

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

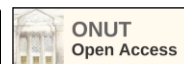
УДК 621.536.483; 621.593

Перспективи застосування газоструменевих акустичних генераторів у якості вторинних джерел енергії

В. О. Потапов¹, Д. О. Димерцов²✉¹Державний біотехнологічний університет, вул. Алчевських, 44, Харків, 61002, Україна;²Харківський Національний Економічний Університет імені Семена Кузнеця, проспект Науки, 9А, Харків, 61166, Україна✉ e-mail: ²dmytro.dymertsov@hneu.comORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0731-2598>; ²<https://orcid.org/0009-0000-4894-3495>

У роботі розглянуто проблеми використання вторинних джерел енергії, які являють собою невикористану частину певного виду енергії у технологічному процесі, або енергії, яка утворюється як побічний продукт. Крім вторинних джерел скидної теплоти, способи утилізації яких широко відомі і реалізуються в багатьох галузях промисловості, існують ще вторинні енергоресурси надлишкового або скидного тиску. Зазначено, що енергія надлишкового тиску утворюється в різних технологічних процесах, пов'язаних з видобутком, транспортуванням, розподілом природного газу, а також в хімічній, нафтовій, гірничій, харчовій галузях, в геотермальній енергетиці, авіації. Зазначено, що потенційні втрати від скидання надлишкового тиску газів в оточуюче середовище, пов'язані не тільки з економічними втратами, але й з екологічними проблемами, в першу чергу з викидами парникових газів та забрудненням аерозолями повітря та ґрунту. Проведено аналітичний огляд існуючих шляхів перетворення надлишкової енергії тиску у теплову енергію у процесах адіабатного стиснення або розширення. Ці процеси найбільш ефективно реалізуються у компресорах та детандерах. В той же час існують пристрої які дозволяють одночасно отримувати теплоту і холод, використовуючи як джерело енергії зовнішній надлишковий тиск. До них відносяться пристрої на основі вихрового ефекту, термоакустичного ефекту, резонансно-хвильові акустичні генератори. В роботі проведено огляд існуючих пристроїв утилізації скидного тиску, зокрема зроблено акцент на використанні енергії скидного тиску для отримання холоду. На основі аналізу літературних джерел наведено основні відомості про конструктивні особливості цих пристроїв: пульсаційних трубок, термоакустичних генераторів, генераторів Гартмана, газоструменевих акустичних генераторів, генераторів Ранка-Хільша. Проведено порівняння їх енергоефективності, визначені їх переваги та недоліки та визначено перспективні сфери застосування. Зроблено висновок, що завдяки високій енергоефективності, простоті конструкції та надійності, газоструменеві акустичні генератори можуть використовуватися в широкому спектрі теплових і холодильних технологій. Вони є перспективними для створення автономних систем охолодження, локального кондиціонування, теплового захисту обладнання, а також для перетворення надлишкового тиску чи теплоти в корисну енергію, що особливо актуально в умовах сучасної енергетичної трансформації та зростання вимог до енергоефективності промислових процесів.

Ключові слова: Вторинні джерела енергії; Скидний тиск; Газоструменеві акустичні генератори; Генератор Гартмана; Пульсаційна трубка; Трубка Ранка-Хільша

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v6i12.3178>

1. Вступ

Підвищення енергоефективності та раціональне використання ресурсів є ключовими завданнями сучасної енергетики. Зростання енергоспоживання супроводжується збільшенням витрат на видобуток первинних ресурсів і поглибленням екологічних проблем, що актуалізує необхідність ефективної утилізації вторинних енергоресурсів до яких відносяться теплові, горючі та енергоресурси надлишкового (скидного) тиску.

Наразі найбільш розвинути методи використання теплових та горючих вторинних джерел енергії. Це когенераційні й тригенераційні системи, рекуперативні теплообмінники, економайзери, теплові насоси, піролізні та газифікаційні установки, які давно впроваджені в промисловість. В той же час окрему увагу заслуговують енергоресурси надлишкового (скидного) тиску – потенційна енергія газів або рідин, що утворюється внаслідок технологічних процесів в хімічній, нафтовій, гірничій та харчовій галузях, а також в природних умовах, зокрема у газовидобуванні, геотермальній енергетиці, авіації. Енергія скидного тиску наразі залишається здебільше невикористаним потенціалом вторинних джерел енергії, яке може бути дуже актуальним у контексті підвищення енергоефективності, наприклад, для отримання теплоти або холоду. Крім того потенційні втрати від скидання надлишкового тиску газів в оточуюче середовище, пов'язані не тільки з економічними втратами, але й з екологічними проблемами, в першу чергу з викидами парникових газів та забрудненням аерозолями повітря та ґрунту.

Як відомо, найчастіше для перетворення кінетичної енергії надлишкового тиску у теплову енергію використовуються компресори і детандери. Наприклад, на відміну від дроселів, які спричиняють енергетичні втрати, детандери дають змогу виробляти механічну енергію або виробляти холод. Крім цих перетворювачів надлишкового тиску перспективними є пристрої на основі вихрового, термоакустичного ефектів, хвильового резонансу, які здатні забезпечувати комбіноване виробництво теплоти і холоду.

До переваг зазначених пристроїв належать прийнятна енергоефективність, відсутність рухомих частин у більшості схем, компактність, простота конструкції, відсутність вібрацій, висока надійність і довговічність, а також здатність працювати в широкому діапазоні тисків і температур.

