

А. М. КАРПЕНКО

*Національний аерокосмічний університет**«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна**Акціонерне товариство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна*

ТЕОРІЇ ЕФЕКТУ РАНКА: КРИТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ ДОСЛІДЖЕНЬ

Основною **метою** цієї оглядової статті є систематизація та критичний аналіз основних існуючих теорій, що пропонують пояснення причин та механізмів вихрового ефекту Ранка (ефекту температурної сепарації потоку, що обертається). У публікації розглядаються гіпотези, що базуються на впливі на енергетичне розділення обертального потоку тиску, в'язкості, турбулентності, вторинної циркуляції, вільного та примусового вихорів, конвективного теплообміну, стисливості рідини, роботи відцентрових сил, акустичного вітру, вихорів Гертлера та Максвеллівського розподілу швидкостей молекул. Незважаючи на значну кількість теоретичних моделей, на сьогодні не існує загальновизнаного доказу того, що хоча б один із зазначених механізмів є визначальним у процесі енергетичного розділення в трубі Ранка-Хільша. Аналіз наукової літератури свідчить, що найчастіше згадуваними теоретичними моделями температурної сепарації у вихровій трубі є: концепція вторинної циркуляції (B. Ahlborn), адіабатичне стиснення та розширення (G. Ranque), внутрішнє тертя (R. Hilsch), а також модель вільного та примусового вихору (R. Kassner і E. Knoernschild). Інші гіпотези мають значно менше підтверджень і підтримки в наукових джерелах. Така ситуація вказує на необхідність подальших досліджень, спрямованих на експериментальну та чисельну верифікацію провідних теорій з метою встановлення їхньої достовірності та уточнення механізмів енергетичного розділення. Цікаво, що найбільшу підтримку в літературі отримали теорія вільного та примусового вихору, запропонована R. Kassner і E. Knoernschild, а також концепція вторинної циркуляції, розроблена B. Ahlborn, попри те, що ці гіпотези базуються на різних фізичних принципах і не узгоджуються між собою. Тож різноманітні, а подекуди й суперечливі висновки окремих досліджень лише підкреслюють складність природи вихрового ефекту та вказують на необхідність проведення більш глибоких і системних експериментальних і теоретичних досліджень для коректного опису фізичних процесів, що відбуваються в межах вихрової труби. Для пояснення механізмів температурної сепарації в трубі Ранка потрібна розробка узагальненої теорії, яка має бути визнана науковою спільнотою та яка не буде обмежена геометричними параметрами вихрової труби або умовами її експлуатації.

Ключові слова: вихрова труба; труба Ранка-Хільша; розділення енергії; сепарація за повною температурою; вихровий ефект; ефект Ранка; ефект Ранка-Хільша; демон Максвелла.

Вступ

У 1867 році британський фізик J. Maxwell, щоб поставити під сумнів другий закон термодинаміки, який стверджує, що ентропія в замкненій системі не може зменшуватись без зовнішнього втручання, запропонував провести уявний експеримент. Уявімо контейнер, герметично закритий з усіх боків та всередині розділений перегородкою на дві частини. В перегородці може відкриватися маленьке віконце, яке контролює гіпотетична розумна істота мікроскопічного розміру (демон), яка сортує молекули газу за швидкістю, пропускаючи гарячі (більш швидкі) в один бік, а холодні (більш повільні) - в інший. Це порушує другий закон термодинаміки, бо зменшує ентропію без витрат енергії. Цікаво, що

вихрова труба Ранка реально виконує подібну функцію, через що часто згадується як приклад загадкового демона Максвелла.

Вихрова труба - це простий, але надзвичайно цікавий термодинамічний пристрій, здатний розділяти потік стисненого повітря на гарячий і холодний струмені, не маючи при цьому жодних рухомих частин. З моменту її відкриття в 1931 році G. Ranque [1] феномен енергетичного розділення (температурної сепарації) привертає увагу дослідників у різних галузях - від промислової інженерії до фундаментальної фізики.

Вихровий ефект Ранка також називають енергетичним (або температурним) розділенням, температурною (або енергетичною) сепарацією, ефектом Ранка-Хільша тощо.



Схематично конструкція та базовий принцип роботи вихрових труб з протитечією та з однонаправленим потоком показані на рис. 1.

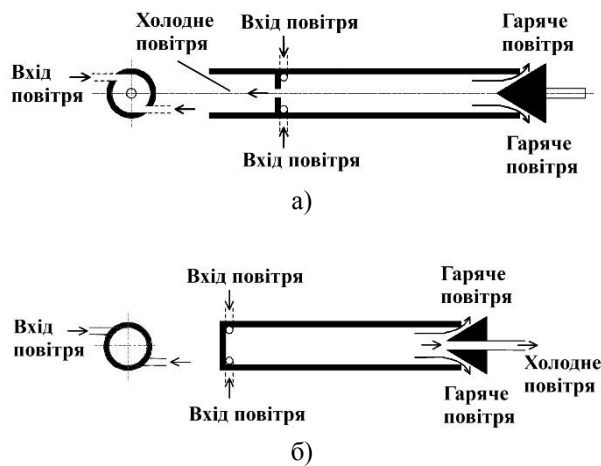


Рис 1. Схематичне зображення (перероблено з [2]) конструкції та принципу роботи вихрової труби Ранка-Хільша: а) вихрова труба з протитечією, б) вихрова труба з однонаправленим потоком

Механізм роботи вихрових труб Ранка-Хільша можна описати наступним чином. Коли стиснене повітря нагнітається в трубу з тангенціального входу, воно утворює інтенсивний вихровий потік і рухається до іншого кінця труби. Периферійна частина повітряного потоку виходить з гарячого виходу при більш високій температурі, ніж температура на вході, а центральна частина повітряного потоку, яка відтісняється конусом у вихровій трубі з протитечією, виходить з холодного сопла при більш низькій температурі, ніж температура повітря, що подається. У трубі з однонаправленим потоком гаряче й холодне повітря виходять з периферійного зазору та центрального сопла, відповідно, з одного й того ж кінця труби. Таким чином, інжектований потік повітря розділяється на два потоки з різними температурами. Незважаючи на десятиліття експериментальних і чисельних досліджень, механізм цього явища залишається предметом наукових дискусій.

У науковій літературі запропоновано низку гіпотез, що пояснюють природу вихрового ефекту - зокрема, теорії, пов'язані з тиском, в'язкістю, турбулентністю, вторинною циркуляцією, акустичним вітром і генерацією ентропії тощо. Проте жодна з них не отримала загального визнання, що свідчить про складність і багатофакторність процесу енергетичного розділення.

Попри численні спроби пояснити явище температурної сепарації в закручених потоках, значна частина існуючих теорій не витримує критичного аналізу. У науковому середовищі навіть

побуває іронічне висловлювання: «Кожному місту - свою справжню теорію вихрового ефекту!», що підкреслює надмірну кількість гіпотез, часто побудованих за принципом «підгонки результату під відомі дані».

Метою даної оглядової статті є систематизація та критичний аналіз основних існуючих теорій, що пропонують пояснення причин та механізмів вихрового ефекту Ранка. У публікації розглядаються гіпотези, що базуються на впливі на енергетичне розділення тиску, в'язкості, турбулентності, вторинної циркуляції, вільного та примусового вихорів, конвективного теплообміну, стисливості рідини, акустичного вітру, вихорів Гертлера, роботи відцентрових сил та Максвеллівського розподілу швидкостей молекул. Нижче наведено критичний огляд зазначених теорій температурної сепарації, які представлено відповідно до хронології їх розвитку починаючи з 1931 року.

Адіабатичне розширення та стиснення

G. Ranque [1] запропонував цю теорію як фізичне обґрунтування енергетичної сепарації у вихровій трубі. Згідно з його баченням, стиснене повітря заходить у вихрову трубу тангенціально і розтікається уздовж стінки у вигляді товстого шару. Внутрішні шари цього потоку, що обертається, чинять тиск на зовнішні (периферійні) шари через відцентрову силу, стискаючи їх. У результаті цього стиснення периферійні шари нагріваються. Одночасно з цим, через обертотний рух, центральна частина потоку (ядро) зазнає розширення, що призводить до зниження температури в центрі.

Це пояснення цікаве тим, що воно базується на розподілі механічної енергії в обертотному потоці. Фактично, G. Ranque трактує температурну сепарацію як наслідок внутрішньої взаємодії між шарами потоку, де периферія стискається й нагрівається, а центр розширюється й охолоджується - без використання зовнішнього джерела тепла чи охолодження.

На рис. 2 схематично представлено радіальний розподіл тиску у вихровій трубі.



Рис 2. Схематичне зображення радіального розподілу статичного тиску у вихровій трубі

R. Hilsch [2] спочатку підтримав теорію G. Ranque про температурну сепарацію, основану на адіабатичному стисненні та розширенні. Однак пізніше він відмовився від цієї моделі як універсального пояснення.

Окрім стиснення та розширення, R. Hilsch також зазначив, що внутрішнє тертя між шарами потоку відіграє важливу роль у процесі енергетичної сепарації. Тобто, не лише зміна тиску, а й в'язкі взаємодії між концентричними шарами обертового потоку можуть спричиняти сепарацію температури.

W. Scheller і G. Brown [3] підтримали гіпотезу G. Ranque, але водночас наголосили, що це явище є надзвичайно складним і, ймовірно, зумовлене кількома механізмами одночасно. Вони закликали до подальших досліджень і експериментального підтвердження.

