

УДК 621.44.533.697

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.14

А. М. КАРПЕНКО

Акціонерне товариство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

ОГЛЯД ЧИСЕЛЬНИХ МЕТОДІВ ДЛЯ МОДЕЛЮВАННЯ СЕПАРАЦІЇ ПОТОКУ ЗА ТЕМПЕРАТУРОЮ У ЗАКРУЧЕНИХ ТЕЧІЯХ РІДИНИ

Основна мета цієї статті - представити узагальнений огляд методів, що використовуються для чисельного аналізу процесу сепарації потоку за повною температурою у вихрових трубах Ранка-Гільша за допомогою обчислювальної гідродинаміки (CFD). Основну увагу приділено дослідженням, які підтверджуються експериментальними даними й оцінюються авторами як такі, що добре узгоджуються з експериментальними результатами. У публікації представлено короткий вступ до предмету дослідження, після чого подано стислу ретроспективу попередніх напрацювань і пов'язаних з ними викликів. Представлено узагальнені тенденції в чисельному аналізі вихрових труб. Висновки сформульовано на основі найновіших, а також проаналізованих раніше опублікованих результатів CFD досліджень. Дослідники течій у вихрових трубах зазвичай використовують як тривимірні, так і двовимірні осесиметричні моделі. Автори неодноразово робили висновок, що жодна з доступних моделей турбулентності не може бути реалізована для точного представлення складної динаміки рідини всередині вихрової труби. Незважаючи на це, для моделювання турбулентних явищ часто успішно застосовують стандартну модель турбулентності $k-\epsilon$, яку можна розглядати як базову модель для оцінки характеристик вихрових труб. Ця модель хоч і не позбавлена недоліків, однак за її допомогою може бути отримано досить точне узагальнене уявлення про розподіл ключових параметрів із задовільною точністю та без необхідності додаткового калібрування моделі.

Більшість розглянутих моделей турбулентності занижують (різною мірою в кожному окремому випадку) рівень сепарації потоку за повною температурою у вихровій трубі Ранка-Гільша. Підвищення точності розрахунків температурної сепарації можливе за допомогою більш складних моделей, наприклад, вихоророзв'язуючих моделей LES. Але ці моделі, через свою вимогливість до обчислюваних ресурсів та часу, необхідного для розрахунків, все ще не є щоденним інструментом інженерів-проектувальників. Для повного та достовірного моделювання течії у вихровій трубі сьогодні, як і раніше, потрібна більш точна (за існуючі) модель турбулентності.

Ключові слова: вихрова труба; розділення енергії; сепарація за повною температурою; вихровий ефект; ефект Ранка-Гільша; CFD; модель турбулентності.

Вступ

Згідно з першим законом термодинаміки, повна енергія в замкнутій системі зберігається. З цього випливає, що потік газу, який не здійснює механічної роботи і не бере участі в теплообміні з навколишнім середовищем, зберігає свою повну енергію. Однак це не виключає можливості виникнення в потоці зон із повною енергією (повною температурою), що більша або менша від певних початкових (середніх) значень.

Ще на початку XX століття французький інженер Ж. Ранк (J. Ranque) виявив ефект температурної сепарації газів у закручених потоках [1] і запатентував пристрій, названий ним «вихровою трубкою», у якому здійснив розділ потоку стисненого повітря на два потоки - холодний і гарячий [2]. У 1937 році радянський вчений К. Страхович, не знаючи про досліді Ранка, у курсах лекцій з прикладної газодинаміки теоретично доводив, що в потоках газу, які обертаються, мають виникати неоднорідності повної питомої енергії [3]. У 1942 році Eckert і Weise [4] у своїх

експериментах отримали значну нерівномірність розподілу температури газу поверхнею теплоізованого циліндра, встановленого поперек газового потоку.

Після Другої світової війни дедалі більша кількість дослідників експериментально підтверджували можливість перерозподілу повної температури (енергії) в енергоізованих системах у різних галузях прикладної фізики. У 1954 році Sprenger [5] виявив значне підвищення температури поблизу глухого кінця порожнини, до якої був спрямований недорозширений газовий струмінь. У 1986 році Goldstein [6] повідомив про перерозподіл повної температури в недорозширеному струмені, що витікає в навколишнє середовище. Carscallen [7] експериментально фіксував нерівномірні розподіли полів повної температури в слідах за турбінними лопатками з товстою вихідною кромкою. Дейч [8] у своїй монографії дійшов висновку, що незмінність повної ентальпії в загальному випадку не є інтегралом рівняння енергії для всієї маси рідини, оскільки в потоці утворюється місцевий



перерозподіл енергії, з чого випливає, що в потоках рідини, відмінних від одновимірних, можливий перерозподіл повної температури.

Зазначені явища, що стосуються перерозподілу повної енергії газових потоків, які не виконують механічної роботи і не беруть участі в теплообміні з навколишнім середовищем, заведено називати енергетичним розділенням чи сепарацією [9,10].

На думку автора, більшість згаданих вище явищ енергетичного розділення мають одну природу з явищем сепарації потоку за повною температурою, яке яскраво присутнє у вихровій трубі Ранка-Гільша (Ranque—Hilsch). Попри технічну простоту вихрової труби, досі немає загальновизнаного пояснення причин розділу енергії в ній. Різні, часом протилежні висновки досліджень свідчать про необхідність проведення більш глибоких і ретельних досліджень для кращого розуміння складного процесу енергорозділення у вихровій трубі.

Основною частиною базової вихрової труби є порожній циліндр, в який тангенціально подається стиснене повітря або інша рідина. Виходи, встановлені на одному або обох кінцях труби, дозволяють виводити гаряче і холодне повітря. Гаряче сопло розташоване на периферії, а холодне - на осевій лінії труби. У вихрових трубах з протитечією обидва виходи розташовані на протилежних кінцях труби, а в вихрових трубах з однонаправленим потоком обидва виходи розташовані на одному кінці труби.