Перспективним напрямком застосування таких перетворювачів надлишкового тиску є мініатюрні охолоджувальні системи на базі акустичних генераторів, що використовуються для охолодження мікропроцесорів, лазерів, сенсорів, медичних і побутових приладів. Такі пристрої дозволяють підвищити ефективність повітряного охолодження за умов надлишкового тиску.

Зазначені аспекти впровадження таких пристроїв доцільно розглядати в комплексі для оцінки перспектив використання скидного тиску як джерела вторинної енергії – з урахуванням як технічних параметрів відповідних перетворювачів для генерації теплоти чи холоду, так і сфер їх практичного застосування.

Тому метою цієї статті є аналіз пристроїв утилізації скидного тиску, зіставлення їх технічних характеристик, переваг і недоліків, а також оцінка технологічного потенціалу в різних умовах експлуатації та галузях науки й техніки.

2. Сучасні газоструменеві холодильно-нагрівальні акустичні генератори

Газоструменеві холодильно-нагрівальні акустичні пристрої поділяються на генератори з пульсаційною та резонансною трубками.

2.1 Генератори з пульсаційною трубкою

Пристрої з пульсаційною трубкою (пристрої Гіффорда) працюють у режимі послідовної зміни температури газу.

Пульсаційні пристрої (див. рис 1) складаються з декількох замкнених об'ємів, які послідовно заповнюються та випорожнюються потоком газу. Конструкція пульсаційних пристроїв передбачає наявність швидкодіючого клапана впуску-випуску газу або наявність циліндру з рухомих поршнем, який задає коливання газу [23-24].

Базова конструкція пристрою Гіффорда дозволяє відносно просто перейти до багаторівневої схеми поступової зміни температури газу. У пульсаційних пристроях зміна температури пов'язана з наповненням та випородженням газу, що внутрішньої енергії (ефект Джоуля). Такі процеси в пристрої відбуваються періодично. Тепло, яке виділяється при наповненні відводиться за межі об'єму, в результаті чого відбувається охолодження газу.

Одним з принципових недоліків таких пристроїв, що пов'язано з процесами наповнення-

випорожнення газу, є мала потужність (десятки Ватт). Тому застосування такого типу охолоджувачів є перспективним під час наукових досліджень, у медицині, де інколи вимагаються низькі температури і невелика потужність [8-11].

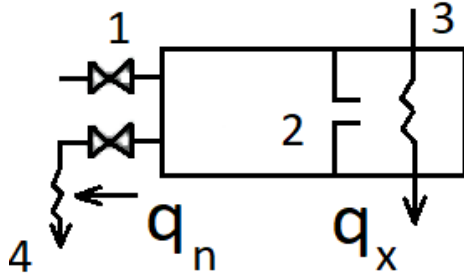


Рисунок 1 – Генератор з пульсаційною трубкою:

1 – клапан впуску-випуску; 2 – розширювач;
3 – холодильник; 4 – теплообмінник;
 q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту;
 q_x – відвідне тепло стискування.

Також пульсаційні трубки застосовуються для зрідження газів, охолодження датчиків, котушок надпровідного магнітного поля, квантових комп'ютерних схем, надпровідних схем у приймальних станціях мобільного зв'язку, низькотемпературних експериментах та космічній техніці.

Завдяки своїй незалежності від виду криогенних речовин вони є перспективними для застосування у військовій справі (охолодження мініатюрної електроніки, інфрачервоних датчиків), оптичних датчиків у космічних телескопах [9, 10]. Охолоджувач з імпульсною трубкою позбавляє кріостати залежності від дорогих криогенних речовин таких, як гелій, азот для підтримання низьких температур [9].

2.2 Термоакустичні генератори

До генераторів з резонансною трубкою відносять термоакустичні генератори з біжучою та стоячою хвилями, які мають регулярні насадки, у вигляді набору сіток розташованих поперек приймальної трубки.

В таких генераторах [25-27] створюються повздовжні пружні хвилі значної амплітуди при локальному нагріві робочого газу (див. рис. 2, 3). Для цього використовують резонатор розташований безпосередньо в потоці газу, який збуджується імпульсами резонансної частоти власних коливань рівень якої становить 100...1000 Гц. Інтенсивність та стабільність пружної хвилі зростає при розповсюдженні її у напрямку від нагрітої сітки до

більш холодної, тобто за градієнтом температур у напрямку зниження теплового потенціалу джерела, що було встановлено Гартлеєм. Пристрої такого класу мають ряд недоліків, а саме, при створенні таких пристроїв існує проблема акустичного відбиття хвилі газу та вдосконалення насадок, які не повинні ослаблювати газову хвилю. Таким чином термоакустичні генератори при простоті та надійності конструкції стають привабливими, коли саме ці якості стають переважними порівняно з іншими пристроями, наприклад у сфері кондиціонування повітря [12, 13]. Ці пристрої найчастіше використовуються в побутових приладах, наприклад в холодильниках [13, 14]. Рівень потужності таких пристроїв досягає сотні кіловат при адіабатному ККД 30 %.

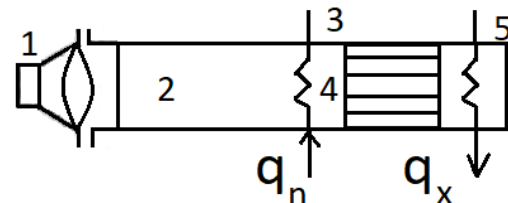


Рисунок 2 – Термоакустичний генератор з стоячою хвилею: 1 – генератор звукових хвиль; 2 – резонатор; 3 – теплообмінник; 4 – стік; 5 – теплообмінник; q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту; q_x – скидна теплота стискування.