A. Gutsol [4] висловив критичну позицію: він вважає, що ця теорія нагадує вічний двигун, тобто механізм, який порушує другий закон термодинаміки - зокрема, принцип ентропії та неможливість самовільного охолодження без зовнішньої роботи.

З твердження про те, що сепарація за температурою у вихровій трубі виникає внаслідок стиснення та розширення робочого середовища, випливає що стисливість речовини є ключовою умовою для виникнення температурної сепарації. Водночас, теоретичні та експериментальні дослідження інтенсивного обертового потоку нестисливої рідини [5, 6] показали, що температурна сепарація можлива навіть без суттєвих змін тиску.

Наприклад, R. Balmer [7] також критикує пояснення G. Ranque, стверджуючи, що стисливість газу не є причиною енергетичної сепарації. У досліджах R. Balmer [7], де як робоче середовище використано воду під високим тиском, також було зафіксовано температурну сепарацію. При цьому зміна об'єму води становила лише 1.4 - 3.6 %, що недостатньо для пояснення ефекту через адіабатичне розширення.

Більш того, згідно з експериментальними [8, 9] та чисельними [10, 11] дослідженнями, тиск у будь-якій точці вихрової труби нижчий за тиск на вході, що свідчить про те, що розширення відбувається по всій трубі, навіть на периферії, з чого випливає, що температура повинна падати по всій вихровій трубі, а не тільки в ядрі. Але це не відбувається, що спростовує теорію G. Ranque про адіабатичне стиснення-розширення як головну причину сепарації обертового потоку за температурою.

Вільний та примусовий вихор

Процес енергетичного розподілу газу у вихровій трубі пояснюється за допомогою гіпотези взаємодії двох вихорів:

- периферійного вільного вихору, який обертається за законом $V\phi \cdot r = \text{const}$;
- центрального (осьового) примусового вихору, який обертається за законом $V\phi / r = \text{const}$, де $V\phi$ – тангенціальна швидкість потоку, а r – радіус.

R. Kassner і E. Knoernschild [12] представили цю теорію, побудувавши графіки розподілу швидкості та зсувного напруження в рідині з обертовим рухом.

Теорія стверджує, що, коли потік рідини потрапляє у вихрову трубу Ранка-Хільша, він утворює вільний вихор через відсутність зовнішнього крутного моменту. Цей вільний вихор потім перетворюється на примусовий вихор під дією зсувної сили, яка залежить від кута обертання та радіального положення. Для підтримання однакової кутової швидкості кінетична енергія передається від центрального потоку до периферійного, в результаті чого вільний вихор стає периферійним теплим потоком, а примусовий вихор - внутрішнім холодним потоком [13].

На рис. 3 показано радіальний градієнт швидкості всередині вихрової труби та структуру течії у вихровій трубі згідно з теорією R. Kassner і E. Knoernschild [12].

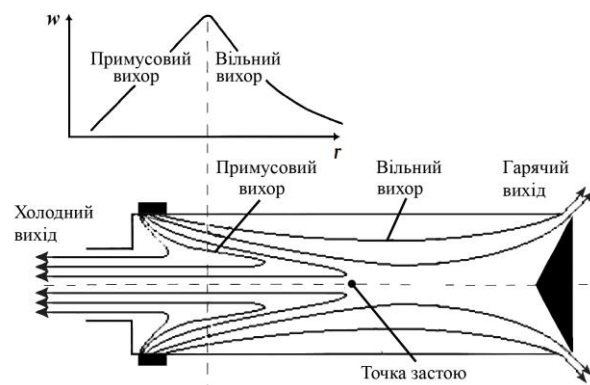


Рис 3. Схематичне зображення радіального градієнту швидкості всередині вихрової труби та структури течії у вихровій трубі згідно з R. Kassner і E. Knoernschild [12]

Експериментальні та теоретичні дослідження [3, 12, 13], підтвердили існування вільного та примусового вихору в вихровій трубі. J. Lay [14] проаналізував формування вільного та примусового вихору. C. Linderstrom-Lang [15] також зафіксував примусовий вихор на периферійних відстанях. T. Cockerill [16] представив формування вільного та примусового вихору, об'єднаного під терміном «вихор Ранкіна». U. Behera [11] та інші дослідники [17-19] надали докази існування вільного та примусового вихору за допомогою CFD (computational fluid dynamics) розрахунків.

Однак є ряд дослідників не згодних з гіпотезою R. Kassner і E. Knoernschild [12]. Наприклад, M. Sibulkin [20] заперечив існування примусового вихору, посиляючись на напрям потоку назовні по радіусу, який, згідно з припущенням, має бути спрямований до осі. M. Kurosaka [21], хоч і підтримав формування примусового вихору, але запропонував нову теорію. J. Camire [22] повідомив, що профілі тиску та швидкості в потоці ніколи не вказували на наявність вільного вихору.

Наявність експериментальних, теоретичних та чисельних доказів існування як вільних, так і примусових вихорів у вихрових трубах частково підтверджує теорію R. Kassner і E. Knoernschild. Але гіпотеза про те, що співіснування зон з вільним і вимушеним вихорами створює умови для енергетичного обміну (який, у поєднанні з в'язкістю й турбулентністю, призводить до температурної сепарації) - потребує більш детального обґрунтування.

Конвективний теплообмін

G. Schepfer [23] поклав в основу механізму енергообміну між периферійним і осьовим потоками газу конвективну теплопередачу. Він вважав, що газовий потік у вихровій трубі складається з двох протилежно спрямованих потоків, які мають приблизно однакову кутову швидкість. Периферійний потік рухається від вхідного сопла до дроселя гарячого виходу, а осьовий - від дроселя до діафрагми холодного виходу вихрової труби. Виходячи з припущення, що статична температура приосьових шарів вища, ніж у периферійних, G. Schepfer доводить, що існує радіальний потік тепла від осі до периферії шляхом вимушеної конвекції. У результаті повна температура периферійних шарів зростає, а осьових - знижується. Автор вважає, що процеси, які відбуваються у вихровій трубі, аналогічні процесам, що мають місце в двотрубному теплообміннику з протічечією. Осьовий потік обмежений трубкою, яка має нескінченно малу товщину стінки та діаметр, рівний діаметру діафрагми. При цьому ця гіпотетична труба обертається з тією ж кутовою швидкістю, що й осьовий потік.

Експериментальні дослідження [24-26] суперечать припущенню G. Schepfer про те, що статична температура осьових шарів є вищою за статичну температуру периферійних шарів, а отже, виключають запропонований G. Schepfer механізм енергообміну.

В'язкість і турбулентність

Дослідження, проведене С. Fulton [13], показало, що тангенціальна швидкість

периферійного шару на вході в трубку була нижчою, ніж у внутрішнього шару, що свідчить про формування вільного вихору. Через в'язке тертя між різними шарами повільний периферійний потік прискорювався внутрішнім потоком, тоді як внутрішній потік уповільнювався. У цьому процесі кінетична енергія передавалась від внутрішнього шару до зовнішнього через внутрішнє тертя. Підвищення температури відбувалося внаслідок передачі енергії до периферійного потоку, а додаткова енергія, що транспортувалась турбулентністю між двома шарами, сприяла формуванню температурного градієнта у вихровій трубі.

У подібному поясненні зазначається, що під час «перетворення в примусовий вихор» кутовий момент передається назовні через внутрішнє тертя між внутрішнім і зовнішнім шарами [27, 28], і передача кінетичної енергії розглядається як причина енергетичного розділення. Концепція внутрішнього тертя та ефекту турбулентності підтверджується чисельними експериментальними, теоретичними та CFD дослідженнями, проведеними іншими науковцями [6, 12-14, 28-29].

Окремі гіпотези пояснюють температурне розділення через в'язкісну взаємодію між робочим середовищем і внутрішньою поверхнею труби [10, 27, 30-32]. Згідно з ними, тепло, що виникає внаслідок тертя між стінкою труби та потоком повітря, спричиняє перетворення кінетичної енергії на теплову, що, своєю чергою, веде до локального підвищення температури.

Вплив цього механізму був кількісно оцінений у роботі [33]. Дослідження показали, що температурні зміни, спричинені в'язкісним тертям між потоком повітря та стінкою труби становлять не більше 2 К, що є недостатнім для пояснення температурного градієнта у вихровій трубі, де типове підвищення температури сягає 30 – 100 К.

Ефективна робота різних моделей вихрових труб [34, 35] (з довжиною від 20 мм до 2586 мм) та незначні відмінності температури гарячого потоку (менше 10 К) також свідчать про те, що тертя між повітрям і стінкою трубки не є суттєвим чинником температурного підвищення.

У порівнянні з тертям між потоком повітря та стінкою труби, перенесення енергії через внутрішнє тертя між окремими шарами потоку демонструє суттєвіший внесок у температурне розділення.

Що стосується внеску турбулентності в енергетичну сепарацію, то за своєю сутністю турбулентність є інтенсивним перемішуванням, яке сприяє усередненню параметрів системи. Відтак, сама по собі турбулентність не здатна спричинити просторове енергетичне розділення. Навпаки - якщо

таке розділення виникає внаслідок дії певного механізму, турбулентність, як правило, знижує його ефективність, оскільки спричиняє вирівнювання градієнтів і згладжування неоднорідностей. Це фактично ставить під сумнів гіпотези, які розглядають турбулентність як рушій температурного розділення у вихровій трубі.