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

Механізм роботи вихрових труб Ранка-Гільша можна описати наступним чином. Коли стиснене повітря нагнітається в трубу з тангенціального входу, воно утворює високо 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 в вихровій трубі з протитечією, виходить з холодного сопла при більш низькій температурі, ніж температура повітря, що подається. В трубі з однонаправленим потоком гаряче повітря і холодне повітря виходять з периферійного зазору і центрального сопла, відповідно, з одного і того ж кінця труби. Таким чином, інжектований потік повітря розділяється на два потоки з різними температурами.

Рис. 2 схематично демонструє основні особливості течії та гіпотетичну структуру потоку у вихровій трубі Ранка-Гільша з протитечією. З рисунка видно який складний характер має течія у вихрових трубах, через що чисельне моделювання процесів в трубах Ранка-Гільша є справжнім викликом для дослідників та інженерів.

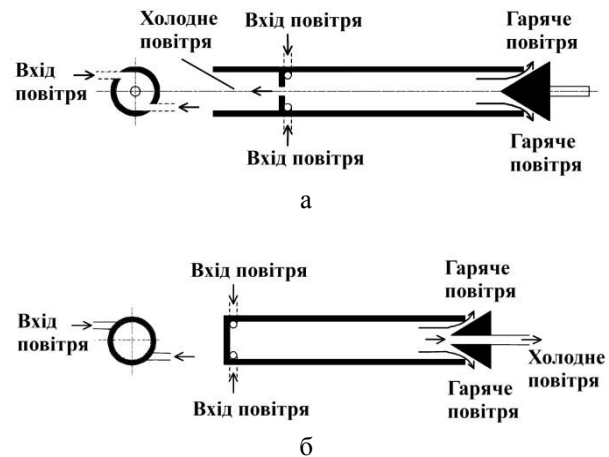


Рис. 1. Схематичне зображення (перероблене з [11]) конструкції та принципу роботи вихрової труби Ранка-Гільша:

а – вихрова труба з протитечією,

б – вихрова труба з однонаправленим потоком

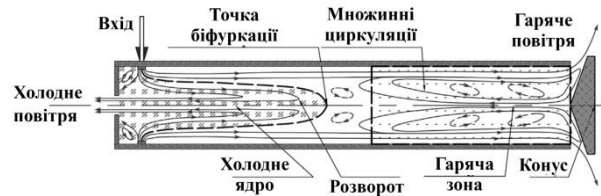


Рис. 2. Структура потоку у вихровій трубі Ранка-Гільша з протитечією (перероблено з [12])

Метою даної публікації є проведення огляду різних методів чисельного аналізу (за допомогою обчислювальної гідродинаміки - CFD), що використовуються для аналізу течій у вихровій трубі Ранка-Гільша, та оцінки їх відповідності експериментальним результатам.

На думку автора, висновки, зроблені за результатами проведеного аналізу, будуть цікаві не тільки фахівцям, які вивчають явища сепарації потоку за повною температурою в трубі Ранка-Гільша, а й ширшому колу дослідників і вчених, що займаються питаннями енергетичного розділення.

Складнощі пов'язані з чисельним CFD аналізом течії у вихрових трубах

CFD-моделювання течії у вихровій трубі Ранка-Гільша являє собою складне завдання через її стискість, турбулентність і високу завихреність. Більше того, експериментальні вимірювання внутрішніх полів швидкості і температури, необхідні для верифікації чисельних методів, часто вважаються такими, що

дуже важко реалізувати [13]. Через безліч недовивчених фізичних характеристик, що взаємодіють одна з одною, реальна течія у вихровій трубі є дуже складною і включає рециркуляцію, завихрення і розділення температур, виникнення яких не може бути чітко описано [14]. Найбільш примітні дані про попередні спроби чисельно дослідити течію в трубі Ранка-Гільша, наведені в [11] та представлені в таблиці 1. Вищезазначені дані являють собою ретроспективний погляд на розрахункові методи, які використовували для досліджень вихрового ефекту.

З наведених даних випливає, що прогрес у CFD, а також експоненціальне зростання доступних обчислювальних ресурсів забезпечили основу для детального чисельного аналізу зазначеного явища енергетичної сепарації. Проте складна поведінка високошвидкісної рідини всередині вихрової труби, а також відсутність повної загально визнаної теорії, пояснюючої сепарацію потоку за температурою в трубі Ранка-Гільша, досі обмежують можливості точного чисельного моделювання даного ефекту сепарації у вихровій трубі.

Таблиця 1

Чисельні дослідження вихрових труб до 2006 року

Дослідники	Досліджувана течія	Модель турбулентності	Метод чи програмне забезпечення	Результати у порівнянні з експериментом
Linderstrom-Lang (1971)	нестискаєма	алгебраїчна модель	функція струменю	погані, відтворюють тільки тренд
Schlenz (1982)	2D стискаєма	алгебраїчна модель	метод Гальоркіна	погані, відтворюють якісно тренд
Amitani та інші (1983)	2D стискаєма	—	метод скінченних різниць	задовільні, але припущення викликають сумнів
Борисов та інші (1993)	нестискаєма	—	поле швидкості, індукване гвинтовим вихором	якісно узгоджуються
Guston and Bakken (1999)	2D стискаєма	k-ε	код Fluent	досить добрі
Frohlingsdorf and Unger (1999)	2D стискаєма	k-ε	код CFX	досить добрі
Promvonge (1999)	2D стискаєма	ASM та k-ε	метод скінченних об'ємів	добрі
Behera та інші (2005)	3D стискаєма	k-ε та RNG k-ε	код Star-CD	досить добрі
Aljuwayhel та інші (2005)	2D стискаєма	k-ε та RNG k-ε	код Fluent	досить добрі
Skye та інші (2006)	2D стискаєма	k-ε та RNG k-ε	код Fluent	досить добрі
Eiamsa-ard та Promvonge (2006)	2D стискаєма	ASM та k-ε	метод скінченних об'ємів	добрі

Нещодавні здобутки у CFD моделюванні течії у вихрових трубах

Багато дослідників повідомляють про непогану кореляцію між експериментальними та чисельними даними навіть при використанні традиційної методології CFD.