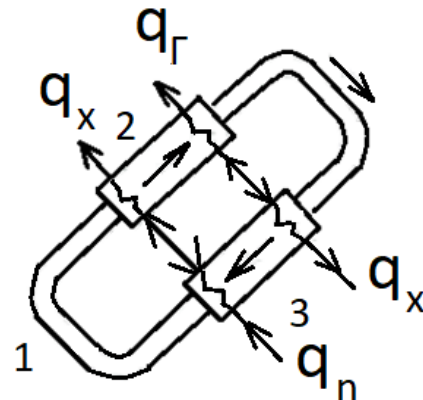


Рисунок 3 – Термоакустичні генератори з біжучою хвилею: 1 – хвильовід, 2, 3 – буферні труби; q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту; q_x – скидна теплота стискування; $q_Г$ – гарячий потік

2.3 Газоструменеві акустичні генератори

Це пристрої так званого енергетичного розподілу, до яких відносяться пристрої з резонансною трубкою – генератори Гартмана (див. рис. 4), а також газоструменеві акустичні генератори (ГАГ) (див. рис. 5) [15, 31]. В таких пристроях за-

кладено принцип аеродинамічного резонансу [28, 29], а також явище термічного енергоподілу при нелінійних коливаннях газу у закритій з одного боку трубці. Конструкція таких пристроїв представляє собою сопло та приймальну трубку або віяло трубок в які під тиском подається газ. Для таких пристроїв режим роботи повинен бути пульсуючим, а частота коливання повинна відповідати власній частоті коливання трубки.

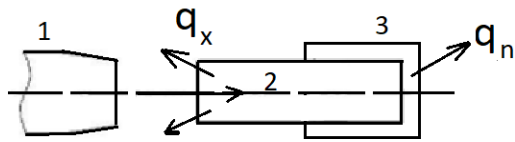


Рисунок 4 – Генератор Гартмана: 1 – сопло; 2 – приймальна трубка; 3 – тепловідвідна поверхня; q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту; q_x – скидна теплота стискання.

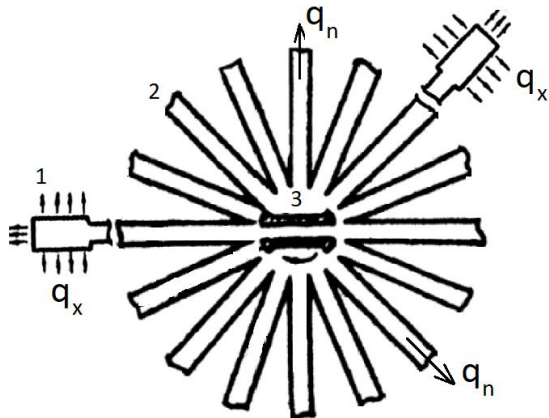


Рисунок 5 – Газоструменевий акустичний генератор з механічним газорозподільником: 1 – тепловідвідна поверхня; 2 – віяло приймальних трубок; 3 – газовий розподільник; q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту; q_x – скидна теплота стискання.

Такий принцип роботи дозволяє ефективно використовувати ГАГ для локального кондиціонування повітря, охолодження технологічних газів або обладнання, що потребує тепловідведення. Рівень адіабатного ККД таких пристроїв досягає 70. Газ високого тиску періодично надходить до газорозподільника через спеціальні отвори в корпусі та далі спрямовується в енергообмінний канал, розташований вздовж осі пристрою. У цьому каналі відбуваються інтенсивні процеси теплообміну, які спричиняють зниження температури газу. Охолоджений газ по окремих каналах газорозподільника обертається у зворотному напрямку та виводиться з пристрою.

Створений перепад температур на теплообмінній поверхні дозволяє здійснювати ефективне відведення теплоти примусовим або природним способами.

Велика теплова потужність (до тисячі кВт [22]), що дозволяє їх використовувати у областях промисловості, де потрібно переробляти велику кількість газу: у пульсаційних пристроях на призабійній зоні пласта у нафтогазовидобуванні, для газодинамічного підпалу горючих газів; а також як роторний хвильовий кріогенний генератор для малотоннажного виробництва зрідженого природного газу, в авіабудуванні, як нагрівальний елемент системи запобігання обмерзанню в повітрязабірнику літального апарату.

2.4. Генератор Ранка-Хільша

Крім пристроїв з резонансною трубкою, існують ще пристрої енергетичного розподілу на ефекті Ранка [30, 31].

Пристрій Ранка-Хільша (див. рис. 6) працює на ефекті температурного поділу газу при закручуванні в циліндричній або конічній камері за умови, що потік газу при надлишковому тиску в трубці проходить не тільки прямо, а й назад.

