

Висновки та напрямок подальших досліджень. Підготовка якісного фахівця в сучасних умовах неможлива без поєднання абстрактних теоретичних знань з вищої математики з практичними завданнями, що формують його компетентності. Виходячи з цього, в статті окреслено систему професійно-орієнтованих задач з розділу вищої математики «Функції багатьох змінних» для здобувачів вищої освіти спеціальності «Гірництво». Акцентовано увагу на наступність застосування методів цього розділу вищої математики у науково-дослідницькій діяльності провідних вчених-гірників університету і підготовки фахівців за цією спеціальністю. Запропонована методика викладання матеріалу дає можливість усвідомлено підходити до вивчення фахових дисциплін, виконання кваліфікаційних та науково-дослідних робіт. Такий пропедевтичний підхід не обмежується тільки зазначеним розділом і може бути поширений й на інші розділи вищої математики, що є напрямком подальших досліджень.

Список літератури

1. **Schulte P.** The entrepreneurial university: a strategy for institutional development. Higher education in Europe. 1998. Vol. 29. Is. 2. P. 187-191.
2. **Безусова Т.А.** Пути организации компетентного подхода в сфере высшего профессионального образования. Фізико-Математична Освіта. № 1 (15). 2018. С. 137-141.
3. **Тимошенко І.В., Мороз С.Є., Калашник О.В.** Комерціалізація вищої освіти: баланс між перевагами та ризиками. БізнесІнформ. № 6. 2021. С. 72-77.
4. **Vaskivska, H.** Didactic aspects of upper secondary and university education fundamentalization. Science and Education. 2017. Issue 5. P. 46-50.
5. **Мурашківська В.П., Казнадій С.П.** Окремі аспекти формування професійної компетентності майбутніх інженерів-механіків у процесі математичної підготовки у ВНЗ. Фізико-Математична Освіта. № 4 (18). 2018. С. 121-125.
6. **Завсєгдашний В.А.** Теоретические и методологические основы автоматизированного планирования горных работ железнорудных карьеров: дис. докт. техн. наук: 05.15.03. Кривой Рог, 1997. 247 с.
7. **Бизов В.Ф.** Управление качеством продукции карьеров: учеб. пособ. Москва: Недра, 1991. 239 с.
8. **Вілкул Ю.Г., Слободянюк В.К., Максимов І.І.** Оптимізація кількості концентраційних горизонтів при використанні автомобільно-конвеєрного транспорту. Розробка рудних родовищ. 2010. Вип.94. с.59-63.
9. **Астафьев Ю.П.** Добыча руд открытым способом за рубежом. Москва, 1983. 325 с.
10. **Бизов В.Ф., Вілкул Ю.Г., Максимов І.І.** Частотный состав колебаний качества руды на карьерах Кривбасса. Горный журнал. 1982. № 5. С. 35-37.
11. **Ковальчук В.А., Ковальчук Т.М.** Планування режиму гірничих робіт у кар'єрах: монографія. Кривий Ріг: Видавничий центр КТУ, 2009. 211 с.

Рукопис подано до редакції 11.11.2021

УДК 621.181:62

В.В. СУРТАЄВ, канд. техн. наук, доц., Криворізький національний університет

ПАРАМЕТРИ РОБОТИ ТЕПЛОУТИЛІЗАЦІЙНИХ УСТАНОВОК, ПРИСТРОЮ ТА СИСТЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПАРОГАЗОВИХ ВИКИДІВ З ТЕПЛОВИМИ НАСОСАМИ

Мета. Метою роботи є встановлення закономірностей процесу тепломасообміну в системах, пристроях та установках утилізації тепла з використанням теплонасосних установок (ТНУ), розробці ефективних рішень по їх використанню, в даному аспекті дослідження: проаналізовано стан питання енергозбереження вторинних енергоресурсів та їх ефективність використання, розвиток використання перспективного обладнання електро- і теплогенерації на низькокиплячих РТ.

Методи дослідження. Аналіз стану питання; математичне моделювання з визначенням обґрунтованих параметрів і дослідження енергетичної ефективності використання парогазових сумішей і можливостей генерації теплоти, електроенергії; визначення конструктивних параметрів і параметрів контактної тепломасообміну в контактному апараті на базі «форсунок камер» і їх впливу на ефективність роботи теплоутилізаційної системи, пристрою і установок з використанням, обладнання електро- і теплогенерації на низькокиплячих РТ.