Акустичний вітер

Цікавий підхід до інтерпретації ефекту Ранка був представлений у серії досліджень [21, 36–39], виконаних в Університеті штату Теннессі (The University of Tennessee). Ймовірно, основна ідея цих робіт виникла після успішного усунення небажаного температурного розподілу газового потоку в так званому «кільцевому каскаді» (annular cascade) шляхом застосування шумопоглиначів [40, 41].

У математичній моделі, запропонованій у роботі [21], за певних припущень було показано, що характерний для вихрових труб гучний «свист», якщо він зумовлений основною циркуляційною модою звукових коливань усередині труби, здатен прискорювати периферійні шари вихрового потоку. Механізмом такого прискорення виступає акустична течія (acoustic streaming), яка в пострадянській науковій літературі відома як «звуковий» або «акустичний вітер». Хоча ця модель не дозволила отримати явні кількісні оцінки, її автори вважали запропоноване пояснення ефекту Ранка достатньо переконливим.

У експериментальній частині досліджень [21, 36–38] було зафіксовано значне підвищення температури на осі вихрової труби з протитечією та закритим «холодним» виходом при резонансному приглушенні основної моди «вихрового свисту» (vortex whistle) за допомогою звукопоглиначів, встановлених на перфорованій камері енергетичного розподілу. Відповідно до моделі [21], це явище супроводжується трансформацією вимушеного вихору, що заповнює трубу, у вільний вихор. Автори стверджують, що це підтверджується експериментально зафіксованою зміною характеру газового потоку на виході з труби: при резонансному шумозаглушенні потік змінює напрямок з радіально-розбіжного на струминний.

При аналізі основної роботи [21], де представлено теоретичні положення та експериментальні результати, виникає низка запитань, що ставлять під сумнів обґрунтованість запропонованого підходу.

По-перше, викликає здивування вибір «найпростішої моделі» - вихрової труби з протитечією, в якій холодний вихід повністю перекритий діафрагмою. Така конструкція фактично

є прямоочною вихровою трубою, і при цьому повністю ігнорується наявність зворотного потоку.

По-друге, в роботі не наведено жодних експериментальних даних, що підтверджують прискорення периферійних шарів під дією звукових коливань. Перетворення вихідного потоку з радіально-розбіжного в струминний в умовах резонансного шумопоглинання може свідчити лише про те, що загальний момент імпульсу вихідного газу зменшується. Це виглядає цілком логічно, оскільки резонансне поглинання звуку спричиняє посилення взаємодії між обертовим потоком і повітрям в акустичних порожнинах через отвори в перфорованій трубі, що неминуче веде до зростання тертя. Підвищене тертя, в свою чергу, має уповільнювати обертовий потік, що також може спричинити зменшення температурного перепаду, характерного для ефекту Ранка.

Стисливість газів

Т. Amitani та ін. [42] досліджували великогабаритну вихрову трубку з внутрішнім діаметром 800 мм. Проведений ними чисельний аналіз великих вихрових труб показав, що стисливість є важливою для температурного розділення. Однак R. Balmer [7] спростував вплив фактора стисливості, довівши, що енергетичне розділення відбувається навіть при використанні води як робочого середовища. R. Balmer повідомив, що енергетичне розділення дійсно має місце при подачі води під високим тиском (понад 50 МПа).

Різними дослідниками експериментально [15, 43-50] та чисельно [51-57] було протестовано широкий спектр середовищ, що підтверджує наявність енергетичного розділення в усіх типах моноатомних, двоатомних, триатомних газів, пару та води. Таким чином, стисливість газів виключається як необхідна умова температурної сепарації, оскільки енергетичне розділення спостерігається в усіх типах робочих середовищ.

Вихори Гертлера (Görtler vortices)

Вихори Гертлера – це вторинна течія, що виникає в приграничному шарі потоку рідини поблизу увігнутої поверхні. Якщо товщина приграничного шару набагато менша від радіуса кривизни поверхні, тиск усередині приграничного шару залишається постійним уздовж нормалі до поверхні. З іншого боку, якщо товщина приграничного шару є порівнянною за порядком величини до радіуса кривизни поверхні, то відцентрова сила створює різницю тисків у приграничному шарі. Це призводить до відцентрової нестійкості (нестійкості Гертлера) приграничного

шару з подальшим формуванням вихорів Гертлера (рис. 4).

У вихровій трубі потік закручується вздовж стінки труби, яка має увігнуту геометрію. Це створює сприятливі умови для виникнення вихорів Гертлера. K. Stephen і S. Lin [58] досліджували вихрову трубу з протитечією, використовуючи повітря як робоче середовище. Отримані ними експериментальні результати вказують, на думку авторів, на те, що вихори Гертлера є основною рушійною силою енергетичного розділення у вихровій трубі.

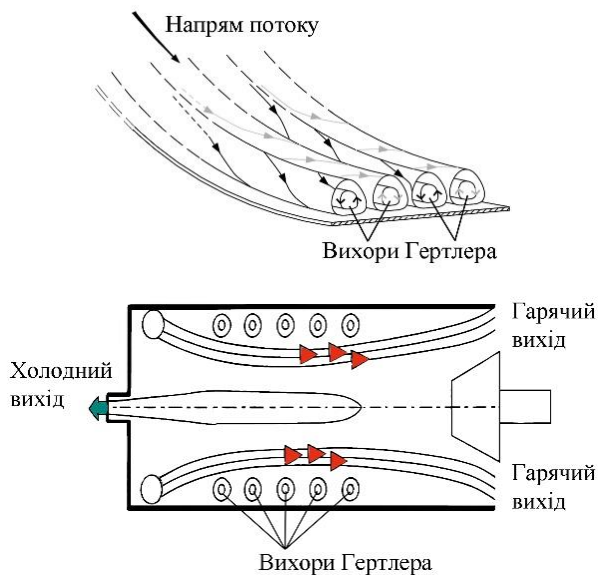


Рис 4. Схематичне зображення вихорів Гертлера у приграничному шарі (зверху) та у вихровій трубі з протитечією (знизу)

Аналіз вихорів Гертлера під час експерименту, надав інформацію про ослаблення їхньої інтенсивності через теплові втрати. В. Zaslavskii і В. Yur'ev [59] також зафіксували виникнення вихорів Гертлера та явище акустичного вітру при роботі з вихровою камерою.

Вихори Гертлера є дуже нестабільними [60] і, оскільки вони виникають у приграничному шарі, залишається відкритим питання про залежність енергетичного розділення у вихровій трубі від цих вихорів. Необхідні додаткові дослідження щодо їхнього внеску в радіальне теплоперенесення.

Крім того, необхідно проаналізувати вплив холодної масової частки сепарованого потоку та вхідного тиску, оскільки можуть існувати умови, за яких ці вихори не виникають при збільшенні холодної частки та при високих швидкостях.

Максвеллівський розподіл швидкостей молекул

За цією гіпотезою, основою енергетичної сепарації в газовому потоці, що обертається, може бути нерівномірний розподіл кінетичної енергії між молекулами газу (тобто враховується Максвеллівський розподіл швидкостей молекул, а сама вихрова труба відіграє роль демона Максвелла). Обертання газу утворює градієнт тиску, спрямований від осі до периферії. Оскільки молекули мають різну кінетичну енергію, вони мають і різну здатність проникнення в зону стисненого газу. Молекули з найбільшою кінетичною енергією рухаються до периферії (в зону підвищеного тиску), молекули з найменшою кінетичною енергією - до осі. Такий рух забезпечує радіальний перерозподіл енергії в трубі, а отже, й сепарацію повної температури в радіальному напрямку по перерізу вихрової труби.

Не дивлячись на те, що таке пояснення було певний час доволі популярним його складно знайти в академічних наукових джерелах. Застосовувати закон Максвелла для пояснення температурної сепарації в трубі Ранка не можна хоча б через те, що він був теоретично отриманий J. Maxwell для однорідного ($p = \text{const}$ - сталий тиск) ідеального газу. Максвеллівський розподіл описує швидкості молекул у рівноважній термодинамічній системі. Але трубка Ранка - це сильно нестационарна, турбулентна, обертова система з градієнтами тиску й температури. Вона не відповідає умовам рівноваги; отже, застосування закону Максвелла до неї - є помилкою. Більш того, з цієї теорії випливає, що тиск є бар'єром для руху молекул, хоча насправді тиск є наслідком обертання тих самих молекул. І втрата енергії при переміщенні молекул не відбувається автоматично, а потребує механізмів (зіткнень, тертя, теплоперенесення та ін.), які ця гіпотеза ігнорує. Тому вона не пояснює температурну сепарацію в трубі Ранка.

Вторинна циркуляція

Під час дослідження вихрової трубки із зустрічним потоком В. Ahlborn [61] встановив, що об'єм холодного повітря, який повертається назад від гарячого кінця труби, перевищує об'єм, що виходить через холодне сопло. На основі цього спостереження він висунув гіпотезу про можливе існування зворотного потоку, який частково повертається до гарячого кінця рухаючись периферійними радіусами, утворюючи так звану вторинну циркуляцію. Схематичне зображення цієї концепції наведено на рис. 5.

