

льні значення не шляхом простого перебору варіантів, а використанням сучасних інформаційних систем пошуку оптимальних рішень.

### Список літератури

1. Губин Г.В. Аналитический обзор направлений улучшения качества магнетитовых концентратов/ Г.Г. Губин, В.Г. Губина, Л.В. Скляр, Т.П. Ярош // Збагачення корисних копалин. 2016. – Вип. 64(105) 18 с.
2. Ганженко И. М., Зарщикова Г. Г., Камалова Т. Б., Алексеева Л. А., Шестак Е. М., Якубайлик Э. К. Влияние размагничивания на процессы гидравлической классификации сильномагнитных руд // Обогащение руд. 2013. № 2. С. 13-16.
3. Пелевин А.Е. Влияние магнитной флокуляции на результаты обогащения железосодержащих руд // Обогащение руд. 2021. № 4. С. 13–16.
4. Равінська В. О. Обґрунтування технології дезінтеграції рудних флокулоутворень і агрегатів при магнітно-флотаційному збагаченні магнетитових кварцитів : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.15.08 – Збагачення корисних копалин – Кривий Ріг: [б. в.], 2019. – 248 с.
5. Ломовцев Л.А., Нестерова Н.А., Дробченко Л.А. Магнитное обогащение сильномагнитных руд. М.: – Недра, 1979, 235 с.
6. А.с. 293638. Устройство для размагничивания пульпы ферромагнитных материалов с разной коэрцитивной силой / Авт. изобрет. А.А. Статкевич, А.Ф. Харитоненко, Н.Г. Фролов и др. – Оpubл. В Б. И., 1971, №6.
7. А.с. 441964. Устройство для размагничивания пульпы ферромагнитных материалов / Авт. изобрет. Н.Н. Чайко, Э.Г. Файнштейн, С.Т. Толмачев, В.И. Ткач. – Оpubл. В Б. И. 05.09.1974, № 33.
8. Патент №15094. Пристрій для розмагнічування пульпи феромагнітних матеріалів / Авт. М.М.Чайко, С.Т.Толмачов, Е.Г.Кіриносів. – Оpubл. 15.06.2006.
9. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: учебник для бакалавров / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., исправ. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2016. – 701 с.
10. Немцов М. В., Шамаев Ю. М. Справочник по расчету параметров катушек индуктивности. – М.: Энергоиздат, 1981. – 136 с.

Рукопис подано до редакції 10.03.2022

УДК 697.957:532.575.54

О.В. ЗАМИЦЬКИЙ, д-р техн. наук, проф., В.А. ГРОМАДСЬКИЙ, канд. техн. наук, доц.,  
О.В. ІЛЬЧЕНКО, асистент  
Криворізький національний університет

## ВИБІР КОНСТРУКЦІЇ ЗМІШУВАЧА КОНТАКТНОЇ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ШАХТНОГО ТУРБОКОМПРЕСОРА

**Мета роботи.** Визначення та обґрунтування ефективної конструкції змішувача контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора.

**Методи дослідження.** У роботі використані теоретичні методи дослідження (аналіз, синтез, абстрагування, узагальнення).

**Наукова новизна.** Встановлено вперше, що найбільш ефективною конструкцією контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора змішувача є труба Вентурі з регульованим перерізом кільцевої горловини та центральним підводом води.

**Практичне значення.** Стиснене повітря – це чудове середовище для зберігання та передачі енергії. Воно відрізняється універсальністю, гнучкістю та відносно безпекою в порівнянні з іншими методами зберігання енергії, такими як акумулятори та пари. Жодна галузь промисловості не може обійтися без застосування стисненого повітря, яке є доступним і дешевим джерелом – як сировинним, так і енергетичним. Особливо широко стиснене повітря використовується в гірничорудній промисловості (рудовидобувній та паливобудувній). Для отримання стисненого повітря на шахтах використовують турбокомпресори. Для підвищення ефективності турбокомпресора використовують охолоджувачі стисненого повітря. Існує багато видів охолоджувачів, але найбільш перспективним є контактний охолоджувач труба Вентурі – відцентровий сепаратор. Конструктивна схема апарату контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора являє собою послідовно включені по повітрю змішувач типу труба Вентурі і відцентровий сепаратор-краплеуловлювач. Ефективність охолоджувача безпосередньо залежить від конструкції самої труби Вентурі, бо саме в ній відбувається контакт стисненого повітря з охолоджуючою рідиною. Холодна вода поступає в змішувач, після чого вона розпорошується потоком повітря. В суміші води та повітря відбувається тепломасообмін, при якому повітря охолоджується, а вода нагрівається. Розроблено рекомендації щодо конструктивних характеристик труби Вентурі для системи контактної охолодження шахтного турбокомпресора.