Наукова новизна полягає в тому, що: аналізом і математичним моделюванням отримано графічну залежність між коефіцієнт трансформації теплового насосу 3,5-6,5 в діапазоні параметрів теплоносія – температура 5-30 (джерела вторинних енергоресурсів), стосовно до розроблених енергозберігаючих та екологічно безпечних технологій утилізації теплоти процесів мокрого гасіння коксу та мокрої грануляції металургійних шлаків та інших наявних джерел, у тому числі шахтних вод і т.п. що представлені в Україні в цілому та Криворізькому регіоні зокрема.

Практична значимість. Розробка рекомендацій по впровадженню ТНУ: перевірка і техніко-економічне обґрунтування систем, пристроїв та установок утилізації тепла теплоенергетичного і електро- і теплогенерації на низькокипячих РТ; розробка рекомендацій по їх застосуванню.

Результати. Висвітлені в НДР на тему «Обґрунтування параметрів систем утилізації тепла теплоенергетичного обладнання» (номер державної реєстрації РК№ 0116U001825) і у науковій праці «Теплові насоси в промисловій і комунальній сферах України» (кер. Суртаєв В.В.). Представлені науково-практичні результати у вигляді графічної залежності для визначення коефіцієнта трансформації ТНУ в діапазоні параметрів теплоносія (джерела вторинних енергоресурсів).

Ключові слова: форсункова камера, тепло - і масообмін, утилізація теплоти, обладнання, установка

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-53-76-85

Проблема та її зв'язок з науковими і практичними задачами. Тепловий насос (ТНУ) як засіб використання вторинних енергоресурсів. Стан питання енергозбереження в Україні підтверджує актуальність даного вибраного досліджуваного питання використання ТНУ з теплоутилізаційними установками, в наш час, є важливою науковою задачею [1-5, 10, 15].

Незбалансоване внутрішнє споживання паливно-енергетичних ресурсів має наслідком зниження якості життя населення [5, 14]. Під останнім розуміється те, що функціонування існуючих теплоенергетичних потужностей з застарілими енергетично витратними технологіями, підтримується шляхом інвестування проектів їх реабілітації, а не впровадженням сучасних енергетично ефективних технологій. Це значить, що в результаті такого інвестування не вирішуються питання раціонального використання енергоресурсів.

Аналіз досліджень та публікацій. Використання ТНУ для потреб теплопостачання. З кожним роком стає більш актуальним питання, пов'язані з подальшими шляхами розвитку енергетики. З однієї сторони, ріст населення, прагнення до підвищення життєвого рівня людей диктують доцільність нарощування потужностей енергетики, і в першу чергу електроенергетики, причому просто гігантськими темпами; з іншого боку, що виникають екологічні проблеми, виснаження природних джерел сировини, і, у першу чергу, нафти і газу, що вимагає більше економічного й раціонального використання отриманої енергії і потенційної енергії її джерел.

Згідно останнім даним Мірової енергетичної ради, надрукованим в звіті «Енергія для завтрашнього миру», доведені досяжні запаси органічного палива в світі складають 1220 млрд.т.у.п., тоді як недосяжні ресурси, оцінені досить умовно - в 4,5 рази більше. З врахуванням традиційних ресурсів (важкої нафти, природного газу, бітуму і нафтових сланців) це дане перевищення над вказаними запасами буде складати близько 5,2 рази. Прагнення зменшити витрати первинної енергії без зниження або навіть зі збільшенням віддачі енергії кінцевому споживачеві за рахунок більш раціонального способу її перетворення – головна тенденція сучасної науки і техніки. Прагнення раціонально витратити енергію зближає народи – це видно по діяльності Міжнародного енергетичного агентства і Європейського економічного співтовариства, що фінансують спільні енергетичні проекти [5]. Основними недоліками традиційних джерел теплопостачання є порівняно малі, економічна і екологічна ефективність (традиційні теплові мережі є одним з основних джерел забруднення більших міст), крім того, високі транспортні тарифи на доставку енергоносіїв збільшують негативні фактори.

Всі перераховані негативні фактори традиційного теплопостачання настійно вимагають інтенсивного використання нетрадиційних методів. Одним з таких методів є корисне використання розсіяної низькотемпературної природної теплоти або скидної промислової теплоти для теплопостачання з ТНУ. В роботах висвітлено [4, 8, 16, 17], що ТНУ, знайшли широке застосування за рубежом, їх масове виробництво налагоджено практично у всіх розвинених країнах.