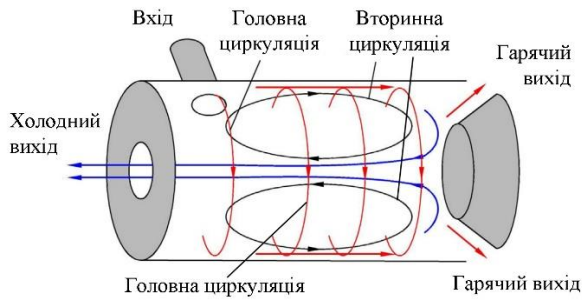


Рис 5. Схематичне зображення вихрової труби з візуалізацією основних течій всередині (перероблено з [62])

Згодом В. Ahlborn [63] припустив, що ця вторинна циркуляція функціонує подібно до холодильного циклу: вона поглинає тепло з центрального потоку на шляху до холодного кінця, а потім передає його периферійному потоку, рухаючись разом із основним потоком до гарячого кінця. У результаті температура зовнішнього шару зростає, а температура центрального потоку знижується.

Р. Manimaran [64] застосував модель напружень Рейнольдса (RSM – Reynolds Stress Model) для чисельного розрахунку, і результати показали, що осьова зсувна робота між гарячим і холодним вихровими потоками є основною причиною утворення вторинного потоку. Дослідження також підтвердило, що вторинний потік може позитивно впливати на енергетичне розділення, причому саме розмір вторинної циркуляції, а не кількість вторинних потоків, є головним чинником, який визначає ефективність енергетичного розділення у вихровій трубі.

Однак не всі дослідники погоджуються з теорією вторинної циркуляції потоку. Наприклад, U. Behara [11] дійшов висновку, що формування вторинної циркуляції пов'язане з розміром холодного виходу з вихрової труби. Коли холодний вихід є достатньо малим, у вихровій трубі формується контур вторинної циркуляції. Зі збільшенням розміру холодного виходу вторинна циркуляція слабшає. При відношенні діаметра холодного виходу до діаметра труби $d_x / D_t = 0.58$ спостерігається втрата вторинного потоку. Дослідження Н. Kandil [65] виявило взаємозв'язок між вторинним потоком і масовою часткою холодного потоку. Коли масова фракція холодного потоку менша ніж 0.31, формуються повні контури вторинної циркуляції. При збільшенні цієї фракції понад 0.74 контури вторинної циркуляції зникають, проте сепарація потоку за температурою, хоч і стає меншою, але лишається, що ставить під сумнів вторинну циркуляцію, як основний фактор, що ініціює температурне розділення потоку.

Останні дослідження підтверджують, що формування вторинної циркуляції дійсно залежить від розмірів холодного виходу. Проте вплив цього явища на температурне розділення залишається недостатньо вивченим, особливо в трубах з однонаправленим потоком, де вторинна циркуляція взагалі не досліджувалась.

Множинні циркуляції

Теорія, запропонована Y. Xue та M. Arjomandi [66], певною мірою подібна до моделі вторинної циркуляції. В. Ahlborn визначив її як один цикл, тоді як Y. Xue та M. Arjomandi, використовуючи водневі бульбашки в потоці вихрової трубки, передбачили наявність множинних циркуляцій, які переносять енергію від ядра до периферії.

У дослідженні також зазначено, що множинні циркуляції зумовлені тиском; будь-яке підвищення тиску на вході може порушити ці циркуляції. Автори звертають увагу на те, що змішування, спричинене циркуляцією, має тенденцію впливати на ефективність охолодження. Шлях водневої бульбашки, введеної тангенціально в трубку, демонструє наявність множинних циркуляцій у потоці за допомогою стійкої рідинної колони. X. Liu і Z. Liu [67], спостерігаючи поле потоку за допомогою чисельного CFD аналізу, прийшли до висновку, що множинні циркуляції частково відповідають за енергетичне розділення. З огляду на наведене, аналогічно до вторинної циркуляції, залежність множинних циркуляцій від геометрії трубки та масової частки холодного потоку робить цю теорію валідною лише для трубок зі специфічною геометрією.

Робота відцентрових сил

У 2024 році в роботі Y. Kukhtin та A. Karpenko [68] за результатами аналізу рівнянь законів збереження, записаних для нев'язкого термодинамічно ідеального газу, а також за результатами чисельного CFD-моделювання закрученої течії у вихровій трубі автори зробили висновок, що сепарація повної ентальпії (температури), що виникає в енергетично ізольованих закручених потоках стисливого газу є результатом роботи сил інерції (зокрема відцентрової сили). Автори підкреслюють, що досяжна при сепарації різниця повної температури між гарячим і холодним потоками залежить від кривизни ліній току, величини тангенціальної швидкості та радіального градієнту швидкості.

У своєму дослідженні автори проводять CFD розрахунки вихрової труби з урахуванням та без урахування в'язкості; в обох випадках розрахунки фіксують наявність сепарації потоку за температурою. Що дозволяє зробити висновок про

те, що в'язкість не є основним чинником перерозподілу температури в закручених течіях.

Теорія, згідно з якою робота відцентрових сил розглядається як основна причина температурної сепарації у вихровій трубі, потребує більш детального опрацювання та наукового обговорення.

Загалом огляд літературних джерел показав, що найчастіше згадуваними теоріями ефекту Ранка є: вторинна циркуляція за B. Ahlborn [63], адіабатичне стиснення та розширення за G. Ranque [1], внутрішнє тертя за R. Hilsch [2], а також теорія вільного та примусового вихорів за R. Kassner і E. Knoernschild [12]. Інші теорії мають меншу підтримку в науковій літературі.

Інші теорії вихрового ефекту

Поряд із теоріями, що здобули найбільшу підтримку в науковій літературі, існують також інші, які не привернули належної уваги наукової спільноти. Список деяких з них наведений нижче.

Ці теорії не набули широкого визнання через недостатність доказів. Проте, можливо, деякі з них також сприяють явищу розділення енергії. Тому перегляд і оцінка цих теорій нарівні з популярними має сенс.

Інші теорії вихрового ефекту, що розглядають вплив різних факторів на температурну сепарацію в потоках, що обертаються:

- Турбулентне змішування + ефект Джоуля (J. Deemter [69]);
- Центрифужне розділення + дифузія (P. Baker [43]);
- Архімедова сила + напруження Рейнольдса (A. Reynolnds [70]);
- Центрифужне розділення (C. Linderstrom-Lang [15]);
- Стиснення й розширення турбулентних вихорів (H. Bruun [71]);
- Вплив ступеня сухості (R. Collins [45]);
- Зміна кінетичної енергії (B. Ahlborn [72]);
- Розділення при низькому тиску й температурі (B. Ahlborn [73]);
- Вихрова труба як теплообмінник (J. Lewins [74]);
- Акреція за Кеплером (S. Colgate [27]);
- Обертовий момент + вихори Rossby (V. Trofimov [28]);
- Акустичні стоячі хвилі (V. Kotelnikov [75]);
- Генерація ентропії (J. Mischner [76]);
- та інші.

Висновки

Проведений аналіз існуючих теорій ефекту Ранка засвідчив, що різноманітні, а іноді й

суперечливі висновки досліджень лише підкреслюють складність природи вихрового ефекту та свідчать про потребу в більш глибоких і систематизованих експериментальних і теоретичних дослідженнях для коректного опису фізичних процесів, що відбуваються всередині вихрових труб.

Для пояснення механізмів температурної сепарації в трубі Ранка потрібна розробка узагальненої теорії, яка має бути визнана науковою спільнотою та яка не буде обмежена геометричними параметрами вихрової труби або умовами її експлуатації.

Важливо також ідентифікувати внесок кожної окремої теорії. Наступним кроком має стати оцінка їхнього комбінованого або сукупного впливу. Оскільки багато дослідників спостерігали часткову реалізацію окремих механізмів у закрученому потоці, оцінка їхнього сумарного ефекту може стати основою для побудови нових теоретичних моделей енергетичного розділення в потоці, що обертається.

Автор розраховує, що проведений критичний аналіз існуючих теорій вихрового ефекту, їх оцінка та порівняння між собою сприятимуть подальшому розвитку досліджень у цій галузі та викриттю врешті решт природи демона Максвелла, котрий сепарує потік за температурою у вихровій трубі Ранка.

Конфлікт інтересів

Автор заявляє, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Доступність даних

Рукопис не має пов'язаних даних.