**Результати.** Існує безліч конструкцій труб Вентурі, які відрізняються між собою. В результаті аналізу визначено, що найбільш перспективною є конструкція з горловиною, що регулюється рухомим конусом та з центральним підводом зрошуючої води. Але необхідні більш детальні дослідження інших конструктивних параметрів контактної охолоджувача труба Вентурі.

**Ключові слова:** стиснене повітря, система охолодження, контактний повітроохолоджувач, труба Вентурі, горловина, газ, рідина.

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними завданнями.** Кожухотрубні охолоджувачі найчастіше використовуються для охолодження стисненого повітря, але з часом їх ефективність знижується через забруднення теплообмінних поверхонь. В результаті відбувається постійне погіршення охолодження повітря. Також через забруднення ребра труб зростають втрати тиску в апараті, що позначається на ефективності роботи турбокомпресорів [1-8]. Контактні охолоджувачі не мають таких недоліків, тому їх використання ефективніше ніж кожухотрубних. Найбільш вдалою конструкцією контактних охолоджувачів є охолоджувач труба Вентурі – відцентровий сепаратор [9-11]. Головну роль в контактному охолодженні відіграє труба Вентурі, але в попередніх дослідженнях обґрунтовано конструктивні та технологічні параметри змішувача з постійним перетином горловини. Це не дозволяє підтримувати раціональні характеристики турбокомпресора при режимах турбокомпресора які відрізняються від номінальних. Тому вибір її конструкції змішувача з регульованим перетином горловини є актуальним науковим завданням.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Конструкціям труб Вентурі присвячені роботи: Гічева Ю.А. [12], Сандуляк А.В. [14], Григор'єва В.П., Нечкіна Ю.М., Єгорова А.В., Нікольського Л.Є. [13], Юдашкіна М.Я., Карлова М.П. [15].

**Постановка задачі.** Ефективність контактної системи охолодження труба Вентурі – відцентровий сепаратор визначається конструкцією труби Вентурі. Існує багато конструкцій труб Вентурі, що відрізняються довжиною горловини і перетином, компонованням, способом підведення зрошуючої рідини тощо. Тому для обґрунтування та вибору конструкції труби Вентурі необхідні додаткові дослідження.

**Викладення матеріалу та результати.** Найбільш близькою конструкцією до контактного повітроохолоджувача є скрубери Вентурі. Скрубери Вентурі використовуються для охолодження газів і як високоефективні пиловловлювачі, що забезпечують очищення газу до дуже низької залишкової концентрації пилу. Конструктивно скрубери Вентурі є трубою, яку показано на рис.1, в якій здійснюється інтенсивне дроблення газовим потоком, що рухається з високою швидкістю (порядку 40-150 м/с), зрошуючої його рідини та встановленого за нею краплеуловлювача. Дія труби розпилювача аналогічно роботі пневмофорсунки та застосування труби Вентурі забезпечує мінімальні (не пов'язані з розпилом) гідравлічні втрати при проходженні газом розпилюючого пристрою. Застосування труби Вентурі для прискорення газу дозволяє зробити процес дроблення рідини з мінімальними гідравлічними втратами. Плавне звуження конфузора (оптимальне  $25\div 28^\circ$ ), а потім плавне розширення дифузора (оптимальне  $6\div 70^\circ$ ) роблять трубу Вентурі з аеродинамічного погляду найкращою для розпилювання зрошуючої води [12].