Постановка задачі. У порівнянні з традиційними системами теплопостачання ТНУ має ряд переваг, а саме: економічність, ТНУ використовує підведену енергію ефективніше любих традиційних джерел теплової енергії, що використовують паливо. Зазвичай ТНУ порівнюють по особливій величині – коефіцієнту перетворення теплоти (ϕ), серед інших його назв використовують: коефіцієнт трансформації теплоти, потужності, перетворення температур. Він характеризує відношення отриманої теплоти до витраченої енергії. Наприклад, $\phi = 3,5$ означає, що підводячи до машини 1 кВт, на виході отримаємо 3,5 кВт теплової потужності. В середньому від 60 до 75% потреби теплопостачання дому від ТНУ забезпечується безкоштовно. Дійсні, первісні витрати на насос і монтаж системи збору теплоти досить відчутні і складають приблизно 300-1200 дол. США на 1 кВт потреби в потужності опалення. Але капіталовкладення окуп-

ляться за 4-9 років тільки за рахунок економії палива і електрики. Слугують вони по 15-20 років до капремонту, в той же час як газове опалювальне обладнання потребує постійного обслуговування, в іншому випадку воно стає небезпечним. В перспективі, в зв'язку з зростанням цін на всі види палива, їх лідерство забезпечено [5, 7]. Повсюдність застосування ТНУ - джерело розсіяного тепла можна знайти практично в будь-якому куточку планети (це стосується промислових, геотермальних і інших джерел теплоти) [5, 7].

Що ж стосується екологічності, то в ТНУ, як відомо, не призводить до утворення шкідливих викидів які містять: CO, CO₂, NO_x, SO₂ і ін., тому не відбувається забруднення ґрунтів, тобто відсутні сліди: сірчаної, азотної, фосфорної кислот и бензолних з'єднань. Фреони, що застосовуються в теплових насосах, не містять хлорвуглеводнів і тому озонобезпечні [5, 7, 19]

Приймаючи питому витрату на виробку 1 кВт·год. електроенергії рівною 300 г у.п., не важко, дати порівняльну оцінку шкідливих викидів за опалювальний сезон (5448 год.) від різних теплоджерел (табл. 1 – теплової потужності 1,16 МВт).

Слід зазначити універсальність ТНУ - теплові насоси мають властивість оборотності (реверсивності). Вони можуть відбирати теплоту з повітря будинку, забезпечуючи його кондиціювання в літній період. Безпека. Ці агрегати вибухо- і пожаробезпечні. Ні палива, немає відкритого вогню, небезпечних газів або сумішей. Жодна деталь не нагрівається до температур, здатних викликати загоряння горючих матеріалів. Зупинки ТНУ не приводять до його поломок або замерзання рідин [6]. Таким чином, потенційні ресурси поновлюваних джерел енергії становлять істотну частку потреб людства в енергії. Світове споживання цих даних джерел на сьогоднішній день становить лише незначну частку. Це пояснюється в першу чергу тим, що в силу низької концентрації не поновлюваних джерел енергії і їх нерівномірного розподілу по поверхні Землі питомі витрати на одиницю потужності і вартість енергії при сучасних технологіях дуже великі, і не можуть конкурувати із традиційними джерелами енергії. Саме тому, використання низькопотенційних джерел енергії для цілей теплопостачання є важливим і актуальним напрямком сучасної й перспективної енергетики, а ТНУ - перспективними енергетичними установками, що використовують низькопотенційні джерела енергії, про що детально висвітлено у роботі [5].

Таблиця 1

Порівняльна оцінка шкідливих викидів за опалювальний сезон (5448 год.) від різних теплоджерел (наприклад, тепловою потужністю 1,16 МВт [19])

Вид шкідливого викиду, т/рік	Котельня на вугіллі	Електрообігрів	ТН, з середньорічним КОП = 3,6
SO _x	21,77	38,02	10,56
NO _x	7,62	13,31	3,70
Тверді часточки	5,8	8,89	2,46
Фтористи з'єднання	0,182	0,313	0,087
Всього	34,65	60,53	16,81