Sadeghiadz та Rafiee [15] провели експериментальні та розрахункові дослідження з метою визначити ефект від використання дросельної заслінки з усіченим конусом і кількості соплових отворів. Було проведено численні вимірювання за різного тиску повітря на вході, що дало змогу стверджувати, що методи CFD, використані для оптимізації геометрії, можуть бути ефективно використані для оцінки харак-

теристик вихрової труби. Чисельне дослідження проводилося шляхом повного тривимірного CFD-моделювання стискаємої рідини на стаціонарному режимі роботи труби з використанням коду Ansys Fluent, при цьому для розв'язування рівнянь течії використовувалася стандартна модель турбулентності k-ε. Було встановлено хорошу кореляцію між чисельними та експериментальними результатами, при цьому відхилення розрахункових та вимірних значень різниці температур повітря на вході і холодному виході не перевищувало 4,2%.

Альохін та ін. [16] провели велике чисельне дослідження двоконтурної вихрової труби Ранка-Гільша, застосували й протестували кілька моделей турбулентності (k-ε, k-ε RNG, SAS-SST, RSM-LRR і

LES) з використанням тривимірної моделі для розв'язання стаціонарного стискаемого потоку в Ansys CFX. Результати показують, що модель турбулентності LES краще описує вихровий потік повітря порівняно з іншими моделями турбулентності, тоді як модель турбулентності SAS-SST можна розглядати як компроміс між обчислювальною ефективністю та точністю. Також було встановлено, що стандартні $k-\epsilon$ і RNG $k-\epsilon$ моделі, які часто використовуються для чисельного аналізу вихрових труб, мають найгіршу серед розглянутих моделей точність прогнозування поділу температури.

Khait та ін. [17] запропонували використовувати напівемпіричну модель турбулентності для підвищення точності моделювання течії у вихрових трубах. Було показано, що запропонована чисельна модель покращує якісну та кількісну збіжність змодельованого коефіцієнта енергетичної ефективності вихрової труби з експериментальними даними та підвищує точність прогнозування ефекту енергетичної сепарації у трубці Ранка-Гільша. Однак для того, щоб продемонструвати застосовність моделі для різних вихрових труб, що працюють у різних умовах, необхідне калібрування емпіричних коефіцієнтів. Відповідаючи всім вимогам, модель рекомендується для моделювання двовимірних і тривимірних стискаємих потоків. Використовуючи стандартну $k-\epsilon$ модель турбулентності, пропонується чисельна модель потребує менших обчислювальних потужностей, у порівнянні з моделями LES і RSM. Це дає змогу проводити велику кількість симуляцій та оптимізаційних розрахунків.

Bovand та ін. [18, 19] провели чисельні дослідження впливу кривизни на характеристики вихрових труб для кутів кривизни 0 (пряма вихрова труба) і 110°. Результати чисельного дослідження були перевірені шляхом порівняння з експериментальними даними. Для чисельного дослідження використовувалася тривимірна модель і модель турбулентності RNG $k-\epsilon$. Для розв'язання керуючих рівнянь використовувався програмний код Fluent. Результати показують, що ефективність прямої вихрової труби вища, ніж вигнутої вихрової труби з кутом 110°. Автори стверджують, що фактичні значення і результати CFD-моделі вказують на те, що CFD-модель можна успішно використати для визначення ефективності нагріву та охолодження внаслідок впливу кривизни на вихрову трубу Ранка-Гільша.

Liu, X. та Liu, Z. [20] провели ретельне чисельне дослідження з метою визначення характеристик потоку та основних причин температурної сепарації потоку всередині вихрової труби. Для аналізу механізму та відображення внутрішньої течії всередині вихрової труби було проведено тривимірне чисельне моделювання. Для цього CFD результати спочатку

було перевірено на відповідність заміряним даним, отриманим на випробувальних стендах. Під час чисельного дослідження застосовували кілька моделей турбулентності (RSM, Realizable $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, Standard $k-\epsilon$, SST $k-\omega$), а результати було задокументовано й оцінено. Модель турбулентності Realizable $k-\epsilon$ обрали як найбільш раціональний підхід із погляду точності та вартості обчислень. Результати розрахунків виявилися близькими до експериментальних даних, тому автори стверджують, що розглянуту CFD-модель можна використовувати як потужний інструмент не тільки для оптимізації конструкції вихрової труби, а й для відтворення складної течії всередині вихрової труби з метою отримання детального уявлення про поведінку вихору.

Mohammadi та Farhadi [21] представили результати експериментального та чисельного дослідження ефективності розділення потоку за повною температурою у вихровій трубці. Основною метою дослідження було вивчення ефективності енергорозділення у вихровій трубці вуглеводневої суміші. Для чисельного дослідження використовувалася 2D модель, із застосуванням стандартної $k-\epsilon$ моделі турбулентності. Керуючі рівняння для стаціонарного розрахунку стискаемого потоку були розв'язані за допомогою коду Ansys Fluent. Робоча рідина мала характеристики газової суміші з відносно невеликою різницею молекулярних мас компонентів. Автори стверджують, що результати CFD-моделювання добре узгоджуються з експериментальними даними.

Bej та Sinhamahapatra у роботі [22] представили результати серії чисельних розрахунків, проведених з використанням стандартної моделі турбулентності $k-\epsilon$, з упором на аналіз ексергії на другому ступені вихрової труби для різних фракцій холодного повітря. Результати чисельного дослідження порівнювалися з експериментальними даними, щоб оцінити достовірність чисельної моделі. Для чисельного аналізу в Ansys Fluent було використано 2D осесиметричну модель. Автори стверджують, що результати розрахунків моделі добре узгоджуються з експериментальними даними, та констатують, що її можна з упевненістю використовувати для дослідження характеристик вихрових труб.