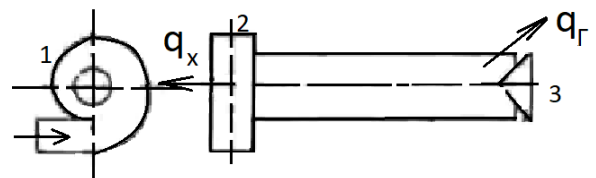


Рисунок 6 – Генератор Ранка-Хільша: 1 – діафрагма для виходу холодного газу, 2 – трубка; 3 – область виходу гарячого газу; q_n – теплота від охолоджуючого об'єкту; q_x – скидна теплота стискання; q_r – гарячий потік

Температурний поділ газового потоку надлишкового тиску відбувається шляхом перетворення частини кінетичної енергії обертального газового потоку в теплову енергію, із просторовим розділенням цієї енергії між осьовою та периферійною зонами потоку. Існують і застосовуються вихрові теплогенератори (трубки Ранка) для охолодження повітря невеликих приміщень або охолодження електроніки [16-19]. Ефективність трубки Ранка зазвичай є досить низькою. У практичних умовах реальний ККД частіше не перевищує 10-15%. Причина низького ККД полягає в нерегульованих витратах на турбулентність і теплообмін. Обертання газу створює інтенсивні турбулентності, що

призводить до значних втрат енергії, а через високу швидкість обертання на стінках трубки виникають втрати на тертя. Внаслідок значної турбулентності частина холодного повітря може потрапляти у гарячий потік і навпаки. Ефективність охолодження із застосуванням ефекту невисока і нижча за ефективність традиційних генераторів з резонансною або пульсаційною трубками. Тому трубки Ранка застосовуються в тих випадках, коли потрібна простота пристрою або за відсутності інших джерел енергії, крім стисненого повітря надлишкового тиску.

3. Порівняння пристроїв утилізації скидного тиску

Основні характеристики газоструменевих холодильних та нагрівальних генераторів систематизовано у таблиці 1. Характеристики розглянутих газоструменевих генераторів порівнюються з характеристиками турбодетандера, як найбільш енергоефективного пристрою перетворення надлишкового тиску у корисну роботу, з метою оцінки їх ефективності, надійності, габаритів, робочих діапазонів тиску та температур, а також доцільності застосування в різних умовах.

У таблиці 1 наведено характеристики, які дозволять наочно оцінити потенційні можливості утилізації скидного тиску різними пристроями. Як видно існує значна варіативність таких показників, як робочі тиски та температури. Зазначені параметри суттєво відрізняються залежно від типу пристрою, що зумовлено їхнім функціональним призначенням, різноманітням використовуваних робочих газів, а також геометричними та конструктивними особливостями. Зокрема, мініатюрні пристрої, такі як пульсаційні трубки, мають обмежену термічну та механічну стійкість, що унеможливає їхнє застосування в умовах підвищених температур і тисків, оскільки це може призвести до їх механічного руйнування.

Перепад температур робочого газу (dT) вхід – вихід пристрою змінюється в широкому діапазоні, що пояснюється різними умовами експлуатації, вхідними параметрами газу, конструктивними відмінностями пристроїв, а також впливом зовнішніх факторів.

Для всіх видів генераторів вибір робочого газу здійснюється з урахуванням його фізико-хімічних властивостей – таких як густина, в'язкість, теплопровідність, хімічна активність, які безпосередньо

впливають на ефективність функціонування пристрою в конкретних умовах експлуатації.

В таблиці представлено узагальнене порівняння основних переваг і недоліків розглянутих типів газоакустичних генераторів, які безпосередньо впливають на їх сферу застосування.

Серед основних характеристик, які можуть бути віднесені до конкурентних переваг перетворювачів тиску такі, як висока енергоефективність (для газоструменевих акустичних генераторів ККД 70%, як і для детандерів); відсутність рухомих частин, що знижує знос і потребу в технічному обслуговуванні; мала маса; легкість у виготовленні та невелика собівартість пристроїв; невибагливість до умов експлуатації; можливість автоматизації робочого процесу деяких газоструменевих генераторів дозволяє підвищити ефективність та точність роботи; компактність та простота конструкції, що сприяє зручності монтажу й експлуатації; довговічність і зниження витрат на обслуговування; висока надійність і, відповідно, стабільність роботи протягом тривалого часу та зниження ризику відмов; модульність, що дозволяє створювати пристрої різної потужності (для окремих генераторів); низький рівень вібрації та шуму (для окремих пристроїв), що є особливо важливим при використанні у медицині, військовій техніці у побутових приладах; широкий діапазон частот дозволяє адаптувати пристрої до різних режимів експлуатації та легко автоматизувати; можливість роботи з різними газами сприяє розширенню сфери застосування пристроїв; мініатюрність, що дозволяє створювати компактні інтегровані системи для мікроелектроніки.

Крім того, серед переваг зазначено екологічність розглянутих пристроїв, які не використовують шкідливі холодильні агенти і теплоносії, та сприяють захисту навколишнього середовища, оскільки зменшують забруднення скидними аерозолями повітря та ґрунту.

Таким чином економічність і високий коефіцієнт корисної дії газоструменевих акустичних генераторів, робить саме ці пристрої найбільш ефективними в широкому спектрі застосувань.

Натомість серед недоліків розглянутих пристроїв перетворення скидного тиску були виділені такі аспекти, як низька енергоефективність у окремих моделях (ККД 20...35%); високий рівень шуму (більше 70 дБ); великі вимоги до обслуговування, обмежений температурний діапазон експлуатації, що ускладнює застосування в умовах критичних температур.