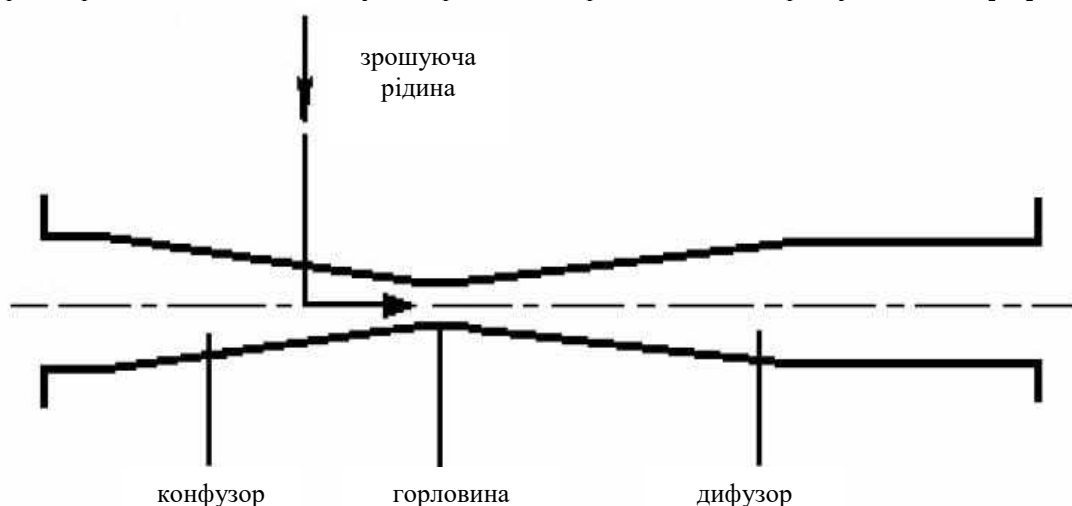
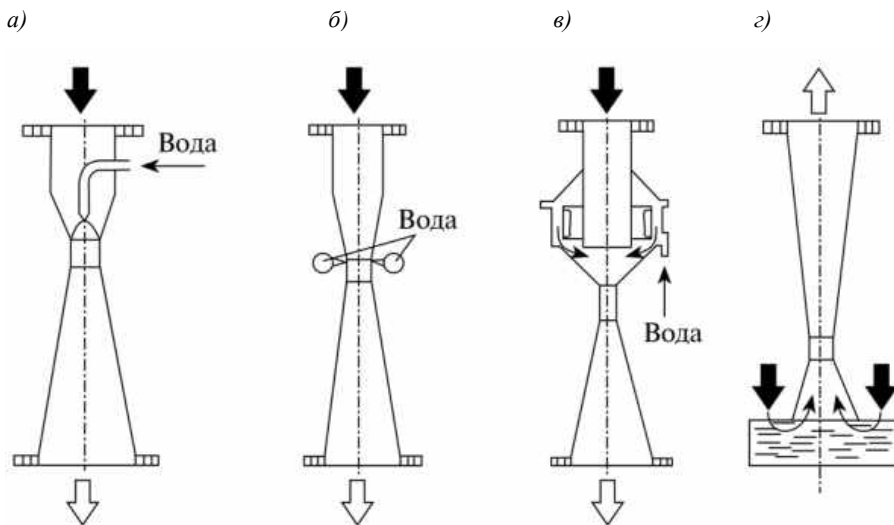


Рис.1. Труба Вентурі

Залежно від способу підведення зрошуючої рідини можна виділити основні типи апаратів: з центральним (форсуночним) підведенням рідини в конфузор (або перед ним); з периферійним

зрошенням (у конфузурі чи горловині); з плівковим зрошенням; із підведенням рідини за рахунок енергії газового потоку.



**Рис. 2.** Конструкції труб Вентурі: *а* – центральне (форсуночне) підведення рідини; *б* – периферійне зрошення; *в* – плівкове зрошення; *г* – безфорсуночне зрошення

У скруберах з центральним (форсунковим) підведенням рідини в конфузур типу подача зрошуючої рідини здійснюється форсунками, встановленими перед конфузуром або безпосередньо в ньому. Тиск нагнітання перед форсунками зазвичай становить від 0,2 до 0,3 МПа.

