку:
1 – камера розділення; 2 – корпус; 3 – ввідний пристрій равликового типу; 4 – діафрагма; 5 – гайка; 6 – сопло; 7 – регулювальна голка; 8 – хрестовина

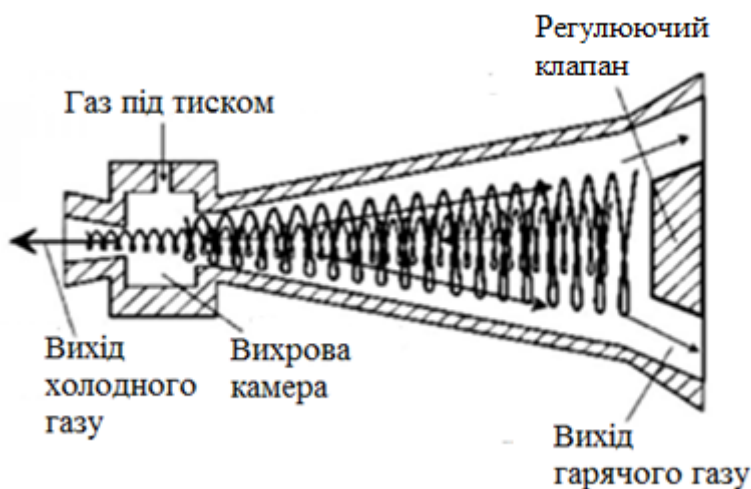


Рис. 5. Конічна вихрова трубка

Холодильний ефект (рис.6) підвищується і у випадку подачі у трубку ще одного потоку повітря з температурою вхідного потоку, але з меншим тиском.

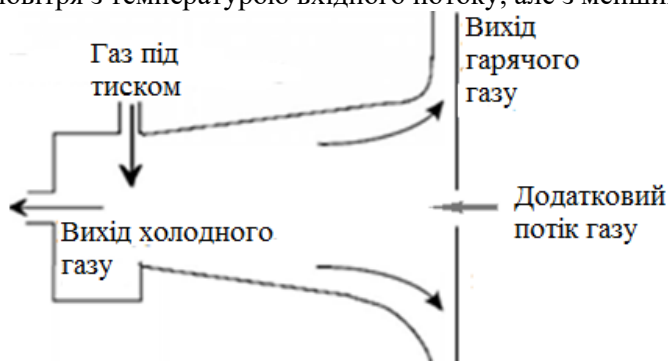


Рис. 6. Вихрова трубка з подачею додаткового повітряного потоку

З пропонуваної гіпотези доктора технічних наук Гуцола А.Ф. можна зробити висновок, що принципіальне покращення характеристик вихрових труб можливе тільки при значній нерівномірності швидкості шарів газового потоку на вході у вихрову трубу. Це можливо досягти обладнанням вхідного патрубку циліндричним сповільнювачем (рис. 7)

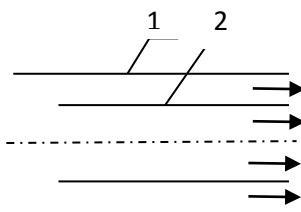


Рис. 7. Вхідний патрубок із циліндричним сповільнювачем:

1– вхідний патрубок; 2– циліндричний сповільнювач

При використанні сповільнювача зростає нерівномірність швидкостей шарів повітря у вхідному потоці газу (рис. 8).

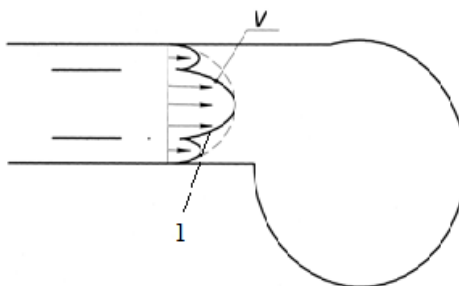


Рис. 8. Формування швидкостей шарів повітря на вході у вихрову трубку, обладнану сповільнювачем:

1 – профіль швидкості газу на вході у вихрову трубку

Висновки та перспективи подальших досліджень

Аналіз стану та перспектив розвитку викладеного матеріалу дає змогу зробити деякі висновки:

Перспективним напрямом скорочення енергозатрат є застосування джерел живлення, що працюють на енергозберігаючих принципах. Доцільно виконати теоретичне обґрунтування та дослідження джерела повітря обладнаного двигуном, який працює на електрогідравлічному ефекті при імпульсному режимі живлення електроенергією. Поєднання такого джерела з трубкою Ранка можливо дозволить зменшити енерговитрати і підвищити енергоефективність агрегату.

Зменшення теплообміну між гарячим і холодним потоками можливо досягти конструкторськими рішеннями, що базуються на ефекті взаємодії протилежно направлених електричних струмів. Пропонується штучно іонізувати вхідний потік повітря. У цьому випадку гарячий і холодний потоки, які мають заряди однакового знаку, при обертанні у протилежних напрямках будуть взаємно

відштовхуватися, що знизить теплообмін між потоками. Іонізацію повітряного потоку доцільно здійснювати у полі коронного розряду, розмістивши іонізатор перед вхідним соплом.

Вхідне сопло необхідно обладнати циліндричним сповільнювачем швидкості периферійних шарів повітряного потоку, що забезпечить збільшення нерівномірності швидкості шарів потоку на вході у вихрову трубку.

Впровадження запропонованих технічних рішень забезпечить підвищення енергоефективності вихрових трубок.

Література

1. Меркулов А. П. Вихревой эффект и его применение в технике / А. П. Меркулов. – М. : Машиностроение, 1969. – 185 с.
2. Вихревые аппараты / [А. Д. Суслов, С. В. Иванов, А. В. Мурашкин, Ю. В. Чижиков]. – М. : Машиностроение, 1985. – 256 с.
3. Гуцол А. Ф. Эффект Ранка / А. Ф. Гуцол // Успехи физических наук. – 1997. – Т. 167, № 6. – С. 665–687.
4. Leont'ev A. I. Gasdynamic methods of temperature stratification / A. I. Leont'ev // Fluid dynamics. – 2002. – Vol. 37, № 4. – P. 512–536.
5. Коновалов В. И. Сушка и другие технологические процессы с вихревой трубкой Ранка–Хильша / В. И. Коновалов, А. Ю. Орлов, Н. Ц. Гатапова // Вестник ТГТУ. – 2010. – Т. 16, № 4. – С. 803–825.
6. Baker P. S. Investigations on the Ranka-Hilsha (vortex) tube / P. S. Baker, W. R. Rathcamp. –: Oak Ridge National Laboratory, 1954. – 38 p.
7. Ahlborn B. K. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle / B. K. Ahlborn, J. M. Gordon // Journal of applied physics. – 2000. – Vol. 88, № 6. – P. 3645–3653.
8. Gao C. Experimental study on the Ranque – Hilsh vortex tube / C. Gao. –: PhD Study, 2005. – 151 p.