Пристрої	ККД, %	Q, кВт	Діапазон робочих тисків P, МПа	Діапазон робочих температур T, К	Рівень шуму, дБ	Зміна температур dT, К	Переваги	Недоліки	Застосування
Турбодетандери	70	150	0.1 - 9	77 - 573	75 - 110	10 - 100	Високий ККД; компактність та простота конструкції; висока надійність; довговічність; мала маса; модульність; можливість роботи з різними газами.	Високий рівень шуму; великі вимоги до обслуговування; значна вартість; ризик виникнення вібрацій і механічних пошкоджень; складність виготовлення; необхідність тонкого налаштування; обмеження температурного діапазону експлуатації.	Нафтогазова та хімічна промисловість; криогеніка; енергетика
Пульсаційні трубки	40	3	0.1 - 3.5	4 - 300	40 - 80	5 - 10	Відсутність рухомих частин, низький рівень вібрацій та шуму; екологічність; компактність; висока надійність; проста автоматизація процесу; низький рівень вібрацій та шуму; можливість роботи з різними газами.	Складність виготовлення; низький ККД; великі вимоги до експлуатації; обмежена термічна та механічна стійкість	Електроніка; криогеніка
Термоакустичні з стоячою хвилею	40	1 - 5	0.1 - 4	100 - 223	40 - 90	100 - 200	Простота конструкції; відсутність рухомих частин; компактність; мала маса; екологічність; проста автоматизація процесу; невибагливість до умов експлуатації; можливість роботи з різними газами.	Низька енергоефективність; високий рівень шуму; великі вимоги до обслуговування; нестабільність температурного режиму; ризик виникнення вібрацій і механічних пошкоджень; акустичні втрати	Охолодження; кондиціонування; енергетика
Термоакустичні з біжучою хвилею	35	1 - 5	0.1 - 4	173 - 873	50 - 90	3 - 300	Компактність та простота; відсутність рухомих частин; низький рівень вібрацій та шуму; екологічність; проста автоматизація процесу;	Складність виготовлення; значна вартість; великі вимоги до обслуговування; ризик виникнення вібрацій і механічних пошкоджень; акустичні втрати	Охолодження; кондиціонування; енергетика
Генератор Гартмана	30	3 - 5	0.1 - 10	200 - 573	70 - 110	50 - 80	Компактність та проста конструкція; відсутність рухомих частин; висока надійність; інтенсивне звукове випромінювання; широкий діапазон частот; економічність; легкість у виготовленні; мала маса; мініатюрність; можливість роботи з різними газами	Високий рівень шуму; високі витрати енергії; ризик виникнення вібрацій і механічних пошкоджень; необхідність тонкого налаштування; акустичні втрати	Акустика, промислові технології
Газоструменеві акустичні генератори	70	1000	0.1 - 10	70 - 800	70 - 110	3 - 100	Проста конструкція; економічність; широкий діапазон частот; компактність; мала маса, висока надійність; легкість у виготовленні; широкий діапазон частот; можливість роботи з різними газами.	Високий рівень шуму; ризик виникнення вібрацій і механічних пошкоджень; необхідність тонкого налаштування; акустичні втрати	Нафтогазова та хімічна промисловість; криогеніка, енергетика
Трубка Ранка	20	1 - 5	0.2 - 1.5	30 - 350	40 - 110	15 - 120	Проста конструкція; відсутність рухомих частин, одночасне охолодження та нагрівання; компактність; мала маса; можливість роботи з різними газами.	Низький ККД; високий рівень шуму; обмеження температурного діапазону експлуатації; складність автоматизації; нестабільність температурного режиму.	Холодильні та теплові технології, літакобудування

4. Висновки

Проведено аналітичний огляд методів перетворення надлишкової енергії тиску. Досліджено існуючі підходи до перетворення надлишкової енергії тиску в теплову, що реалізуються через процеси адіабатного стиснення або розширення. Зазначено, що найбільш ефективними в цьому контексті є компресори та детандери.

Проаналізовано інші пристрої, які дозволяють одночасно генерувати тепло та холод, використовуючи надлишковий зовнішній тиск як джерело вторинної енергії. До таких технологій належать пристрої на основі вихрового, термоакустичного та резонансно-хвильового акустичного ефектів.

На основі аналізу літературних джерел детально розглянуто конструктивні особливості таких пристроїв, як пульсаційні трубки, термоакустичні генератори, генератори Гартмана, газоструменеві акустичні генератори та генератори Ранка-Хільша.

Проведено порівняльний аналіз та цих пристроїв за такими показниками: ККД, потужність, діапазон робочих тисків і температур, рівень шуму. Виявлено їхні переваги та недоліки, а також окреслено перспективні сфери застосування кожної технології.

Наведені дані дозволяють зробити висновок, що найбільш перспективними приладами для утилізації скидного тиску є газоструменеві акустичні генератори із механічним газорозподільником. Ці генератори демонструють високий коефіцієнт корисної дії (такий самий як у турбодетандерах, до 70%), значну теплову потужність (до тисячі кіловат), що вигідно відрізняє їх від інших перетворювачів тиску на основі вихрового, термоакустичного ефектів, які мають низький ККД (до 40%), обмежену потужність та поступаються ГАГ іншими характеристиками.

Завдяки високій енергоефективності, простоті конструкції та надійності, ГАГ можуть знайти застосування в широкому спектрі теплових і холодильних технологій. Ці пристрої особливо актуальні для створення автономних систем охолодження, локального кондиціонування, теплового захисту обладнання. Особливо перспективним є застосування таких пристроїв у промислових шахтах, на газовидобувних родовищах, а також на підприємствах, що займаються ожиженням та очищенням кріогенних газів, де ефективно використання енергії скидного тиску має ключове значення. Це відповідає сучасним вимогам до енергетич-

ної трансформації та підвищення енергоефективності промислових процесів.