В основному застосовуються відцентрові (механічні авольвентні, цільнофакельні та ін.) форсунки.

Периферійна подача зрошуючої рідини використовується при подачі зрошення в конфузур чи горловину. У трубах-розпилювачах круглого перерізу зливні отвори зазвичай розташовуються по периметру конфузора або горловини, а в прямокутних трубах перерізу - з двох протилежних сторін, причому найбільш рівномірний розподіл зрошуючої рідини досягається при шаховому розташуванні зливних отворів. Подача рідини може бути здійснена за допомогою двох колекторів, що монтуються на протилежних стінках конфузора або горловини та мають отвори або прорізи по всій довжині.

Для запобігання утворенню відкладень на стінках конфузора та дифузора та можливості зрошення труби сильно забрудненої оборотною рідиною запропонована плівкова подача рідини. Плівкова подача може застосовуватися як спільно з подачею через форсунку або периферійною так і самостійно, головним чином у щільних трубах-розпилювачах. Для забезпечення кращого контакту газів з рідиною по периметру горловини труби з плівковим зрошенням рекомендується виконувати уступ. Для труб-розпилювачів з плівковим зрошенням велике значення має діаметр або ширина горловини. Розмір максимально можливого діаметра або ширини горловини залежить від швидкості газів, проте не рекомендується приймати його більше ніж 100 мм.

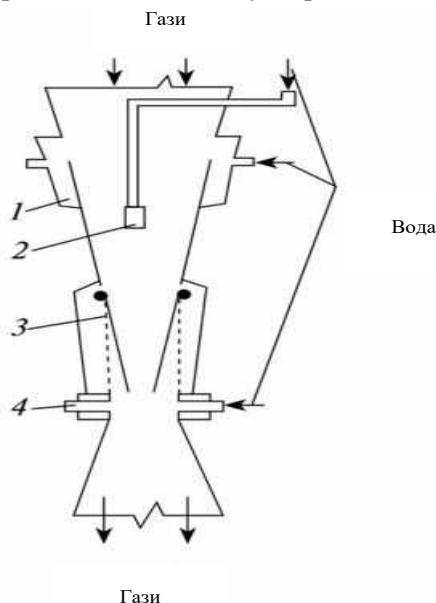
Скрубери Вентурі з підведенням рідини за рахунок енергії газового потоку (безфорсуночні скрубери Вентурі) застосовуються як абсорбери, але можуть застосовуватися і для пиловловлення, особливо при зрошенні оборотною рідиною з великою кількістю суспензії. Газ, що подається на очищення, контактує з поверхнею рідини, що знаходиться в приймальній чаші або іншій ємності, захоплює і захоплює за собою рідина у вигляді бризок і крапель у трубу-розпилювач. Гідравлічний опір апарату зростає із зростанням питомого зрошення, яке може бути збільшено як за рахунок підвищення швидкості газу (при постійному рівні рідини), так і за рахунок підвищення рівня рідини (при постійній швидкості газу). Так, наприклад, при швидкості газів у горловині труби-розпилювача 50—60 м/с збільшення питомого зрошення з 0,8 до 3,3 л/м<sup>3</sup> наводить до зростання гідравлічного опору апарату з 700 до 3000 Па. Гідравлічний опір безфорсуночної труби розпилювача нижче, ніж труби-розпилювача з форсунковим або периферійним ним зрошенням, при одних і тих же значеннях питомої витрати зрошуючої рідини та швидкості газів у горловині пояснюється «гіршим дробленням крапель у цьому апараті і наводить у свою чергу до його нижчої пиловловлюючої здібності.

Спосіб зрошення труб Вентурі не має вирішального значення для охолодження повітря, але найбільш вдалим є центральне (форсунковим) підведення рідини. Воно забезпечує найбільш рівномірну подачу рідини в горловину.