Використання засобів штучного інтелекту

Автор підтверджує, що не використовував технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

Автор прочитав та погодився з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Ranque, G. *Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air* [Text] / G. Ranque // *Le journal de physique et le radium* (Paris). – 1933. – No. 4. – P. 112–114.
2. Hilsch, R. *The use of the expansion of gases in a*

- centrifugal field as cooling process [Text] / R. Hilsch // *Review of scientific instruments*. – 1947. – Vol. 18, no. 2. – P. 108–113. DOI: 10.1063/1.1740893.
3. Scheller, W. A. The Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / William A. Scheller, George M. Brown // *Industrial & engineering chemistry*. – 1957. – Vol. 49, no. 6. – P. 1013–1016. DOI: 10.1021/ie50570a035.
4. Gutsol, A. F. The Ranque effect [Text] / A. F. Gutsol // *Physics-Uspekhi*. – 1997. – Vol. 40, no. 6. – P. 639–658. DOI: 10.1070/pu1997v040n06abeh000248.
5. Lewellen, W. S. A solution for three-dimensional vortex flows with strong circulation [Text] / W. S. Lewellen // *Journal of fluid mechanics*. – 1962. – Vol. 14, no. 3. – P. 420–432. DOI: 10.1017/s0022112062001330.
6. Linderstrøm-Lang, C. U. The three-dimensional distributions of tangential velocity and total-temperature in vortex tubes [Text] / C. U. Linderstrøm-Lang // *Journal of fluid mechanics*. – 1971. – Vol. 45, no. 1. – P. 161–187. DOI: 10.1017/s0022112071003057.
7. Balmer, R. T. Pressure-Driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids [Text] / R. T. Balmer // *Journal of fluids engineering*. – 1988. – Vol. 110, no. 2. – P. 161–164. DOI: 10.1115/1.3243529.
8. Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / C. M. Gao, & et al. // *Cryogenics*. – 2005. – Vol. 45, no. 3. – P. 173–183. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.09.004.
9. Gao, C. M. Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube: PhD Thesis [Text] / Gao C. M. – Eindhoven, 2005.
10. Numerical investigations on flow behaviour and energy separation in Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / Upendra Behera, & et al. // *International journal of heat and mass transfer*. – 2008. – Vol. 51, no. 25-26. – P. 6077–6089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.029.
11. CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / Upendra Behera, & et al. // *International journal of heat and mass transfer*. – 2005. – Vol. 48, no. 10. – P. 1961–1973. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.046.
12. Kassner, R. Friction laws and energy transfer in circural flow [Text] / R. Kassner, & E. Knoernschild. – Wright-Patterson Air Force Base: [s. n.], 1948.
13. Fulton, C. D. Ranque's tube [Text] / C. D. Fulton // *ASRE journal of refrigerating engineers*. – 1950. – Vol. 58. – P. 473–479.
14. Lay, J. E. Experimental and analytical study of viscous compressible flow in a uniflow Vortex tube [Text] / J. E. Lay // *University of Michigan*. – 1957.
15. Linderstrom-Lang, C. U. An experimental study of tile tangential velocity profile in the Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / C. U. Linderstrom-Lang // *Danish atomic energy commission, riso, roskilde, denmark*. – 1965.
16. Cockerill, T. Phd Thessis on vortex tube: Phd Thessis [Text] / Cockerill T. – Cambridge, 1995.
17. Farouk, T. Large eddy simulations of the flow field and temperature separation in the Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / Tanvir Farouk, & Bakhtier Farouk // *International journal of heat and mass transfer*. – 2007. – Vol. 50, no. 23-24. – P. 4724–4735. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.048.
18. Rafiee, S. E. Three-Dimensional simulation of fluid flow and energy separation inside a vortex tube [Text] / Seyed Ehsan Rafiee, & Masoud Rahimi // *Journal of thermophysics and heat transfer*. – 2014. – Vol. 28, no. 1. – P. 87–99. DOI: 10.2514/1.t4198.
19. Numerical analysis for curved vortex tube optimization [Text] / Masoud Bovand, & et al. // *International communications in heat and mass transfer*. – 2014. – Vol. 50. – P. 98–107. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012.
20. Sibulkin, M. Unsteady, viscous, circular flow Part 3. Application to the Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / Merwin Sibulkin // *Journal of fluid mechanics*. – 1962. – Vol. 12, no. 02. – P. 269–293. DOI: 10.1017/s0022112062000191.
21. Kurosaka, M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect [Text] / M. Kurosaka // *Journal of fluid mechanics*. – 1982. – Vol. 124, no. 1. – P. 139–172. DOI: 10.1017/s0022112082002444.
22. Camiré, J. Experimental investigation of vortex tube concepts: thesis [Text] / Camiré Jean. – Columbia, 1995. Available at: <http://hdl.handle.net/2429/3608>. (accessed 12.12.2024).
23. Scheper, G. W. The vortex tube- internal flow data and heat transfer theory [Text] / G. W. Scheper // *Journal of the ASRE*. – 1951. – Vol. 59, no. 10. – P. 985–990.
24. Мартиновский, В. С. Вихревой эффект охлаждения и его применение [Текст] / В. Мартиновский, & В. П. Алексеев // *Холодильная техника*. – 1953. – № 3. – С. 63–66.
25. Меркулов, А. П. Вихревой эффект и его применение в технике [Текст] / А. П. Меркулов. – М.: Машиностроение, 1969. – 184 с. Режим доступа: <https://djvu.online/file/qxjsOEGhx3vR1>. – 12.12.2024.
26. Hartnett, J. P. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high-velocity vortex-type flow [Text] / J. P. Hartnett, & E. R. G. Eckert // *Journal of fluids engineering*. – 1957. – Vol. 79, no. 4. – P. 751–758. DOI: 10.1115/1.4013144.
27. Colgate, S. A. Coherent transport of angular momentum: the Ranque-Hilsch tube as a paradigm

[Text] / Stirling A. Colgate, & J. Robert Buchler // *Annals of the new york academy of sciences*. – 2006. – Vol. 898, no. 1. – P. 105–112. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06166.x.

28. Trofimov, V. M. Physical effect in Ranque vortex tubes [Text] / V. M. Trofimov // *Journal of experimental and theoretical physics letters*. – 2000. – Vol. 72, no. 5. – P. 249–252. DOI: 10.1134/1.1324021.

29. Alimov, R. Z. Flow friction and heat and mass transfer in a swirled flow [Text] / R. Z. Alimov // *Journal of engineering physics*. – 1966. – Vol. 10, no. 4. – P. 251–257. DOI: 10.1007/bf00837815.

30. Observation of large-scale hydrodynamic structures in a vortex tube and the Ranque effect [Text] / V. A. Arbuzov, & et al. // *Technical physics letters*. – 1997. – Vol. 23, no. 12. – P. 938–940. DOI: 10.1134/1.1261939.

31. Parulekar, B. The short vortex tube [Text] / B. Parulekar // *Journal of refrigeration*. – 1961. – Vol. 4. – P. 74–80.

32. Shannak, B. A. Temperature separation and friction losses in vortex tube [Text] / Benbella A. Shannak // *Heat and mass transfer*. – 2003. – Vol. 40, no. 10. – P. 779–785. DOI: 10.1007/s00231-003-0485-1.

33. Arjomandi, M. An investigation on the effect of the hot end plugs on the efficiency of the Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / M. Arjomandi, & Y. P. Xue // *New trends in fluid mechanics research*. – Berlin, Heidelberg, 2007. – 505 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75995-9_168.

34. Aljuwayhel, N. F. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model [Text] / N. F. Aljuwayhel, G. F. Nellis, & S. A. Klein // *International journal of refrigeration*. – 2005. – Vol. 28, no. 3. – P. 442–450. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2004.04.004.

35. Hamoudi, A. F. Performance characteristics of a microscale Ranque-Hilsch vortex tube [Text] / A. F. Hamoudi, A. Fartaj, & G. W. Rankin // *Journal of fluids engineering*. – 2008. – Vol. 130, no. 10. DOI: 10.1115/1.2969442.

36. Kurosaka, M. Ranque-Hilsch effect revisited - Temperature separation traced to orderly spinning waves or 'vortex whistle' [Text] / M. Kurosaka, & J. Goodman // *3rd joint thermophysics, fluids, plasma and heat transfer conference*, St. Louis, MO, U.S.A. – Reston, Virginia, 1982. DOI: 10.2514/6.1982-952.

37. Chu, J. Q. Acoustic streaming as a mechanism of the Ranque-Hilsch effect: PhD Thesis [Text] / Joseph Quang Chu. – University of Tennessee, 1982. – Available at: https://trace.tennessee.edu/utk_grad-diss/4215. – 15.02.2025.

38. Kurosaka, M. Vortex whistle - An unsteady phenomenon in swirling flow and its effects on steady flow field [Text] / M. Kurosaka // *19th aerospace sciences meeting*, St. Louis, MO, U.S.A. – Reston, Virginia, 1981. DOI: 10.2514/6.1981-212.

39. Kuroda, H. An experimental study of temperature separation in swirling flow: PhD Thesis [Text] / Hiromoto Kuroda. – University of Tennessee, 1983. – Available at: https://trace.tennessee.edu/utk_grad-diss/3234. (accessed 12.12.2024).

40. Rakowski, W. J. Experimental analysis of blade instability [Text] / W. J. Rakowski, & D. H. Ellis. – General Electric Company Rep. for F 33615-76-C- 2035 to Air Force Propulsion Lab. WPAFB, 1978. – 67 p.

41. Rakowski, W. A research program for the experimental analysis of blade instability [Text] / W. Rakowski, D. Ellis, & H. Bankhead // *14th joint propulsion conference: AIAA 1978-1089*. – 1978.

42. Amitani, T. A study on temperature separation in a large vortex tube [Text] / T. Amitani, T. Adachi, & T. Kato // *JSME, transactions*. – 1983. – Vol. 49, no. 440B. – P. 877–884.

43. Baker, P. S. Investigations on the Ranque-Hilsch (vortex) tube [Text] / P. S. Baker, & W. R. Rathkamp. – [S. l.]: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1954. DOI: 10.2172/4402223.

44. Gulyaev, A. I. Investigation of conical vortex tubes [Text] / A. I. Gulyaev // *Journal of engineering physics*. – 1966. – Vol. 10, no. 3. – P. 193–195. DOI: 10.1007/bf00832624.