Викладення матеріалу і результати. Наприклад, на коксохімічному виробництві КДГМК «Криворіжсталь», у зв'язку з виведенням із експлуатації технології сухого гасіння коксу, охолодження коксу провадиться за технологією мокрогасіння. Остання характеризується тим, що з парогазовими викидами в атмосферу міста втрачається близько 1,5 млн. Гкал. теплоти на рік (на опалення однієї трикімнатної квартири в кліматичній зоні Кривого Рогу потрібно 10-12 Гкал. теплоти на опалювальний сезон), при цьому завдається значна шкода навколишньому середовищу тому, що так звана «технічна гасильна вода», яку використовують для гасіння коксу, містить в значних кількостях забруднюючі речовини, що висвітлено в роботах [7, 9, 11, 12, 27]. Також важливо виділити наступний факт: втрати теплової енергії з парогазовими викидами в установках для мокрої грануляції доменних шлаків у другому доменному цеху (ДП-9) ВАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг» складають близько 44 тис. Гкал. на рік на кожній грануляційній (загальні втрати в процесах мокрої грануляції металургійних шлаків складають – 2,5 млн. Гкал. і супроводжуються забрудненням атмосферного повітря міста). Слід відмітити що, в наш час, існує запатентована авторами енергозберігаюча технологія мокрої грануляції металургійних шлаків (патент України №55206А [1, 4]), яка дозволяє вирішити дані проблеми при відносно невеликих інвестиціях. Реалізація теплової енергії в теплові мережі міста з вартістю, яка на 30-45% нижча за діючі тарифи забезпечить також експлуатацію очисних споруд, дасть можливість реконструювати місцеві теплові мережі для транспортування теплоносія [13, 2]. Відомості

про інші джерела наявних втрат паливно-енергетичних ресурсів, в тому числі в Криворізькому регіоні, детально викладені в роботах [2, 5].

ТНУ як засіб використання вторинних енергоресурсів. Теплопостачання в умовах України з її тривалими і досить суворими зимами вимагає великих витрат палива, які перевершують майже в 2 рази витрати на електропостачання, що детально висвітлено в роботах [3, 8]. Використання теплових насосів для потреб теплопостачання детально описані в роботах [3, 8]. Всі перераховані негативні фактори традиційного теплопостачання настійно вимагають інтенсивного використання нетрадиційних методів. Одним з таких методів є корисне використання розсіяної низькотемпературної природної теплоти або скидної промислової теплоти для теплопостачання за допомогою ТНУ [3]. ТНУ, на відміну від перерахованих недоліків традиційних джерел, знайшли широке застосування за кордоном, що висвітлено у роботі [5, 9], зокрема, масове виробництво теплових насосів налагоджено практично у всіх розвинених країнах.

Основні переваги ТНУ. ТНУ використовує підведену енергію ефективніше будь-яких традиційних джерел теплової енергії, що використовують паливо. Зазвичай ТНУ порівнюють по особливій величині - коефіцієнту перетворення теплоти (ϕ), серед інших його назв використовують: коефіцієнт трансформації теплоти, потужності, перетворення температур. Він характеризує відношення отриманої теплоти до витраченої енергії. Наприклад, $\phi = 3,5$ означає що підвівши до машини 1 кВт, на виході ми отримаємо 3,5 кВт теплової потужності. У середньому від 60 до 75 % потреб теплопостачання будинку від ТНУ забезпечується безкоштовно що підтверджує їх економічність. Дійсно, початкові витрати на насос і монтаж системи збору теплоти досить відчутні і становлять приблизно дол. США 300-1200 на 1 кВт потреби в потужності на опалення. Але капіталовкладення окупляться за 4-9 роки тільки за рахунок економії палива та електрики. Служать вони по 15-20 років до капремонту в той час як газове опалювальне обладнання потребує постійного обслуговування, в іншому випадку воно стає небезпечним. У перспективі, у зв'язку із зростанням цін на всі види палива, їх лідерство забезпечене [7]. Повсюдність застосування обумовлена практично повсюдністю джерел розсіяної теплоти можливо знайти практично у будь-якому куточку планети [12].

Екологічність полягає в тому, що в ТНУ можуть бути використані фреони що не містять хлорвуглеводнів і тому озонобезпечні [7, 9, 19] Універсальність ТНУ полягає у властивості оборотності (реверсивності). Вони можуть відбирати теплоту з повітря будинку, забезпечуючи його кондиціонування в літній період [3]. Ці агрегати вибухо- та пожегобезпечні. Жодна деталь не нагрівається до температур, здатних викликати загоряння горючих матеріалів. Зупинки ТНУ не призводять до його поломок або замерзання рідин [6, 7, 9, 17, 19].