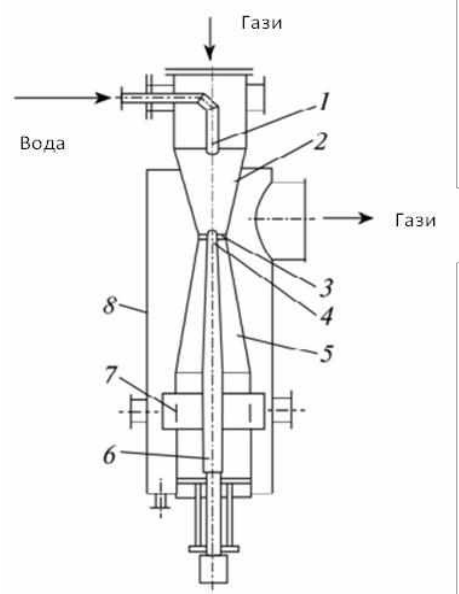
По виду поперечного перерізу труби Вентурі поділяються на круглі, кільцеві та щілинні. Круглі труби Вентурі застосовують при малих об'ємах газів, які охолоджують. При великих об'ємах газів застосовуються щілинні труби Вентурі з плівковим зрошенням або з кільцевою горловиною з центральним підведенням зрошення [13]. Так як ефективність контактного охолоджувача типу труба Вентурі – відцентровий сепаратор визначає швидкість газу в горловині, окремий інтерес представляє труба Вентурі з регульованим перетином горловини. Виконавчі механізми регуляторів перерізу виконуються у вигляді механічних чи пневматичних передач. В одному з випадків йдуть шляхом встановлення в горловині гнучких вставок або шторок із пружно-еластичного матеріалу, приклад якого зображено на рис.3.

«Енергосталь», наприклад, розробили конструкцію такої труби з поворотними лопатями. У таких пристроях матеріал гнучких вставок поступово втрачає свою еластичність, і горловина неадекватно реагує на зміни газового навантаження. При використанні регульованих шторок доводиться використовувати скруббер Вентурі прямокутного перерізу, який менш технологічний у виготовленні, і потрібно забезпечувати стійкість конструкції та додаткову жорсткість плоских стінок, оскільки системи газоочищення часто працюють під розрідженням. В роботі [14] вибрана труба Вентурі з прямокутним перерізом і регульованим розміром горловини, регулюючий засіб якої виконан у вигляді поворотних заслонок. Основним недоліком прототипа є ненадійність засобів для регулювання прохідного перерізу горловини труби, що обумовлено конструктивною неможливістю захисту від корозії всіх рухомих деталей механізму регулюючого засобу і його приводу, а також складний монтаж при ремонті або їх заміні. Для регулювання площі поперечного перерізу горловини також запропоновані горловини з еластичного матеріалу, що може стискатися під тиском стисненого повітря; труби Вентурі з рухомими стінками, які з'єднані між собою шарнірно і інші конструкції. Труба Вентурі з еластичною горловиною не набула промислового поширення через значну остаточну деформацію еластичного матеріалу. Регулювання перерізу горловини круглих труб Вентурі в деяких випадках може здійснюватись за допомогою дросельного пристрою.

У конструкції НДІОгаз регулювання перерізу здійснюється в одній площині переміщенням профільних кулачків, насаджених на спеціальні штоки. У цій конструкції регулювання перетину труби Вентурі здійснюється не тільки в перерізі горловини, але і в початковій ділянці дифузора та в кінці конфузору. Це зроблено для того, щоб винести зрив газового потоку до зони щодо низьких швидкостей. Недоліком конструкції є можливість заклинювання пристрою, що переміщається, у разі утворення відкладень.



**Рис. 3.** Труба Вентурі з регульованим перерізом щілинної горловини: 1 – кишеня плівкового зрошення; 2 – форсунка; 3 – регульовальні лопаті; 4 – форсунки



**Рис. 4.** Труба Вентурі з регульованим перерізом кільцевої горловини: 1 – форсунка; 2 – конфузор труби; 3 – горловина; 4 – регулюючий конус; 5 – дифузор; 6 – напрямний

нки нижнього ярусу зрошення

шток; 7 – відцентровий краплеуловлювач; 8 – корпус

В роботі [15] наведена схема регульованої труби Вентурі з рухомим конусом, показано на рис.4, що розташовується по осі труби і може здійснювати зворотно-поступальний рух за допомогою пневмоциліндра. Така конструкція набула найбільшого поширення та надійніша за всі інші.