Kandil і Abdelghany [23] представили результати чисельного CFD дослідження вихрової труби Ранка-Гільша. Дослідження проводилося в кореляції з експериментальними даними, представленими в окремій роботі, з метою оптимізації характеристик вихрової труби з використанням декількох підходів. Досліджувалась 2D осесиметрична модель з використанням коду Ansys Fluent. Результати CFD-моделі вихрової труби з використанням стандартної моделі турбулентності $k-\epsilon$ показали найкращу узгодженість з експериментальними результатами. Оптимізацію

проводили щодо співвідношення діаметрів холодного отвору і труби, а також впливу додаткових охолоджених ребер, розташованих на стінці вихрової труби. Отримані результати, як стверджують автори, добре узгоджуються з експериментальними замінками.

Thakare та Parekh [24] опублікували роботу, спрямовану на представлення CFD-дослідження вихрової труби, яке було проведене для отримання розуміння впливу теплофізичних властивостей різних газів, таких як теплопровідність, число Прандтля, питома газова постійна і моделей турбулентності, на продуктивність трубки Ранка-Гільша. На думку авторів 2D осесиметрична модель є найбільш доцільною до використання, оскільки дає змогу скоротити обчислювальні зусилля, але при цьому зберігає тривимірні особливості розрахункової області. Сепарація енергії спостерігалася для восьми різних газів як робочої рідини. Чисельне моделювання вихрової труби було зроблено для того, щоб зрозуміти вплив різних робочих рідин і різних моделей турбулентності на сепарацію енергії всередині вихрової труби. Для того щоб зрозуміти складну природу сильно стискаємого, турбулентного і вихрового потоку всередині вихрової труби, були використані різні моделі турбулентності, а саме: однопараметрична модель Spalart-Allmaras, та двопараметричні моделі: стандартна $k-\epsilon$ і стандартна $k-\omega$. Результати чисельного моделювання порівнювались з наявними експериментальними даними. Було помічено, що відхилення в прогнозі загальної температури повітря в холодній ділянці, а також інших параметрів потоку в разі стандартної $k-\epsilon$ моделі турбулентності, використовуваної з QUICK схемою, перебуває в межах припустимого діапазону (на відміну від інших розглянутих моделей), що робить її придатною для цілей проектування й аналізу вихрових труб.

Secchiaroli та ін. [13] опублікували результати чисельного моделювання внутрішньої течії в комерційній моделі вихрової труби Ранка-Гільша. Моделювання турбулентного, стискаємого, сильно завихреного потоку проводилося з використанням методів RANS і LES. RANS моделювання проводилося на 2D осесиметричній розрахунковій області, а LES - на тривимірній розрахунковій моделі, щоб уникнути накладення симетрії на турбулентні структури. Усі розрахунки проводилися з використанням програми Ansys Fluent. Вплив різних моделей турбулентності було перевірено в RANS- розрахунках з використанням моделі першого порядку RNG $k-\epsilon$ і, як стверджується, вперше для такого типу течії, моделі другого порядку RSM. Розрахунки RANS були виконані на осесиметричній 2D сітці, і результати порівнювались з результатами LES, отриманими на 3D розрахунковій сітці. Результати в різних перерізах труби

показують значні відмінності в профілях швидкості, температури і вторинних вихрових структурах, при використанні різних моделей турбулентності.

Pourmahmoud та ін. [25] представили результати дослідження впливу спіральних сопел на процеси розділення енергії та охолодження у вихорі Ранка-Гільша за допомогою методів чисельного аналізу. Стандартна модель турбулентності $k-\epsilon$ була застосована для аналізу поля складного потоку, що сильно обертається. CFD-моделі ґрунтувалися на окремо отриманих експериментальних результатах. Розглянута вихрова труба була оснащена шістьма прямими соплами, і систему досліджували залежно від різних геометричних параметрів, таких як довжина труби. У всіх тривимірних CFD-моделях моделювалася стискаєма і повністю турбулентна течія рідини всередині вихрової труби, щоб реалізувати особливості течії, а також процеси нагріву або охолодження у трубі. Деякі з чисельних результатів були підтверджені наявними експериментальними даними вихрової труби, з якими вони добре узгоджувались.

Dutta та ін. [26] провели порівняння моделей турбулентності з використанням 2D осесиметричної CFD моделі з метою вибору кращої моделі турбулентності для моделювання явищ течії у вихровій трубі з оптимальними обчислювальними витратами. У представленому дослідженні використовувалися моделі турбулентності: стандартна $k-\epsilon$, RNG $k-\epsilon$, стандартна $k-\omega$ і SST $k-\omega$. Криві ефективності (залежності температури гарячого і холодного виходу від масової частки гарячого повітря), отримані за допомогою цих моделей турбулентності, порівнювались з експериментальними результатами. Аналіз характеристик показав, що серед усіх моделей турбулентності, досліджених у даній роботі, температурна сепарація потоку, спрогнозована стандартною $k-\epsilon$ моделлю турбулентності, є ближчою до експериментальних результатів. Однак слід зазначити, що жодна з моделей турбулентності не змогла точно змоделювати турбулентну завихрену течію всередині вихрової труби і точно визначити різницю повних температур холодного та гарячого повітря.

Матвеев та ін. [27] і Bo-Wei Lyu та ін. [28] окремо один від одного провели валідацію розрахункового коду Siemens STAR-CCM+ (але дослідники використовували різні версії цього програмного забезпечення) щодо можливості його використання для оцінки ефективності вихрових труб. Валідація проводилась шляхом порівняння розрахункових результатів з експериментальними даними. Для валідації були використані результати експериментальних продувок вихрової труби з протитечією, опубліковані у роботі [29]. Матвеев та ін. [27] досліджували три моделі турбулентності: стандартна $k-\epsilon$, SST $k-\omega$ та RST.

Bo-Wei Lyu та ін. [28] тестували наступні моделі: стандартну $k-\epsilon$, стандартну $k-\omega$ та RST. В обидвох дослідженнях сепарація потоку за повною температурою (різниця температур на виході з холодного і гарячого сопел вихрової труби) отримана за допомогою стандартної $k-\epsilon$ моделі краще (за інші моделі) узгоджувалася з експериментальними даними.