Принцип дії ТНУ полягає в перенесенні теплової енергії від джерела низькопотенційної теплової енергії (з низькою температурою) до споживача (теплоносія) з більш високою температурою. Термодинамічно ТНУ являє собою обернену холодильну машину. Якщо в холодильній машині основною метою є виробництво холоду, шляхом відбору теплоти, з будь-якого об'єму випарником, а конденсатор здійснює скидання теплоти в навколишнє середовище, то в ТНУ картина зворотня. Конденсатор є теплообмінним апаратом, виділяє теплоту для споживача, а випарник - теплообмінним апаратом, що утилізують низькопотенційну теплоту: вторинних енергетичних ресурсів і (або) нетрадиційних відновлюваних джерел енергії [5].

Основу експлуатованого сьогодні у світі парку теплонасосного обладнання складають пароконпресорні ТНУ, але застосовуються також і абсорбційні, електрохімічні та термоелектричні. Ефективність ТНУ прийнято характеризувати величиною безрозмірного коефіцієнта трансформації енергії K_{mp} (див. рис. 1-4), що визначається для ідеального циклу Карно за такою формулою [20]

$$K_{mp} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} , \quad (1)$$

де T_1, T_2 – температури, відповідно, на виході і на вході насоса.

Коефіцієнт трансформації ТНУ, або теплонасосної системи теплопостачання (ТСТ) K_{mp} представляє собою відношення корисної теплоти, що відводиться в систему ТСТ, до енергії, що витрачається на роботу ТСТ, і чисельно дорівнює кількості корисної теплоти, отриманої при температурах T_1 і T_2 , на одиницю енергії, витраченої на привід електродвигуна. Реальний коефіцієнт трансформації відрізняється від ідеального на величину коефіцієнта h , враховує ступінь

термодинамічної досконалості і незворотні втрати енергії при реалізації циклу. При побудові залежностей, ступінь термодинамічної досконалості h була прийнята рівною 0,55, а температурний напір (різниця температур хладону і теплоносія) у конденсаторі і в випарнику ТНУ дорівнювала $7\text{ }^{\circ}\text{C}$ [5, 15]. Ці значення ступеня термодинамічної досконалості h і температурного напору між хладоном і теплоносіями системи опалення та теплозбору представляються близькими до дійсності з точки зору врахування реальних параметрів теплообмінної апаратури (конденсатор і випарник) ТНУ, а також суміжних витрат електричної енергії на привід циркуляційних насосів, систем автоматизації, запірної і керуючої арматури. У загальному випадку ступінь термодинамічної досконалості ТСТ h залежить від багатьох параметрів, таких, як: потужність компресора, якість виробництва комплектуючих ТНУ і необоротних енергетичних втрат, які, у свою чергу, включають [5, 15, 20]: втрати теплової енергії в сполучних трубопроводах; - втрати на подолання тертя в компресорі; втрати, пов'язані з неідеальними теплових процесів, що протікають в випарнику і конденсаторі, а також з неідеальними теплофізичних характеристик хладонів; механічні та електричні втрати в двигунах та ін.

У роботі [5, 20] представлені «середні» значення ступеня термодинамічної досконалості h для деяких типів компресорів, використовуваних у сучасних ТСТ. Як і холодильна машина, ТНУ споживає енергію на реалізацію термодинамічного циклу (привід компресора). Коефіцієнт перетворення ТНУ залежить від рівня температур в випарнику і конденсаторі і коливається в різних системах в діапазоні від 2,5 до 5, тобто на 1 кВт витраченої електричної енергії ТНУ виробляє від 2,5 до 5 кВт теплової енергії. Звичайний експлуатаційний температурний рівень теплопостачання від ТНУ знаходиться в межах від 35 до $55\text{ }^{\circ}\text{C}$. При цьому економія енергетичних ресурсів сягає 70 %. Промисловість розвинених країн випускає широкий асортимент парокompресійних ТНУ тепловою потужністю від 5 до 1000 кВт [5, 20]. Типи ТНУ. Залежно від принципу роботи ТНУ поділяються на компресійні та абсорбційні. Компресійні ТНУ завжди приводяться в дію за допомогою механічної енергії або електроенергії, в той час як абсорбційні ТНУ можуть також використовувати теплоту в якості джерела енергії, тобто діяти за допомогою електроенергії або палива.