Література

1. **Куріс Ю.В., Воляр Р.М.** Вимірювання надлишкового тиску у металургійних процесах // *Металург.* – 2023. – 4 с.
2. Вентиляційні системи. URL: <https://ventsystems.com.ua/ua/g105762027-klapany-izbytochnogo-davleniya> (дата звернення 01.06.2025)
3. Клапан надлишкового тиску. URL: https://pershakaplya.com.ua/klapannadlyshkovogotysku?srsId=AfmBOornZzc_gYpThWctzYUVTv0xEUeXBLUaKeQjZ7TIfuZiXBI-NgTU (дата звернення 01.06.2025)
4. Датчик надлишкового тиску http://celmet.com.ua/index.php?route=product/product&path=71_161_120&product_id=280 (дата звернення 01.06.2025)
5. **Y.B. Duan, J. Wang, S.S. Wu, W. Wang, R.J. Huang, L.F. Li, Y. Zhou.** Application of Stirling pulse tube cryocoolers in high temperature superconducting filters subsystems // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* – 2025. – Vol. 1240. – P. 012133. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1240/1/012133>
6. **R. Ashish, Raghuvara K. Hebbar, T. N. Prateek, Karthik R. Kashyap, K. S. Rajendra Prasad.** Numerical Investigation of Inertance Type Pulse Tube Cryocooler for Space Applications // *Fluid Mechanics and Fluid Power.* – 2024. – Vol. 3. – P. 127-139. https://doi.org/10.1007/978-981-99-6343-0_10.
7. **Zhao B., Ding S.** Optimization of the intermediate precooling temperatures for the 2 K hybrid cryocooler based on entropy generation analysis // *Case Studies in Thermal Engineering.* – 2025. – Vol. 68. – P. 105887. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2025.105887>.
8. **Fischer B., Gschwendtner M.** Conceptual mechanical design of a rotating alpha-type stirling cryocooler for superconducting motor cooling // *Cryogenics.* – 2025. – Vol. 147. – P. 104047. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2025.104047>.
9. **Xu S., Yang B.** Investigation of step piston pulse tube refrigerator // *Applied Thermal Engineering.* – 2025. – Vol. 258. – P. 124659. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124659>.
10. **R. Takahashi, K. P. Kobayashi, Y. Hiratuka.** Analysis of energy flow for thermoacoustic refrigerator // *Proceedings of Conference of Kanto Branch.* – 2010. – Vol. 16. – P. 271-272. <https://doi.org/10.1299/jsmekanto.2010.16.271>.
11. **Zhou Q., Chen Y.** Experimental study on a wet

- thermoacoustic Stirling engine for water pumping // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 265. – P. 125558. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125558>
12. **Biswas S., Kresl W.** On the relationship between acoustic absorption and temperature gradient in a thermoacoustic liner // *International Journal of Aeroacoustics*. – 2025. – Vol. 24. – Is. 1-2. – P. 42-67. <https://doi.org/10.1177/1475472X241306317>.
 13. **Fazli M. Mazaheri K.** Heat-driven thermoacoustic refrigeration: A comprehensive review of technologies, applications, trends and challenges // *Applied Thermal Engineering*. – 2025. – Vol. 260. – P. 124996. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2024.124996>
 14. **Sun, W., Chen G.** Mode switching between electric-driven thermoacoustic refrigerator and heat pump // *Energy*. – 2025. – Vol. 317. – P. 134607. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.134607>.
 15. Sound energy. URL: <https://www.soundenergy.nl/our-technology/> (дата звернення 01.06.2025)
 16. **Kudo Y., Sawada S., Itouyama N.** Temperature rise and pressure dynamics in the early stages of Hartmann-Sprenger tube operation // *Shock Waves*. – 2025. – Vol. 35. – P. 169-184 <https://doi.org/10.1007/s00193-024-01211-3>. 2025
 17. **Bo Z., Xiangji G.** Prospective applications of Ranque-Hilsch vortex tubes to sustainable energy utilization and energy efficiency improvement with energy and mass separation // *Renewable and Sustainable Energy*. – 2018. – Vol. 89. – P. 135-150.
 18. **A.D. Gutak.** Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube // *International Journal of Refrigeration*. – 2015. – Vol. 49. – P. 93-98. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2014.09.021>.
 19. **H. Gokce.** Evaluation and Optimization of O₂ Used Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. – 2020. – Vol. 43. – P. 1566-1576. <https://doi.org/10.1080/15567036.2020.1817188>
 20. Несучі крила. URL: <https://modelistam.com.ua/ua/nesuschie-kryliya-chasti-geometriya-kryla-a-72/> (дата звернення 01.06.2025)
 21. Мембранні насоси в промисловості – принцип роботи URL: https://emerem.com.ua/information/membranni-nasosi-v-promislovosti-princip-roboti/?srsId=AfmBOoqCosLLeGYiG7GH2_h6p7kdAP0WjZkIDcINcpsQVxyvllOz5N1W (дата звернення 01.06.2025).
 22. **Десятов А.Т.** Кріогенні генератори з пульсаційною та резонансною трубами. - М.: ЦІНТІХІМ-НАФТМАШ. – 1985. – 43 с.
 23. Pulse Tube Cryocoolers. URL: <https://bluefors.com/products/pulse-tube-cryocoolers/> (дата звернення 01.06.2025)
 24. RP-062B 4K Pulse Tube Cryocooler Series. URL: <https://shicryogenics.com/product/rp-062b-4k-pulse-tube-cryocooler-series/> (дата звернення 01.06.2025)
 25. Thermoacoustic Stirling Cryocooler How It Works. URL: <https://www.rixindustries.com/thermoacoustic-stirling-cryocooler-how-it-works> (дата звернення 01.06.2025)
 26. 10W@80K TC4187 stirling pulse tube cryocooler. URL: https://www.globalsources.com/product/10w-80k-tc4187-stirling-pulse-tube-cryocooler_1154119755f.htm (дата звернення 01.06.2025)
 27. **Sajid Hameed Siddiqui, Akash Langde.** Performance analysis in the design of thermoacoustic refrigeration system: review // *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. – 2023. – Vol.45. – P. 7705-7731. <https://doi.org/10.1080/15567036.2023.2223148>
 28. Piston Tubes. URL: <https://store.dme.net/piston-tubes> (дата звернення 01.06.2025)
 29. Hartmann valves and wellheads. URL: <https://www.hartmann-valves.com/> (дата звернення 01.06.2025)
 30. Ranque-Hilsch Vortex Tube. URL: <https://xhnotation.en.made-in-china.com/product/nfWrjtmPIRVv/China-Xhnotation-Ranque-Hilsch-Vortex-Tube-Spot-Cooling-Tubing-Aluminum-Spot-Air-Cooler.html> (дата звернення 01.06.2025)
 31. AiRTX Vortex Tubes (review). URL: <https://www.airtx.net/airtx-vortex-tubes-review> (дата звернення 01.06.2025)
 32. ТОВ «КРІО ІНТЕР ТРЕЙДІНГ». URL: <https://cryo-tm.com.ua/> (дата звернення 01.06.2025)
 33. Gas detection sytems and sensors. URL: <https://www.bertin-technologies.com/products-range/gas-detection/> (дата звернення 01.06.2025)