45. Collins, R. L. Experimental study of two-phase propane expanded through the Ranque-Hilsch tube [Text] / R. L. Collins, & R. B. Lovelace // *Journal of heat transfer*. – 1979. – Vol. 101, no. 2. – P. 300–305. DOI: 10.1115/1.3450964.

46. Marshall, J. Effect of operating conditions, physical size and fluid characteristics on the gas separation performance of a Linderstrom-Lang vortex tube [Text] / J. Marshall // *International journal of heat and mass transfer*. – 1977. – Vol. 20, no. 3. – P. 227–231. DOI: 10.1016/0017-9310(77)90209-5.

47. Performance characteristics of energy separation in a steam-operated vortex tube / Heishiro Takahama, & et al. // *International journal of engineering science*. – 1979. – Vol. 17, no. 6. – P. 735–744. DOI: 10.1016/0020-7225(79)90048-x.

48. Aydin, O. An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube [Text] / O. Aydin, & M. Baki // *Energy*. – 2006. – Vol. 31, no. 14. – P. 2763–2772. DOI: 10.1016/j.energy.2005.11.017.

49. Kirmaci, V. Exergy analysis and performance of counter flow vortex tube [Text] / V. Kirmaci // *International journal of refrigeration*. – 2009. – Vol. 32. – P. 1626–1633.

50. The influence of working gas characteristics on energy separation of vortex tube [Text] / X. Han, & et al. // *Applied thermal engineering*. – 2013. – Vol. 61, no. 2. – P. 171–177. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.027.

51. Bezprozvannykh, V. The Ranque-Hilsch effect: CFD modeling [Text] / V. Bezprozvannykh, & H. Mottl. – DYCOR technologies, Canada, 1999.
52. Khazaei, H. Effects of gas properties and geometrical parameters on performance of a vortex tube [Text] / H. Khazaei, A. R. Teymourash, & M. Malek-Jafarian // *Scientia iranica*. – 2012. – Vol. 19, no. 3. – P. 454–462. DOI: 10.1016/j.scient.2012.03.003.
53. Farouk, T. Simulation of gas species and temperature separation in the counter-flow Ranque–Hilsch vortex tube using the large eddy simulation technique [Text] / Tanvir Farouk, Bakhtier Farouk, & Alexander Gutsol // *International journal of heat and mass transfer*. – 2009. – Vol. 52, no. 13-14. – P. 3320–3333. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.016.
54. Pinar, A. M. Optimization of counter flow Ranque–Hilsch vortex tube performance using Taguchi method [Text] / Ahmet Murat Pinar, Onuralp Uluer, & Volkan Kırmacı // *International journal of refrigeration*. – 2009. – Vol. 32, no. 6. – P. 1487–1494. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.02.018.
55. Polat, K. Application of the output dependent feature scaling in modeling and prediction of performance of counter flow vortex tube having various nozzles numbers at different inlet pressures of air, oxygen, nitrogen and argon [Text] / Kemal Polat, & Volkan Kırmacı // *International journal of refrigeration*. – 2011. – Vol. 34, no. 6. – P. 1387–1397. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.03.019.
56. Baghdad, M. CFD modelling and exergy analysis of a vortex tube using co2 as working fluid [Text] / M. Baghdad, A. Ouadha, & Y. Addad // 10th iir-gustav lorentzen conference on natural working fluids, Delft. – [S. l.], 2012.
57. Thakare, H. R. CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes [Text] / H. R. Thakare, & A. D. Parekh // *International journal of heat and mass transfer*. – 2014. – Vol. 78. – P. 360–370. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.083.
58. An investigation of energy separation in a vortex tube [Text] / K. Stephan, S. Lin, M. Durst, F. Huang, & D. Seher // *International journal of heat and mass transfer*. – 1983. – Vol. 26, no. 3. – P. 341–348. DOI: 10.1016/0017-9310(83)90038-8.
59. Zaslavskii, B. I. Flow structure in a flat vortex chamber [Text] / B. I. Zaslavskii, & B. V. Yur'ev // *Journal of applied mechanics and technical physics*. – 1998. – Vol. 39, no. 1. – P. 73–77. DOI: 10.1007/bf02468000.
60. Floryan, J. M. Stability of gortler vortices in boundary layers [Text] / Jerzy M. Floryan, & William S. Saric // *AIAA journal*. – 1982. – Vol. 20, no. 3. – P. 316–324. DOI: 10.2514/3.51076.
61. Ahlborn, B. Secondary flow in a vortex tube [Text] / Boye Ahlborn, & Stuart Groves // *Fluid dynamics research*. – 1997. – Vol. 21, no. 2. – P. 73–86. DOI: 10.1016/s0169-5983(97)00003-8.
62. Energy separation for Ranque-Hilsch vortex tube: a short review [Text] / Zhuohuan Hu, & et al. // *Thermal science and engineering progress*. – 2020. – Vol. 19. – Article no. 100559. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100559.
63. Ahlborn, B. K. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle [Text] / Boye K. Ahlborn, & Jeffrey M. Gordon // *Journal of applied physics*. – 2000. – Vol. 88, no. 6. – P. 3645–3653. DOI: 10.1063/1.1289524.
64. Manimaran, R. Computational analysis of flow features and energy separation in a counter-flow vortex tube based on number of inlets [Text] / R. Manimaran // *Energy*. – 2017. – Vol. 123. – P. 564–578. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.025.
65. Kandil, H. A. Computational investigation of different effects on the performance of the Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / Hamdy A. Kandil, & Seif T. Abdelghany // *Energy*. – 2015. – Vol. 84. – P. 207–218. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.089.
66. Xue, Y. Visualization of the flow structure in a vortex tube [Text] / Yunpeng Xue, Maziar Arjomandi, & Richard Kelso // *Experimental thermal and fluid science*. – 2011. – Vol. 35, no. 8. – P. 1514–1521. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.07.001.
67. Liu, X. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube [Text] / Xingwei Liu, & Zhongliang Liu // *Applied thermal engineering*. – 2014. – Vol. 67, no. 1-2. – P. 494–506. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.071.
68. Karpenko, A. Study of the total temperature redistribution in the complex swirling flows [Text] / Artem Karpenko, & Yurii Kukhtin // ASME turbo expo 2024: turbomachinery technical conference and exposition, London, United Kingdom, 24–28 June 2024. – [S. l.], 2024. DOI: 10.1115/gt2024-120961.
69. Van Deemter, J. J. On the theory of the Ranque-Hilsch cooling effect [Text] / J. J. Van Deemter // *Applied scientific research*. – 1952. – Vol. 3, no. 3. – P. 174–196. DOI: 10.1007/bf03184927.
70. Reynolds, A. J. Energy flows in a vortex tube [Text] / Alan J. Reynolds // *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*. – 1961. – Vol. 12, no. 4. – P. 343–357. DOI: 10.1007/bf01591284.
71. Bruun, H. H. Experimental investigation of the energy separation in vortex tubes [Text] / H. H. Bruun // *Journal of mechanical engineering science*. – 1969. – Vol. 11, no. 6. – P. 567–582. DOI: 10.1243/jmes_jour_1969_011_070_02.
72. Limits of temperature separation in a vortex tube [Text] / B. Ahlborn, & et al. // *Journal of physics D*:

applied physics. – 1994. – Vol. 27, no. 3. – P. 480–488. DOI: 10.1088/0022-3727/27/3/009.

73. Ahlborn, B. Low-pressure vortex tubes [Text] / B. Ahlborn, J. Camire, & J. U. Keller // *Journal of physics D: applied physics*. – 1996. – Vol. 29, no. 6. – P. 1469–1472. DOI: 10.1088/0022-3727/29/6/009.

74. Lewins, J. Vortex tube optimization theory [Text] / Jeffery Lewins, & Adrian Bejan // *Energy*. – 1999. – Vol. 24, no. 11. – P. 931–943. DOI: 10.1016/S0360-5442(99)00039-0.

75. Large scale vortex tubes (LSVT) in a heat generation [Text] / V. Kotelnikov, & et al. // *Energy, environment, eco-systems, development and landscape architecture*. – 2000. – P. 39–44.

76. Mischner, J. Zur Entropieproduktion im Ranque-Hilsch-Rohr [Text] / J. Mischner, & V. I. Bespalov // *Forschung im Ingenieurwesen*. – 2002. – Vol. 67, no. 1. – P. 1–10. DOI: 10.1007/s10010-002-0070-7.

References

1. Ranque, G. Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air. *Le journal de physique et le radium (Paris)*, 1933, no. 4, pp. 112–114.

2. Hilsch, R. The use of the expansion of gases in a centrifugal field as cooling process. *Review of scientific instruments*, 1947, vol. 18, no. 2, pp. 108–113. DOI: 10.1063/1.1740893.

3. Scheller, W. A., & Brown, G. M. The Ranque-Hilsch vortex tube. *Industrial & engineering chemistry*, 1957, vol. 49, no. 6, pp. 1013–1016. DOI: 10.1021/ie50570a035.

4. Gutsol, A. F. The Ranque. *Physics-Uspekhi*, 1997, vol. 40, no. 6, pp. 639–658. DOI: 10.1070/pu1997v040n06abeh000248.

5. Lewellen, W. S. A solution for three-dimensional vortex flows with strong. *Journal of fluid mechanics*, 1962, vol. 14, no. 3, pp. 420–432. DOI: 10.1017/s0022112062001330.