Згідно роботи [21], залежно від джерел теплоти, ТНУ поділяються на геотермальні: засновані на використанні теплоти землі, наземних або підземних ґрунтових вод – замкнутого типу: горизонтальні, з розміщенням колекторів у горизонтальних траншеях нижче глибини промерзання ґрунтів, при цьому колектор розміщується кільцями або звивисто (зазвичай на глибинах від 1,20 м і більше). Такий спосіб є найбільш економічно ефективним для житлових об'єктів за умови відсутності дефіциту земельної площі під контур [22]; вертикальні, з розміщенням колекторів в свердловині глибиною до 200 м і застосовується у випадках коли площа земельної ділянки не дозволяє розмістити контур горизонтально або існує загроза пошкодження ландшафту: водні колектори розміщується звивисто або кільцями у водоймі (озері, ставку, річці) нижче глибини промерзання. Це найбільш дешевий варіант, але є вимоги щодо мінімальної глибини і об'єму води в водоймі для конкретного регіону; б) відкритого типу – подібна система використовує в якості теплообмінної рідини воду, що циркулює безпосередньо через систему геотермального ТНУ у відкритому циклі, тобто вода після проходження по системі повертається в землю. Цей варіант можливо реалізувати на практиці лише за наявності достатньої кількості відносно чистої води і за умови, що такий спосіб використання ґрунтових вод не заборонений законодавством. Повітряні. Джерелом відбору теплоти є повітря. Використовується похідна теплота (вторинні енергоресурси) (наприклад, теплота трубопроводів центрального опалення). Подібний варіант є найбільш доцільним для промислових об'єктів, де є джерела низькопотенційної теплоти, яке вимагає утилізації [22]. По виду теплоносія у вхідному і вихідному контурах ТНУ поділяють на шість типів: «ґрунт-вода», «вода-вода», «повітря-вода», «ґрунт-повітря», «вода-повітря», «повітря-повітря». У роботі [20] наведені основні характеристики деяких типів ТНУ.

Джерела низькопотенційної енергії. Відбір теплоти від повітря. Ефективність і вибір певного джерела теплової енергії сильно залежить від кліматичних умов, особливо, якщо джерелом відбору теплоти є атмосферне повітря. По суті цей тип більш відомий у вигляді кондиціонера. У країнах з жарким кліматом таких пристроїв десятки мільйонів. Для північних країн найбільш актуальний саме обігрів взимку. Системи «повітря-повітря» використовуються і взимку при температурах до мінус $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Але їх ефективність різко падає. При більш сильних морозах потрібно додаткове опалення [23]. В роботах [5, 23, 24] зокрема детально розглянуто від-

бір теплоти від гірської породи, відбір теплоти від ґрунту. Якщо теплота із зовнішнього контуру все ж таки недостатньо для опалення в сильні морози, практикується експлуатація насоса в парі з додатковим генератором теплоти (у таких випадках говорять про використання бівалентної схеми опалення). Коли вулична температура опускається нижче розрахункового рівня (температури бівалентності), в роботу включається другий генератор теплоти - найчастіше невеликий електронагрівач [24].

Обмеження застосовності ТНУ. Основним недоліком ТНУ є зворотна залежність його ефективності від перепаду температур між джерелом теплоти і споживачем. Це накладає певні обмеження на використання систем типу «повітря - вода». Реальні значення ефективності сучасних ТНУ становлять близько 2,0 при температурі джерела - +20 °С, і порядку 4.0 при температурі джерела - +7 °С. Це призводить до того, що для забезпечення заданого температурного режиму споживача при низьких температурах повітря необхідно використовувати обладнання зі значною надлишковою потужністю, що пов'язане з нераціональним використанням капіталовкладень (втім, це стосується і будь-яких інших джерел теплової енергії). Вирішенням цієї проблеми є застосування так званої амбівалентної схеми опалення, при якій основну (базову) навантаження несе ТНУ, а пікові навантаження покриваються допоміжним джерелом (наприклад, газовий або електричний котли). Оптимальна потужність ТНУ становить 60 ... 70 % від необхідної встановленої потужності. У цьому випадку ТНУ забезпечує не менше 95 % потреби споживача в тепловій енергії за весь опалювальний сезон. При такій схемі середньосезонний коефіцієнт перетворення енергії для кліматичних умов Центральної Європи дорівнює приблизно 3 [5, 25]. Коефіцієнт використання первинного палива для такої системи легко визначити, виходячи з того, що ККД теплових електростанцій становить від 40 % (теплові електростанції конденсаційного типу) до 55 % (парогазові електростанції). Відповідно, для розглянутої ТНУ установки коефіцієнт використання первинного палива знаходиться в межах 120 .. 165 %, що в 2 .. 3 рази вище, ніж відповідні експлуатаційні характеристики газових котлів (65 %) або систем центрального опалення (50 ... 60 %). Зрозуміло, що системи, що використовують геотермальний джерело теплоти або теплоту ґрунтових вод, вільні від цього недоліку. Наслідком цього ж недоліку є необхідність використання низькотемпературних систем опалення (системи поверхневого нагріву типу «тепла підлога» та ін. Проте це обмеження стосується тільки застарілих радіаторних систем опалення, практично не знаходять застосування в сучасних технологіях будівництва [25].