Отримана в редакції 01.06.2025, прийнята до друку 23.06.2025

Prospects for the use of gas-jet acoustic generators as secondary energy sources

Volodymyr Potapov¹, Dmytro Dymertsov²

¹State Biotechnological University, 44 Alchevskikh, Str., Kharkiv, 61002, Ukraine;

²Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 9A Nauki, Ave., Kharkiv, 61001, Ukraine

✉ e-mail: ²dmytro.dymertsov@hneu.com

ORCID: ¹<https://orcid.org/0000-0002-0731-2598>; ²<https://orcid.org/0009-0000-4894-3495>

The paper considers the problems of using secondary energy sources, which are an unused part of a certain type of energy in a technological process, or energy that is formed as a by-product. In addition to secondary sources of waste heat, the methods of utilization of which are widely known and implemented in many industries, there are also secondary energy resources of excess or waste pressure. It is noted that the energy of excess pressure is formed in various technological processes related to the extraction, transportation, distribution of natural gas, as well as in the chemical, oil, mining, food industries, geothermal energy, and aviation. It is noted that potential losses from the discharge of excess pressure of gases into the environment are associated not only with economic losses, but also with environmental problems, primarily with greenhouse gas emissions and aerosol pollution of air and soil. An analytical review of existing ways of converting excess pressure energy into thermal energy in the processes of adiabatic compression or expansion has been conducted. These processes are most effectively implemented in compressors and expanders. At the same time, there are devices that allow simultaneously obtaining heat and cold, using external excess pressure as an energy source. These include devices based on the vortex effect, thermoacoustic effect, resonant-wave acoustic generators. The paper reviews existing devices for utilizing waste pressure, in particular, an emphasis is placed on using waste pressure energy to obtain cold. Based on an analysis of literary sources, the main information about the design features of these devices is provided: pulsation tubes, thermoacoustic generators, Hartmann generators, gas-jet acoustic generators, Rank–Hilsch generators. Their energy efficiency has been compared, their advantages and disadvantages have been identified, and promising areas of application have been identified. It is concluded that due to their high energy efficiency, simplicity of design and reliability, gas-jet acoustic generators can be used in a wide range of thermal and refrigeration technologies. They are promising for creating autonomous cooling systems, local air conditioning, thermal protection of equipment, as well as for converting excess pressure or heat into useful energy, which is especially relevant in the context of modern energy transformation and increasing requirements for energy efficiency of industrial processes.

Keywords: Secondary energy sources; Discharge pressure; Gas-jet acoustic generators; Hartmann generator; Pulsation tube; Rank-Hilsch tube