6. Linderstrøm-Lang, C. U. The three-dimensional distributions of tangential velocity and total-temperature in vortex tubes. *Journal of fluid mechanics*, 1971, vol. 45, no. 1, pp. 161–187. DOI: 10.1017/s0022112071003057.

7. Balmer, R. T. Pressure-Driven Ranque-Hilsch temperature separation in liquids. *Journal of fluids engineering*, 1988, vol. 110, no. 2, pp. 161–164. DOI: 10.1115/1.3243529.

8. Gao, C. M., & et al. Experimental study on a simple Ranque-Hilsch vortex tube. *Cryogenics*, 2005, vol. 45, no. 3, pp. 173–183. DOI: 10.1016/j.cryogenics.2004.09.004.

9. Gao, C. M. *Experimental study on the Ranque-Hilsch vortex tube: PhD Thesis*. Eindhoven, 2005.

10. Behera, U., & et al. Numerical investigations on flow behaviour and energy separation in Ranque-Hilsch vortex tube. *International journal of heat and mass transfer*, 2008, vol. 51, no. 25-26, pp. 6077–6089. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.03.029.

11. Behera, U., & et al. CFD analysis and experimental investigations towards optimizing the parameters of Ranque-Hilsch vortex tube. *International journal of heat and mass transfer*, 2005, vol. 48, no. 10, pp. 1961–1973. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.12.046.

12. Kassner, R., & Knoernschild, E. *Friction laws and energy transfer in circural flow*. Wright-Patterson Air Force Base: [s. n.], 1948.

13. Fulton, C. D. Ranque's tube. *ASRE journal of refrigerating engineers*, 1950, vol. 58, pp. 473–479.

14. Lay, J. E. *Experimental and analytical study of viscous compressible flow in a uniflow Vortex tube*. University of Michigan, 1957.

15. Linderstrøm-Lang, C. U. *An experimental study of tile tangential velocity profile in the Ranque-Hilsch vortex tube*. Danish atomic energy commission, risø, roskilde, denmark, 1965.

16. Cockerill, T. *Phd Thessis on vortex tube: Phd Thessis*. Cambridge, 1995.

17. Farouk, T., & Farouk, B. Large eddy simulations of the flow field and temperature separation in the Ranque-Hilsch vortex tube. *International journal of heat and mass transfer*, 2007, vol. 50, no. 23-24, pp. 4724–4735. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.048.

18. Rafiee, S. E., & Rahimi, M. Three-Dimensional simulation of fluid flow and energy separation inside a vortex tube. *Journal of thermophysics and heat transfer*, 2014, vol. 28, no. 1, pp. 87–99. DOI: 10.2514/1.t4198.

19. Bovand, M., & et al. Numerical analysis for curved vortex tube optimization. *International communications in heat and mass transfer*, 2014, vol. 50, pp. 98–107. DOI: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012.

20. Sibulkin, M. Unsteady, viscous, circular flow Part 3. Application to the Ranque-Hilsch vortex tube. *Journal of fluid mechanics*, 1962, vol. 12, no. 02, pp. 269–293. DOI: 10.1017/s0022112062000191.

21. Kurosaka, M. Acoustic streaming in swirling flow and the Ranque-Hilsch (vortex-tube) effect. *Journal of fluid mechanics*, 1982, vol. 124, no. 1, pp. 139–172. DOI: 10.1017/s0022112082002444.

22. Camiré, J. *Experimental investigation of vortex tube concepts: thesis*. Columbia, 1995. Available at: <http://hdl.handle.net/2429/3608>. (accessed 12.12.2024).

23. Scheper, G. W. The vortex tube- internal flow data and heat transfer theory. *Journal of the ASRE*, 1951, vol. 59, no. 10, pp. 985–990.

24. Martynovskiy, V. S., & Alekseyev, V. P. Vikhrevoy effekt okhlazhdeniya i yego primeneniye [vortex cooling effect and its application].

Kholodil'naya tekhnika – Refrigeration engineering, 1953, no. 3, pp. 63–66. (In Russian).

25. Merkulov, A. P. *Vikhrevoy effekt i ikh primeneniye v tekhnike* [Vortex effect and its application in technology]. Moscow, Mashynobuduvannya Publ., 1969. 184 p. Available at: <https://djvu.online/file/qxjsOEGhx3vR1>. (accessed 12.12.2024) (In Russian).

26. Hartnett, J. P., & Eckert, E. R. G. Experimental study of the velocity and temperature distribution in a high-velocity vortex-type flow. *Journal of fluids engineering*, 1957, vol. 79, no. 4, pp. 751–758. DOI: 10.1115/1.4013144.

27. Colgate, S. A., & Buchler, J. R. Coherent transport of angular momentum: the Ranque-Hilsch tube as a paradigm. *Annals of the new york academy of sciences*, 2006, vol. 898, no. 1, pp. 105–112. DOI: 10.1111/j.1749-6632.2000.tb06166.x.

28. Trofimov, V. M. Physical effect in Ranque vortex tubes. *Journal of experimental and theoretical physics letters*, 2000, vol. 72, no. 5, pp. 249–252. DOI: 10.1134/1.1324021.

29. Alimov, R. Z. Flow friction and heat and mass transfer in a swirled flow. *Journal of engineering physics*, 1966, vol. 10, no. 4, pp. 251–257. DOI: 10.1007/bf00837815.

30. Arbuzov, V. A., & et al. Observation of large-scale hydrodynamic structures in a vortex tube and the Ranque effect. *Technical physics letters*, 1997, vol. 23, no. 12, pp. 938–940. DOI: 10.1134/1.1261939.

31. Parulekar, B. The short vortex tube. *Journal of refrigeration*, 1961, vol. 4, pp. 74–80.

32. Shannak, B. A. Temperature separation and friction losses in vortex tube [Text] / Benbella A. Shannak // Heat and mass transfer. – 2003. – Vol. 40, no. 10. – P. 779–785. DOI: 10.1007/s00231-003-0485-1.

33. Arjomandi, M., & Xue, Y. P. *An investigation on the effect of the hot end plugs on the efficiency of the Ranque-Hilsch vortex tube*. New trends in fluid mechanics research. Berlin, Heidelberg, 2007. 505 p. DOI: 10.1007/978-3-540-75995-9_168.

34. Aljuwayhel, N. F., Nellis, G. F., & Klein, S. A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model. *International journal of refrigeration*, 2005, vol. 28, no. 3, pp. 442–450. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2004.04.004.

35. Hamoudi, A. F., Fartaj, A., & Rankin, G. W. Performance characteristics of a microscale Ranque-Hilsch vortex tube. *Journal of fluids engineering*, 2008, vol. 130, no. 10. DOI: 10.1115/1.2969442.

36. Kurosaka, M., & Goodman, J. Ranque-Hilsch effect revisited - Temperature separation traced to orderly spinning waves or 'vortex whistle'. *3rd joint thermophysics, fluids, plasma and heat transfer conference*,

St. Louis, MO, U.S.A., Reston, Virginia, 1982. DOI: 10.2514/6.1982-952.

37. Chu, J. Q. *Acoustic streaming as a mechanism of the Ranque-Hilsch effect: PhD Thesis*. University of Tennessee, 1982. Available at: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/4215. (accessed 15.02.2025).

38. Kurosaka, M. Vortex whistle - An unsteady phenomenon in swirling flow and its effects on steady flow field. *19th aerospace sciences meeting*, St. Louis, MO, U.S.A., Reston, Virginia, 1981. DOI: 10.2514/6.1981-212.

39. Kuroda, H. *An experimental study of temperature separation in swirling flow: PhD Thesis*. University of Tennessee, 1983. Available at: https://trace.tennessee.edu/utk_graddiss/3234. (accessed 12.12.2024).

40. Rakowski, W. J., & Ellis, D. H. *Experimental analysis of blade instability*. General Electric Company Rep. for F 33615-76-C- 2035 to Air Force Propulsion Lab. WPAFB, 1978. 67 p.

41. Rakowski, W., Ellis, D., & Bankhead, H. A research program for the experimental analysis of blade instability. *14th joint propulsion conference: AIAA 1978-1089*. 1978.

42. Amitani, T., Adachi, T., & Kato T. A study on temperature separation in a large vortex tube. *JSME, transactions*, 1983, vol. 49, no. 440B, pp. 877–884.

43. Baker, P. S., & Rathkamp, W. R. *Investigations on the Ranque-Hilsch (vortex) tube*. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1954. DOI: 10.2172/4402223.

44. Gulyaev, A. I. Investigation of conical vortex tubes. *Journal of engineering physics*, 1966, vol. 10, no. 3, pp. 193–195. DOI: 10.1007/bf00832624.

45. Collins, R. L., & Lovelace, R. B. Experimental study of two-phase propane expanded through the Ranque-Hilsch tube. *Journal of heat transfer*, 1979, vol. 101, no. 2, pp. 300–305. DOI: 10.1115/1.3450964.

46. Marshall, J. Effect of operating conditions, physical size and fluid characteristics on the gas separation performance of a Linderstrom-Lang vortex tube. *International journal of heat and mass transfer*, 1977, vol. 20, no. 3, pp. 227–231. DOI: 10.1016/0017-9310(77)90209-5.