Farouk T. та Farouk B. [30] чисельно досліджували сепарацію потоку за повною температурою у вихровій трубці Ранка-Гільша за допомогою моделі LES. Отримані CFD результати порівнювалися з опублікованими експериментальними результатами та розрахунковими результатами отриманими за допомогою стандартної $k-\epsilon$ моделі. Порівняння результатів сепарації за повною температурою для моделей $k-\epsilon$ та LES показало, що температурне розділення, спрогнозоване LES-моделлю, було ближчим до експериментальних результатів. Тим не менш, обидві моделі показували розмір температурної сепарації менший ніж був зафіксований у експерименті.

Devade [31] провів розрахунки вихрової труби з протитечією за допомогою трьох моделей турбулентності (стандартна $k-\epsilon$, Realizable $k-\epsilon$ та RNG $k-\epsilon$) та порівняв отримані результати з експериментальними даними. Порівнювалась різниця повних температур на холодному та гарячому виходах з вихрової труби. Усі три моделі знижували величину температурної сепарації, але модель Realizable $k-\epsilon$ давала результати ближчі до експериментальних ніж дві інші розглянуті моделі.

Інформація з розглянутих чисельних досліджень була узагальнена і представлена у таблиці 2.

Наведені дані демонструють загальні тенденції в підході до чисельного аналізу та оцінки ефективності вихрових труб. 2D осесиметричні та повні 3D моделі зазвичай використовуються з близькими за точністю результатами, а стандартна $k-\epsilon$ модель турбулентності є найбільш часто використовуваною моделлю для дослідження вихрових труб.

Таблиця 2

Сучасні чисельні дослідження вихрових труб

Дослідники	Програмне забезпечення	Геометрична модель	Запропонована розрахункова модель	Сепарація повної температури у порівнянні з експериментом
Farouk T., Farouk B. (2007)	CFD-ACE+	3D	LES	знижена
Secchiaroli та інші (2009)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	RNG $k-\epsilon$	—
Dutta та інші (2010)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	Standard $k-\epsilon$	знижена
Pourmahmoud та інші (2012)	ANSYS Fluent	3D	Standard $k-\epsilon$	знижена
Bovand та інші (2014a)	ANSYS Fluent	3D	RNG $k-\epsilon$	знижена
Khait та інші (2014)	ANSYS Fluent	3D	standard $k-\epsilon$ (з додатковим калібруванням)	знижена
Rafiee, Sadeghiazad (2014)	ANSYS Fluent	3D	Standard $k-\epsilon$	знижена
Liu, X., Liu, Z. (2014)	ANSYS Fluent	3D	Realizable $k-\epsilon$	знижена (окрім моделі RSM)
Mohammadi, Farhadi (2014)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	Standard $k-\epsilon$	—
Bej, Sinhamahapatra (2014)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	Standard $k-\epsilon$	знижена
Thakare, Parekh (2014)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	Standard $k-\epsilon$	знижена
Альохін та інші (2014)	ANSYS CFX	3D	LES, SAS-SST	знижена
Kandil, Abdelghany (2015)	ANSYS Fluent	2D осесиметрична	Standard $k-\epsilon$	переважно знижена (залежить від долі холодного повітря)
Devade (2018)	ANSYS Fluent	3D	Realizable $k-\epsilon$	знижена
Матвєєв та інші (2019)	Siemens STAR-CCM+	3D	Standard $k-\epsilon$	знижена
Bo-Wei Lyu та інші (2024)	Siemens STAR-CCM+	3D	Standard $k-\epsilon$	знижена

Аналіз досліджень наведених у таблиці 2 показує, що зазвичай (окрім моделі RSM у роботі [20]) CFD розрахунки з використанням стаціонарних RANS моделей турбулентності занижують (різною мірою у кожному окремому випадку) очікуваний рівень сепарації потоку за повною температурою у вихровій трубі Ранка-Гільша. Використання нестационарних LES моделей дає незначне поліпшення точності розрахунків при більш ніж значному росту вимог до обчислюваних ресурсів та необхідного часу для розрахунків.

Висновки

Проведений аналіз методів та підходів до чисельного аналізу сепарації потоку за повною температурою у вихрових трубах засвідчує, що чисельне дослідження гідродинаміки у вихровій трубі все ще є проблемою, коли йдеться про точне представлення складного закрученого потоку рідини. Однак частково ця проблема вирішується завдяки більшій доступності обчислювальних ресурсів, що в поєднанні з більш трудомісткими, але більш точними CFD-моделями може призвести до кращої кореляції між експериментальними і розрахунковими даними. Проте відсутність надійної теоретичної бази, пов'язаної з вихровим ефектом Ранка-Гільша, обмежує можливості аналітичної оцінки характеристик закрученої течії газу.

Огляд останніх даних, отриманих під час чисельних досліджень вихрових труб, дає змогу зробити наступні висновки:

1. Дослідники зазвичай використовують як тривимірні, так і двовимірні осесиметричні моделі, причому осесиметричні моделі виграють завдяки меншим вимогам до обчислюваних ресурсів, а повні тривимірні моделі мають дещо вищу загальну точність.

2. Автори неодноразово робили висновок, що жодна з доступних моделей турбулентності не може бути реалізована для точного представлення складної динаміки рідини (наприклад, вторинних завихрень) усередині вихрової труби. Однак досить точне узагальнене уявлення про розподіл ключових параметрів може бути отримано із задовільною точністю і без необхідності додаткового калібрування моделей. Для таких випадків часто успішно застосовують стандартну модель турбулентності k-ε, яку можна розглядати як базову модель для оцінки характеристик вихрових труб.