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** Таким чином, проаналізувавши сучасні конструкції скрубєрів Вентурі, можна відмітити, що кожна конструкція має свої переваги та недоліки, але найбільш перспективною для контактної системи охолодження шахтного турбокомпресора є труба Вентурі з регульованим перерізом кільцевої горловини рухомим конусом та з центральним підведенням рідини. В подальшому планується проведення більш детальних досліджень, які полягають у визначенні конструктивних параметрів контактної охолоджувача труба Вентурі – відцентровий сепаратор з регульованим перерізом кільцевої горловини рухомим конусом та з центральним підведенням рідини.

#### Список літератури

1. Мурзин В. А., Цейтлин Ю. А. Рудничные пневматические установки. Недра. 1965. 312 с.
2. Мурзин В. А., Цейтлин Ю. А. Турбокомпрессоры в горной промышленности. Госгортехиздат. 1962. 72 с.
3. Мурзин В. А., Цейтлин Ю. А. Определение экономически целесообразной периодичности очистки промежуточных воздухоохлаждателей шахтных турбокомпрессоров. *Горная электромеханика и автоматика*. 1980. Вып. 36. С. 65–68.
4. Мурзин В. А., Цейтлин Ю. А. Упрощенный пересчет характеристик турбокомпрессоров при промышленных испытаниях их. *Изв. вузов МВ и ССО. Энергетика*. 1962. № 11. С. 21–25.
5. Мурзин В. А., Цейтлин Ю. А. Рудничные пневматические установки. Недра. 1965. 312 с.
6. Степанов А. И. Центробежные и осевые компрессоры, воздуходувки и вентиляторы. Пер. с англ.– М.: Машгиз, 1960.–342 с.
7. Борохович А. И., Борохович Б. А., Закиров Д. Г. Оптимальный срок очистки промежуточных пленочных холодильников поршневых компрессоров от осадков. *Изв. вузов. Горный журнал*. 1985. № 2. С.61–65.
8. Рис В. Ф. Центробежные компрессорные машины. Машгиз. 1951. 245с.
9. Замыцкий О.В. Анализ способов охлаждения при производстве сжатого воздуха для горных машин. *Горный информационно-аналитический бюллетень. МГГУ*. 2001. №10. С.67-70
10. Замыцкий О. В. Контактное охлаждение сжатого воздуха в турбокомпрессорах. *Вісник Криворізького технічного університету*. 2005. №17. С. 285-288.
11. Замыцкий О.В. Выбор параметров контактных воздухоохлаждателей рудничных турбокомпрессоров. *Вісник Криворізького технічного університету: Зб. наук. пр. Вип. 6. Кривий Ріг: КТУ, 2005. С.85-88.*
12. Гичев Ю.А. Очистка газов. Часть I: Конспект лекций. Днепропетровск: НМетАУ, 2015. 51 с.].
13. Сандуляк А.В. Новое в технике и технологии физических методов очистки жидкостей и газов. К.: Вища школа, 1989. 55 с.
14. Григорьев В.П., Нечкин Ю.М., Егоров А.В., Никольский Л.Е. Конструирование и проектирование агрегатов сталеплавильного производства, М.: МИСиС, 1995. 512 с
15. Юдашкин М.Я., Карлов М.П. Механическое оборудование установок очистки газов. М: Металлургия, 1979. 247 с.

Рукопис подано до редакції 10.03.2022

УДК 621.311

С.М. БОЙКО, канд. техн. наук, Національний університет «Запорізька політехніка»  
І.В. КАСАТКІНА, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет  
О.В. ДАНИЛІН, канд. техн. наук, доц., Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## ВПЛИВ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ВПРОВАДЖЕННЯ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ

**Мета.** Метою даної роботи є аналіз впливу та особливостей впровадження відновлювальних джерел електричної енергії в системи електропостачання.

Для досягнення поставленої мети проаналізовано основні показники якості електричної енергії та особливості під'єднання джерел електричної енергії до мережі та проаналізована можливість і специфіка роботи розподілених джерел електроенергії на базі відновлювальних джерел електроенергії.