47. Takahama, H., & et al. Performance characteristics of energy separation in a steam-operated vortex tube. *International journal of engineering science*, 1979, vol. 17, no. 6, pp. 735–744. DOI: 10.1016/0020-7225(79)90048-x.

48. Aydin, O., & Baki, M. An experimental study on the design parameters of a counterflow vortex tube. *Energy*, 2006, vol. 31, no. 14, pp. 2763–2772. DOI: 10.1016/j.energy.2005.11.017.

49. Kirmaci, V. Exergy analysis and performance of counter flow vortex tube. *International journal of refrigeration*, 2009, vol. 32, pp. 1626–1633.

50. Han, X., & et al. The influence of working gas characteristics on energy separation of vortex tube. *Applied thermal engineering*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 171–177. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2013.07.027.
51. Bezprozvannykh, V. & Mottl, H. *The Ranque-Hilsch effect: CFD modeling*. DYCOR technologies, Canada, 1999.
52. Khazaei, H., & Malek-Jafarian, M. Effects of gas properties and geometrical parameters on performance of a vortex tube. *Scientia iranica*, 2012, vol. 19, no. 3, pp. 454–462. DOI: 10.1016/j.scient.2012.03.003.
53. Farouk, T., Farouk, B., & Gutsol, A. Simulation of gas species and temperature separation in the counter-flow Ranque–Hilsch vortex tube using the large eddy simulation technique. *International journal of heat and mass transfer*, 2009, vol. 52, no. 13-14, pp. 3320–3333. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.01.016.
54. Pinar, A. M., Uluer, O., & Kırmacı, V. Optimization of counter flow Ranque–Hilsch vortex tube performance using Taguchi method. *International journal of refrigeration*, 2009, vol. 32, no. 6, pp. 1487–1494. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2009.02.018.
55. Polat, K., & Kırmacı, V. Application of the output dependent feature scaling in modeling and prediction of performance of counter flow vortex tube having various nozzles numbers at different inlet pressures of air, oxygen, nitrogen and argon. *International journal of refrigeration*, 2011, vol. 34, no. 6, pp. 1387–1397. DOI: 10.1016/j.ijrefrig.2011.03.019.
56. Baghdad, M., Ouadha, A., & Addad, Y. CFD modelling and exergy analysis of a vortex tube using CO₂ as working fluid. *10th iir-gustav lorentzen conference on natural working fluids*, Delft, 2012.
57. Thakare, H. R., & Parekh, A. D. CFD analysis of energy separation of vortex tube employing different gases, turbulence models and discretisation schemes. *International journal of heat and mass transfer*, 2014, vol. 78, pp. 360–370. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.06.083.
58. Stephan, K., Lin, S., Durst, M., Huang, F., & Seher, D. An investigation of energy separation in a vortex tube. *International journal of heat and mass transfer*, 1983, vol. 26, no. 3, pp. 341–348. DOI: 10.1016/0017-9310(83)90038-8.
59. Zaslavskii, B. I., & Yur'ev, B. V. Flow structure in a flat vortex chamber. *Journal of applied mechanics and technical physics*, 1998, vol. 39, no. 1, pp. 73–77. DOI: 10.1007/bf02468000.
60. Floryan, J. M., & Saric, W. S. Stability of gortler vortices in boundary layers. *AIAA journal*, 1982, vol. 20, no. 3, pp. 316–324. DOI: 10.2514/3.51076.
61. Ahlborn, B., & Groves, S. Secondary flow in a vortex tube. *Fluid dynamics research*, 1997, vol. 21, no. 2, pp. 73–86. DOI: 10.1016/s0169-5983(97)00003-8.
62. Hu, Z., & et al. Energy separation for Ranque–Hilsch vortex tube: a short review. *Thermal science and engineering progress*, 2020, vol. 19, article no. 100559. DOI: 10.1016/j.tsep.2020.100559.
63. Ahlborn, B. K., & Gordon, J. M. The vortex tube as a classic thermodynamic refrigeration cycle. *Journal of applied physics*, 2000, vol. 88, no. 6, pp. 3645–3653. DOI: 10.1063/1.1289524.
64. Manimaran, R. Computational analysis of flow features and energy separation in a counter-flow vortex tube based on number of inlets. *Energy*, 2017, vol. 123, pp. 564–578. DOI: 10.1016/j.energy.2017.02.025.
65. Kandil, H. A., & Abdelghany, S. T. Computational investigation of different effects on the performance of the Ranque–Hilsch vortex tube. *Energy*, 2015, vol. 84, pp. 207–218. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.089.
66. Xue, Y., Arjomandi, M., & Kelso, R. Visualization of the flow structure in a vortex tube. *Experimental thermal and fluid science*, 2011, vol. 35, no. 8, pp. 1514–1521. DOI: 10.1016/j.expthermflusci.2011.07.001.
67. Liu, X., & Liu, Z. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube. *Applied thermal engineering*, 2014, vol. 67, no. 1-2, pp. 494–506. DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.071.
68. Karpenko, A., & Kukhtin, Y. Study of the total temperature redistribution in the complex swirling flows. *ASME turbo expo 2024: turbomachinery technical conference and exposition*, London, United Kingdom, 24–28 June 2024. 2024. DOI: 10.1115/gt2024-120961.
69. Van Deemter, J. J. On the theory of the Ranque–Hilsch cooling effect. *Applied scientific research*, 1952, vol. 3, no. 3, pp. 174–196. DOI: 10.1007/bf03184927.
70. Reynolds, A. J. Energy flows in a vortex tube. *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP*, 1961, vol. 12, no. 4, pp. 343–357. DOI: 10.1007/bf01591284.
71. Bruun, H. H. Experimental investigation of the energy separation in vortex tubes. *Journal of mechanical engineering science*, 1969, vol. 11, no. 6, pp. 567–582. DOI: 10.1243/jmes_jour_1969_011_070_02.
72. Ahlborn, B., & et al. Limits of temperature separation in a vortex tube. *Journal of physics D: applied physics*, 1994, vol. 27, no. 3, pp. 480–488. DOI: 10.1088/0022-3727/27/3/009.
73. Ahlborn, B., Camire, J., & Keller, J. U. Low-pressure vortex tubes. *Journal of physics D: applied physics*, 1996, vol. 29, no. 6, pp. 1469–1472. DOI: 10.1088/0022-3727/29/6/009.
74. Lewins, J., & Bejan, A. Vortex tube optimization theory. *Energy*, 1999, vol. 24, no. 11, pp. 931–943. DOI: 10.1016/s0360-5442(99)00039-0.
75. Kotelnikov, V., & et al. Large scale vortex tubes (LSVT) in a heat generation. *Energy, environment, eco-*

systems, development and landscape architecture, 2000, pp. 39–44.

76. Mischner, J., & Bespalov, V. I. Zur Entropie-

produktion im Ranque-Hilsch-Rohr. *Forschung im Ingenieurwesen*, 2002, vol. 67, no. 1, pp. 1–10. DOI: 10.1007/s10010-002-0070-7.

Надійшла до редакції 15.08.2025, розглянута на редколегії 22.09.2025

THEORIES OF THE RANQUE EFFECT: STATE-OF-THE-ART CRITICAL REVIEW

Artem Karpenko

The primary objective of this review article is to systematize and critically analyze the main existing theories that attempt to explain the causes and mechanisms of the Ranque vortex effect (the temperature separation phenomenon in a rotating flow). This study examines hypotheses based on the influence of pressure, viscosity, turbulence, secondary circulation, free and forced vortices, convective heat transfer, fluid compressibility, acoustic wind, work of inertia forces, Görtler vortices, and the Maxwellian distribution of molecular velocities on the energy separation of the rotational flow. Despite the abundance of theoretical models, there is currently no universally accepted proof that any of these mechanisms is definitive in the energy separation process within the Ranque–Hilsch tube. A review of the scientific literature reveals that the most frequently cited theoretical models of temperature separation in the vortex tube include secondary circulation (Ahlborn), adiabatic compression and expansion (Ranque), internal friction (Hilsch), free and forced vortex model (Kassner and Knoernschild). Other hypotheses receive significantly less support and validation from scientific sources. This situation highlights the need for further research aimed at experimental and numerical verification of the leading theories to establish their credibility and clarify the mechanisms of energy separation. Interestingly, the theories that have received the most support in the literature are Kassner’s free and forced vortex model and Ahlborn’s secondary circulation concept, despite being based on different physical principles and lacking mutual consistency. Such diverse and sometimes contradictory conclusions from individual studies underscore the complexity of the vortex effect and point to the need for deeper and more systematic experimental and theoretical investigations to adequately describe the physical processes occurring within the vortex tube. A generalized theory must be developed to explain the mechanisms of temperature separation in the Ranque tube – one that is recognized by the scientific community and not limited by the geometric parameters of the vortex tube or its operating conditions.

Keywords: vortex tube; Ranque-Hilsch tube; total temperature separation; energy separation; vortex effect; Ranque effect; Ranque-Hilsch effect; Maxwell’s demon.

Карпенко Артем Михайлович – аспірант, Національний аерокосмічний університет «Харківський авіаційний інститут», Харків; провідний інженер, Акціонерне товариство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Artem Karpenko – PhD Student, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv; Lead Engineer, Joint-Stock Company “Ivchenko-Progress”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: karpenkoarty@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2200-694X.