3. Підвищення точності розрахунків сепарації потоку за повною температурою можна отримати за допомогою більш складних моделей, наприклад, LES. Використання для розрахунків нестационарних LES моделей дозволяє враховувати зміну параметрів потоку у часі та моделювати ефекти більш дрібних

масштабів руху всередині турбулентного потоку, але в розглянутих роботах автори схиляються до думки, що поліпшення точності з моделлю LES є незначним у порівнянні із стаціонарними RANS моделями, а вимоги до обчислюваних ресурсів та необхідного часу для розрахунків зростають суттєво.

4. Більшість моделей турбулентності занижують (різною мірою у кожному окремому випадку) рівень сепарації потоку за повною температурою у вихровій трубі Ранка-Гільша.

5. Для повного та достовірного моделювання течії у вихровій трубі сьогодні, як і раніше, потрібна більш точна (за існуючі) модель турбулентності.

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. J. *Experiments on expansion in a vortex with simultaneous exhaust of hot air and cold air* [Text] / G. J. Ranque // *Le journal de Physique et le Radium* (Paris). – 1933. – № 4. – P. 112–114.
2. Ranque, G. J. *Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two outputs of fluid at different temperatures* [Text] / G. J. Ranque // *US Patent US1952281A*. – 1934. – 7 p.
3. Страхович, К. И. *Прикладная газодинамика* [Текст] / К. И. Страхович. – Москва-Ленинград: ОНТИ, – 1937. – Т. 1. – 168 с.
4. Eckert, E. *Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper* [Text] / E. Eckert, & W. Weise // *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*. – 1942. – Vol. 13, iss. 6. – P. 246–254. doi: 10.1007/bf02585343.
5. Sprenger, H. *Ueber thermische effekte bei reseasonanzrohren* [Text] / H. Sprenger. – *Mitt Inst Aerodyn*. – ETH. – 1954. – Vol. 21. – P. 18–35.

6. Goldstein, R. J. Streamwise distribution of the recovery factor and the local heat transfer coefficient to an impinging circular air jet [Text] / R. J. Goldstein, A. I. Behbahani, & K. Kieger Heppelmann // *International journal of heat and mass transfer*. – 1986. – Vol. 29, № 8. – P. 1227–1235. doi: 10.1016/0017-9310(86)90155-9.
7. Measurement and computation of energy separation in the vortical wake flow of a turbine nozzle cascade [Text] / W. E. Carscallen, T. C. Currie, S. I. Hogg, & J. P. Gostelow // *Journal of turbomachinery*. – 1999. – Vol. 121, № 4. – P. 703–708. doi: 10.1115/1.2836723.
8. Дейч, М. Е. Техническая газодинамика [Текст] / М. Е. Дейч. – Москва : Госэнергоиздат, 1961. – С. 197–198.
9. Eckert, E. R. G. Energy separation in fluid streams [Text] / E. R. G. Eckert // *International communications in heat and mass transfer*. – 1986. – Vol. 13, iss. 2. – P. 127–143. doi: 10.1016/0735-1933(86)90053-9.
10. Eckert, E. R. G. Cross transport of energy in fluid streams [Text] / E. R. G. Eckert // *Wärme- und Stoffübertragung*. – 1987. – Vol. 21, iss. 2-3. – P. 73–81. doi: 10.1007/bf01377562.
11. Eiamsa-ard, S. Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes [Text] / S. Eiamsa-ard, & P. Promvonge // *Renewable and sustainable energy reviews*. – 2008. – Vol. 12, iss. 7. – P. 1822–1842. doi: 10.1016/j.rser.2007.03.006.
12. Xue, Y. Energy analysis within a vortex tube [Text] / Y. Xue, M. Arjomandi, & R. Kelso // *Experimental thermal and fluid science*. – 2014. – Vol. 52. – P. 139–145. doi: 10.1016/j.expthermflusci.2013.09.004.
13. Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / A. Secchiaroli, R. Ricci, S. Montelpare, & V. D'Alessandro // *International journal of heat and mass transfer*. – 2009. – Vol. 52, iss. 23–24. – P. 5496–5511. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.05.031.
14. Eiamsa-ard, S. Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / S. Eiamsa-ard, & P. Promvonge // *International journal of heat and mass transfer*. – 2007. – Vol. 50, iss. 5–6. – P. 821–832. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.08.018.
15. Rafiee, S. E. Three-dimensional and experimental investigation on the effect of cone length of throttle valve on thermal performance of a vortex tube using $k-\epsilon$ turbulence model [Text] / S. E. Rafiee, & M. M. Sadeghiazad // *Applied thermal engineering*. – 2014. – Vol. 66, iss. 1–2. – P. 65–74. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.01.073.
16. Numerical investigation of a double-circuit Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / V. Alekhin, V. Bianco, A. Khait, & A. Noskov // *International journal of thermal sciences*. – 2015. – Vol. 89. – P. 272–282. doi: 10.1016/j.ijthermalsci.2014.11.012.
17. Semi-empirical turbulence model for numerical simulation of swirled compressible flows observed in Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / A. V. Khait, A. S. Noskov, A. V. Lovtsov, & V. N. Alekhin // *International journal of refrigeration*. – 2014. – Vol. 48. – P. 132–141. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.09.006.
18. Numerical analysis for curved vortex tube optimization [Text] / M. Bovand, M. Valipour, S. Eiamsa-ard, & A. Tamayol // *International communications in heat and mass transfer*. – 2014. – Vol. 50. – P. 98–107. doi: 10.1016/j.icheatmasstransfer.2013.11.012.
19. Numerical analysis of the curvature effects on Ranque–Hilsch vortex tube refrigerators [Text] / M. Bovand, M. Valipour, K. Dincer, & A. Tamayol // *Applied thermal engineering*. – 2014. – Vol. 65, iss. 1–2. – P. 176–183. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.11.045.
20. Liu, X. Investigation of the energy separation effect and flow mechanism inside a vortex tube [Text] / X. Liu, & Z. Liu // *Applied thermal engineering*. – 2014. – Vol. 67, iss. 1–2. – P. 494–506. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2014.03.071.
21. Mohammadi, S. Experimental and numerical study of the gas-gas separation efficiency in a Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / S. Mohammadi, & F. Farhadi // *Separation and purification technology*. – 2014. – Vol. 138. – P. 177–185. doi: 10.1016/j.seppur.2014.10.022.
22. Bej, N. Exergy analysis of a hot cascade type Ranque–Hilsch vortex tube using turbulence model [Text] / N. Bej, & K. P. Sinhamahapatra // *International journal of refrigeration*. – 2014. – Vol. 45. – P. 13–24. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2014.05.020.
23. Kandil, H. A. Computational investigation of different effects on the performance of the Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / H. A. Kandil, & S. T. Abdelghany // *Energy*. – 2015. – Vol. 84. – P. 207–218. doi: 10.1016/j.energy.2015.02.089.
24. 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.
25. Pourmahmoud, N. Numerical analysis of the effect of helical nozzles gap on the cooling capacity of Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / N. Pourmahmoud, A. Hassanzadeh, & O. Moutaby // *International journal of refrigeration*. – 2012. – Vol. 35, № 5. – P. 1473–1483. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.03.019.
26. Dutta, T. Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque–Hilsch vortex tube [Text] / T. Dutta, K. P. Sinhamahapatra, & S. S. Bandyopdhyay // *International journal of refrigeration*. – 2010. – Vol. 33, № 4. – P. 783–792. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2009.12.014.
27. Matveev, K. I. Numerical investigation of vortex tubes with extended vortex chambers [Text] / K. I. Matveev, & J. Leachman // *International journal of refrigeration*. – 2019. – Vol. 108. – P. 145–153. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2019.08.030.
28. Lyu, B.-W. Simulation-Based design for inlet nozzle of vortex tube to enhance energy separation effect [Text] / B.-W. Lyu, S.-M. Jeong, & J.-C. Park // *Applied*