Перспективи розвитку ТНУ висвітлені в роботі [25]. Існує і альтернативний погляд на економічну доцільність встановлення ТНУ. Тому масове використання ТНУ у приватному секторі можна очікувати якщо вартість ТНУ обладнання буде порівнянна з витратами на установку газового опалення та підключення до газової мережі. Ще більш багатообіцяючою є система, що комбінує в єдину систему теплопостачання геотермальне джерело і ТНУ. При цьому геотермальне джерело може бути як природного (вихід геотермальних вод), так і штучного походження (свердловина із закачуванням холодної води в глибокий шар і виходом на поверхню нагрітої води) [25].

Розрахунок ТНУ. Економічний розрахунок доцільності застосування ТНУ для гарячого водопостачання. Розглянемо, для прикладу, шахту, кількість яких у Кривому Розі та й в цілому в Україні достатньо значна. На шахтах є постійне джерело низькопотенційного теплоносія з температурою в межах 10-12 °С. Це скидна шахтна вода, при її використанні в ТНУ на 1 кВт витраченої електроенергії може бути отримано 3,7 кВт теплової. Коефіцієнт ϕ ефективності ТНУ залежить від температури низькопотенційного теплоносія (в даному випадку шахтна вода). Так, наприклад, при температурі +5 °С він дорівнює 3,6, при +10 °С - 4,06, при +15 °С - 4,6, +20 °С - 5,35, +25 °С - 5,98, +30 °С - 6,64, +35 °С - 7,19, +40 °С - 7,93 [26, 15].

Наведемо приклад економічного аналізу доцільності використання ТНУ для гарячого водопостачання шахти. Застосовано тепловий насос ТН - 300, у якого при споживаній потужності 90 кВт номінальна потужність 300 кВт. На шахті для гарячого водопостачання банно-прального комплексу в літній час використовується котел потужністю 8 МВт, що споживає близько 400 т вугілля на місяць. На гаряче водопостачання (прийємо до розрахунку вартість 1 т вугілля (наприклад 59 грн.) влітку для шахти витрати $C_u = 23,6$ тис. грн. на місяць, а за п'ять місяців літнього періоду - 118 тис. грн. Введення в дію ТНУ не тільки виключить ці витрати, але й дозволить повністю зупинити котельню в літню пору [26, 15].

Для роботи ТНУ необхідне джерело помірно теплої води. На шахті з горизонту 400 м постійно відкачується близько $400 \text{ м}^3/\text{год.}$ води з температурою $10\text{-}15 \text{ }^\circ\text{C}$ залежно від пори року, що достатньо для нормального режиму роботи ТНУ (необхідний витрата води $40\text{-}50 \text{ м}^3/\text{год.}$ при температурі $5\text{-}10 \text{ }^\circ\text{C}$). Насос ТН-300 здатний нагріти воду до $60 \text{ }^\circ\text{C}$ при витраті $30 \text{ м}^3/\text{год.}$ У лазню подається приблизно $40 \text{ м}^3/\text{год.}$ води при температурі $40 \text{ }^\circ\text{C}$. Така витрата і температурний режим забезпечуються ТНУ при розведенні в змішувачі, гарячої води, що виходить з ТНУ, холодною. Передбачено використання існуючої будівлі бойлерної для розміщення в ній ТНУ, використання комунікацій, насосів, що відкачують воду з шахти [5, 15, 26]. Оцінимо економічний ефект застосування ТНУ для потреб банно-прального комплексу шахти при подачі гарячої води від ТНУ в обсязі $30 \text{ м}^3/\text{год.}$ протягом 10 годин на добу (4 рази по 2 години на кожну зміну плюс 2 години - запас для прання). Загальний час t роботи ТНУ за 5 місяців складе 1500 годин. Потужність N , споживання ТНУ при температурі охолоджувальної води $15 \text{ }^\circ\text{C}$ і коефіцієнті ефективності $\varphi = 4,6$, дорівнює 65. Споживання електричної енергії за час роботи ТНУ: $N_e = N \cdot t = 97,5$ тис. кВт. Прийнемо вартість електроенергії, наприклад $3_e = 6,14$ коп. за $1 \text{ кВт} \cdot \text{год.}$, тоді витрати у вартісному вираженні складе $C = C_e \cdot N_e = 6$ тис. грн. за 5 місяців роботи ТНУ, або 1,2 тис. грн. місяць [5, 15, 26].