References

1. Kuris, Y.V., Volyar, R.M. (2023) Measurement of excess pressure in metallurgical processes. *Metallurg*, 4.
2. Ventilation systems. Retrieved 01 June 2025 from <https://ventsystems.com.ua/ua/g105762027-klapany-izbytochnogo-davleniya>.
3. Excess pressure valve. Retrieved 01 June 2025 from https://pershakaplya.com.ua/klapannadlyshkovo-gotytsku?srsId=AfmBOornZzc_gYpThWctzYUVTv0xEUeXBLUaKeQjZ7TifuZiXBI-NgTU
4. Overpressure sensor. Retrieved 01 June 2025 from http://celmet.com.ua/index.php?route=product/product&path=71_161_120&product_id=280.
5. Y.B. Duan, J. Wang, S.S. Wu, W. Wang, R.J. Huang, L.F. Li, Y. Zhou. (2025) Application of Stirling pulse tube cryocoolers in high temperature superconducting filters subsystems. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1240, 012133.
6. R. Ashish, Raghuvara K. Hebbar, T. N. Prateek, Karthik R. Kashyap, K. S. Rajendra Prasad. (2024) Numerical Investigation of Inertance Type Pulse Tube Cryocooler for Space Applications. *Fluid Mechanics and Fluid Power*, 3, 127-139.
7. Zhao, B., Ding, S. (2025) Optimization of the intermediate precooling temperatures for the 2 K hybrid cryocooler based on entropy generation analysis. *Case Studies in Thermal Engineering*, 68, 105887.
8. Fischer, B., Gschwendtner, M. (2025) Conceptual mechanical design of a rotating alpha-type stirling cryocooler for superconducting motor cooling. *Cryogenics*, 147, 104047.
9. Xu, S., Yang, B. (2025) Investigation of step piston pulse tube refrigerator. *Applied Thermal Engineering*, 258, 124659.
10. Takahashi, R., Kobayashi, K. P., Hiratuka, Y. (2010) Analysis of energy flow for thermoacoustic refrigerator. *Proceedings of Conference of Kanto*

Branch, 16, 271-272.

11. **Zhou, Q., Chen, Y.** (2025) Experimental study on a wet thermoacoustic Stirling engine for water pumping. *Applied Thermal Engineering*, 265, 125558.
12. **Biswas, S., Kresl, W.** (2025) On the relationship between acoustic absorption and temperature gradient in a thermoacoustic liner. *International Journal of Aeroacoustics*, 24, 1-2, 42-67.
13. **Fazli, M. Mazaheri, K.** (2025) Heat-driven thermoacoustic refrigeration: A comprehensive review of technologies, applications, trends and challenges. *Applied Thermal Engineering*, 260, 124996.
14. **Sun, W., Chen G.** (2025) Mode switching between electric-driven thermoacoustic refrigerator and heat pump. *Energy*, 317, 134607.
15. Sound energy. Retrieved 01 June 2025 from <https://www.soundenergy.nl/our-technology/>
16. **Kudo, Y., Sawada, S., Itouyama, N.** (2025) Temperature rise and pressure dynamics in the early stages of Hartmann-Sprenger tube operation. *Shock Waves*, 35, 169-184
17. **Bo, Z., Xiangji, G.** (2018) Prospective applications of Ranque-Hilsch vortex tubes to sustainable energy utilization and energy efficiency improvement with energy and mass separation. *Renewable and Sustainable Energy*, 89, 135-150.
18. **Gutak, A.D.** (2015) Experimental investigation and industrial application of Ranque-Hilsch vortex tube. *International Journal of Refrigeration*, 49, 93-98.
19. **Gokce, H.** (2020) Evaluation and Optimization of O₂ Used Ranque-Hilsch Vortex Tube Performance. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 43, 1566-1576.
20. Carrying wings. Retrieved 01 June 2025 from <https://modelistam.com.ua/ua/nesuschie-kryliya-chasti-geometriya-kryla-a-72/>
21. Diaphragm pumps in industry – working principle. Retrieved 01 June 2025 from https://emerem.com.ua/information/membranni-nasosi-v-promislovosti-princip-roboti/?srsltid=AfmBOoqCosLLeGYiG7GH2_h6p7kdAP0WjZkIDcINcpsQVxyvllOz5N1W
22. **Desyatov, A.T.** (1985) Cryogenic generators with pulsation and resonance tubes. *M.: TsINTIKHIM-NAFTMASH*, 43.
23. Pulse Tube Cryocoolers. Retrieved 01 June 2025 from <https://bluefors.com/products/pulse-tube-cryocoolers/>
24. RP-062B 4K Pulse Tube Cryocooler Series. Retrieved 01 June 2025 from <https://shicryogenics.com/product/rp-062b-4k-pulse-tube-cryocooler-series/>
25. Thermoacoustic Stirling Cryocooler How It Works. Retrieved 01 June 2025 from <https://www.rixindustries.com/thermoacoustic-stirling-cryocooler-how-it-works>
26. 10W@80K TC4187 stirling pulse tube cryocooler. Retrieved 01 June 2025 from https://www.global-sources.com/product/10w-80k-tc4187-stirling-pulse-tube-cryocooler_115411975_5f.htm
27. **Sajid Hameed Siddiqui, Akash Langde.** (2023) Performance analysis in the design of thermoacoustic refrigeration system: review. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 45, 7705-7731.
28. Piston Tubes. Retrieved 01 June 2025 from <https://store.dme.net/piston-tubes>
29. Hartmann valves and wellheads. Retrieved 01 June 2025 from <https://www.hartmann-valves.com/>
30. Ranque-Hilsch Vortex Tube. Retrieved 01 June 2025 from <https://xhnotation.en.made-in-china.com/product/nfWrjtmPIRVv/China-Xhnotation-Ranque-Hilsch-Vortex-Tube-Spot-Cooling-Tubing-Aluminum-Spot-Air-Cooler.html>
31. AiRTX Vortex Tubes (review). Retrieved 01 June 2025 from <https://www.airtx.net/airtx-vortex-tubes-review>
32. LLC «CRIO INTER TRADING». Retrieved 01 June 2025 from <https://cryo-tm.com.ua/>
33. Gas detection sytems and sensors. Retrieved 01 June 2025 from <https://www.bertin-technologies.com/products-range/gas-detection/>

Received 01 June 2025

Approved 23 June 2025

Available in Internet 04 July 2025