sciences. – 2024. – Vol. 14, no. 21. – Article no. 10023. doi: 10.3390/app142110023.

29. *Experimental investigation of the performance of a Ranque–Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet* [Text] / K. Dincer, S. Baskaya, B. Z. Uysal, & I. Ucgul // *International journal of refrigeration*. – 2009. – Vol. 32, № 1. – P. 87–94. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2008.06.002.

30. Farouk, T. *Large eddy simulations of the flow field and temperature separation in the Ranque–Hilsch vortex tube* [Text] / T. Farouk, & B. Farouk // *International journal of heat and mass transfer*. – 2007. – Vol. 50, № 23–24. – P. 4724–4735. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.03.048.

31. Devade, K. G. *Augmentation of refrigeration effect of vortex tube* [Text] / K. G. Devade. – PhD Thesis. – Shivaji University. – Kolhapur, India. – 2017. – 290 p.

References

1. Ranque, G. J. *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. Ranque, G. J. *Method and apparatus for obtaining from a fluid under pressure two outputs of fluid at different temperatures*. US Patent, US1952281A, 1934.

3. Strakhovich, K. I. *Prikladnaia gazodinamika*. Moscow: ONTI, 1937, vol. 1. 168 p.

4. Eckert, E., & Weise, W. *Messungen der Temperaturverteilung auf der Oberfläche schnell angeströmter unbeheizter Körper*. *Forschung auf dem Gebiete des Ingenieurwesens*, 1942, vol. 13, no. 6, pp. 246–254. doi: bf0258534310.1007

5. Sprenger, H. *Ueber thermische effekte bei reesonanzrohren*. Mitt Inst Aerodyn, ETH, 1954, vol. 21, pp. 18–35.

6. Goldstein, R. J., Behbahani, A. I., & Kieger Heppelmann, K. K. *Streamwise distribution of the recovery factor and the local heat transfer coefficient to an impinging circular air jet*. *International journal of heat and mass transfer*, 1986, vol. 29, no. 8, pp. 1227–1235. doi: 10.1016/0017-9310(86)90155-9.

7. Carscallen, W. E., Currie, T. C., Hogg, S. I., & Gostelow, J. P. *Measurement and computation of energy separation in the vortical wake flow of a turbine nozzle cascade*. *Journal of turbomachinery*, 1999, vol. 121, no. 4, pp. 703–708. doi: 10.1115/1.2836723.

8. Deich, M. E. *Tekhnicheskaja gazodinamika*. Moscow: Gosenergoizdat Publ., 1961, pp. 197–198.

9. Eckert, E. R. G. *Energy separation in fluid streams*. *International communications in heat and mass transfer*, 1986, vol. 13, iss. 2, pp. 127–143. doi: 1933(86)90053-9073510.1016.

10. Eckert, E. R. G. *Cross transport of energy in fluid streams*. *Wärme- und Stoffübertragung*, 1987, vol. 21, no. 2–3, pp. 73–81. doi: bf0137756210.1007.

11. Eiamsa-ard, S., & Promvonge, P. *Review of Ranque–Hilsch effects in vortex tubes*. *Renewable and*

sustainable energy reviews, 2008, vol. 12, no. 7, pp. 1822–1842. doi: j.rser.2007.03.006.

12. Xue, Y., Arjomandi, M., & Kelso, R. *Energy analysis within a vortex tube*. *Experimental thermal and fluid science*, 2014, vol. 52, pp. 139–145. doi: j.expthermflusci.2013.09.004.

13. Secchiaroli, A., Ricci, R., Montelpare, S., & D'Alessandro, V. *Numerical simulation of turbulent flow in a Ranque–Hilsch vortex tube*. *International journal of heat and mass transfer*, 2009, vol. 52, no. 23–24, pp. 5496–5511. doi: j.ijheatmasstransfer.2009.05.031

14. Eiamsa-ard, S., & Promvonge, P. *Numerical investigation of the thermal separation in a Ranque–Hilsch vortex tube*. *International journal of heat and mass transfer*, 2007, vol. 50, no. 5–6, pp. 821–832. doi: j.ijheatmasstransfer.2006.08.018

15. Rafiee, S. E., & Sadeghiazad, M. M. *Three-dimensional and experimental investigation on the effect of cone length of throttle valve on thermal performance of a vortex tube using k-ε turbulence model*. *Applied thermal engineering*, 2014, vol. 2, no. 1–2, pp. 65–74. doi: j.applthermaleng.2014.01.073.

16. Alekhin, V., Bianco, V., Khait, A., Noskov, A. *Numerical investigation of a double-circuit Ranque–Hilsch vortex tube*. *International journal of thermal sciences*, 2015, vol. 89, pp. 272–282. doi: j.ijthermalsci.2014.11.012.

17. Khait, A. V., Noskov, A. S., Lovtsov, A. V., Alekhin, V. N. *Semi-empirical turbulence model for numerical simulation of swirled compressible flows observed in Ranque–Hilsch vortex tube*. *International journal of refrigeration*, 2014, vol. 48, pp. 132–141. doi: j.ijrefrig.2014.01.074.

18. Bovand, M., Valipour, M. S., Eiamsa-ard, S., & Tamayol, A. *Numerical analysis for curved vortex tube optimization*. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2014, vol. 50, pp. 98–107. doi: j.icheatmasstransfer.2013.11.012.

19. Bovand, M., Valipour, M. S., Dincer, K., & Tamayol, A. *Numerical analysis of the curvature effects on Ranque–Hilsch vortex tube refrigerators*. *Applied Thermal Engineering*, 2014, vol. 65, no. 1–2, pp. 176–183. doi: j.applthermaleng.2013.11.045.

20. 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: j.applthermaleng.2014.03.071.

21. Mohammadi, S., & Farhadi, F. *Experimental and numerical study of the gas–gas separation efficiency in a Ranque–Hilsch vortex tube*. *Separation and Purification Technology*, 2014, vol. 138, pp. 177–185. doi: j.seppur.2014.10.022.

22. Bej, N., & Sinhamahapatra, K. P. *Exergy analysis of a hot cascade type Ranque–Hilsch vortex tube using turbulence model*. *International Journal of Refrigeration*, 2014, vol. 45, pp. 13–24. doi: j.ijrefrig.2014.05.020.

23. 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: j.energy.2015.02.089.
24. 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: j.ijheatmasstransfer.2014.06.083.
25. Pourmahmoud, N., Hassanzadeh, A., & Moutaby, O. Numerical analysis of the effect of helical nozzles gap on the cooling capacity of Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 2012, vol. 35, no. 5, pp. 1473–1483. doi: j.ijrefrig.2012.03.019.
26. Dutta, T., Sinhamahapatra, K. P., & Bandyopdhyay, S. S. Comparison of different turbulence models in predicting the temperature separation in a Ranque–Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 2010, vol. 33, no. 4, pp. 783–792. doi: j.ijrefrig.2009.12.014.
27. Matveev, K. I., & Leachman, J. Numerical investigation of vortex tubes with extended vortex chambers. *International Journal of Refrigeration*, 2019, vol. 108, pp. 145–153. doi: j.ijrefrig.2019.08.030.
28. Lyu, W., Jeong, M., & Park, C. Simulation-Based design for inlet nozzle of vortex tube to enhance energy separation effect. *Applied Sciences*, 2024, vol. 14, no. 21, p. 10023. doi: app14211002310.3390.
29. Dincer, K., Baskaya, S., Uysal, B. Z., & Ucgul, I. Experimental investigation of the performance of a Ranque–Hilsch vortex tube with regard to a plug located at the hot outlet. *International Journal of Refrigeration*, 2009, vol. 32, no. 1, pp. 87–94. doi: j.ijrefrig.2008.06.002.
30. 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. 24, pp. 4724–4735. doi: j.ijheatmasstransfer.2007.03.048.
31. Devade, K. D. *Augmentation of refrigeration effect of vortex tube*. PhD Thesis, Shivaji University, Kolhapur, India, 2017.

Надійшла до редакції 15.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

REVIEW OF NUMERICAL METHODS FOR MODELLING TEMPERATURE SEPARATION IN SWIRLING FLUID FLOWS

Artem Karpenko

The main objective of this paper is to present a generalized review of the methods used for the numerical analysis of the total temperature flow separation process in Ranque–Hilsch vortex tubes using computational fluid dynamics (CFD). The main attention is paid to the studies supported by experimental data and evaluated by the authors as being in good agreement with the experimental results. This publication provides a brief introduction to the subject matter, followed by a short retrospective of previous efforts and related challenges. The general trends in the numerical analysis of vortex tubes are presented. The conclusions are developed on the basis of the most recent and previously published results of numerical studies. Researchers studying flows in vortex tubes typically use axisymmetric models in both three- and two-dimensional dimensions. However, the authors have repeatedly concluded that none of the available turbulence models can accurately represent the complex fluid dynamics inside a vortex tube. Despite this, the standard k- ϵ turbulence model is often successfully used to simulate turbulent phenomena and can be considered a basic model for evaluating the characteristics of vortex tubes. Although this model is not without its drawbacks, it can be used to obtain a fairly accurate generalized picture of the distribution of key parameters with satisfactory accuracy and without the need for additional model calibration.

Most of the considered turbulence models underestimate (to varying degrees in each individual case) the level of total temperature separation in a Ranque–Hilsch vortex tube. The accuracy of temperature separation calculations can be improved by using more complex models, such as LES vortex-resolving models. However, these models are not an everyday tool for design engineers due to their demanding computational resources and the time required for calculations.

For complete and reliable modeling of flow in a vortex tube, a more accurate (than existing) turbulence model is still needed today.

Keywords: vortex tube; energy separation; total temperature separation; vortex effect; Ranque–Hilsch effect; CFD; turbulence model.

Карпенко Артем Михайлович – асп., провідний інженер, Акціонерне товариство «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна.

Artem Karpenko – PhD Student, Lead Engineer, Joint-Stock Company, "Ivchenko-Progress", Zaporizhzhia, Ukraine,
e-mail: karpenkoarty@gmail.com, ORCID: 0009-0006-2200-694X.