Вартість НКТ-300 становить в тис. дол. США складає 55. На прокладку водоводу від стовбура шахти до бойлерної (дві труби по 250 м) і на інші підготовчі роботи витрачається 10 тис. грн. Транспортні витрати на перевезення одного ТН-300 (габарити $1,8 \times 4, 5 \times 1, 7$ м, маса 5 т) при відстані 3500 км і вартості перевезення автотранспортом 65 коп./км, складають, 5 тис. грн. Вартість проекту прив'язки ТНУ дорівнює 25 тис. грн. Поточне обслуговування $C_t = 300$ грн. Загальне початкові витрати $Z = 150$ тис. грн. Термін окупності насоса $Z = 7$ місяців [5, 26].

Отже, витрати на переведення гарячого водопостачання шахти з котельні на тепловий насос НКТ-300 окупаються на друге літо експлуатації насоса при розрахунку економічного ефекту тільки з економії вугілля. Крім того, оскільки отримання теплоти відбувається без виділення в атмосферу шкідливих продуктів згоряння палив, то оплата за забруднення атмосфери виключається [26]. Таким чином, робота з освоєння технології застосування теплових насосів для гарячого водопостачання шахти і селищ з використанням як низькопотенційного теплоносія шахтної води актуальна, перспективна й екологічно вигідна.

Парокомпресійний цикл ТНУ. Розрахунок коефіцієнта трансформації $K_{\text{тр}}$ теплового насоса. З метою наближення до простого циклу Карно, а фактично - з метою створення максимально ефективного в роботі ТНУ, необхідно прагнути до підводу теплоти за умов, близьких до ізотермічності. Для цього підбираються робочі тіла, що змінюють агрегатний стан при необхідних температурах і тиску. Вони поглинають теплоту при випаровуванні і віддають при конденсації. Ці процеси утворюють ізотерми циклу. Стиснення пара холодоагенту, як правило, вимагає щоб пар був сухим, що обумовлено особливостями механіки більшості компресорів ТНУ. Потраплення рідини разом з паром на вхід компресора може пошкодити його клапани, а надходження великої кількості рідкого холодоагенту в компресор ТНУ може взагалі вивести його з ладу (якщо не вжити запобіжні заходи) [5, 26].

Наведемо приклад циклу ТНУ з механічною компресією пари і його зображення в $p\text{-}V$ (тиск - питомий об'єм) діаграмі показані на рис. 1 далі. 1-2 - відбір теплоти від низькотемпературного джерела, холодоагент закипає; 2-3 - процес стиснення холодоагенту в компресорі; 3-4 - передача теплоти в систему опалення і конденсація холодоагенту в конденсаторі; 4-1 - процес дроселювання рідкого холодоагенту до початкових умов.

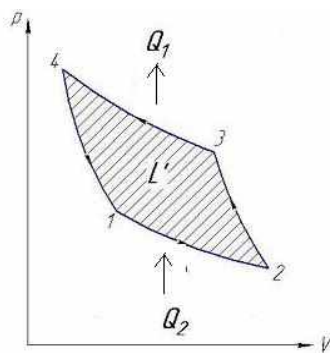


Рис. 1. Термодинамічний цикл теплового насоса в $p\text{-}V$ діаграмі [5, 14, 26]

Розглянемо цикл ТНУ тільки з сухою компресією пари і розширенням в дросельному клапані. Цей клапан представляє собою регульоване сопло або капілярну трубку. Відсутність розширювальної машини в циклі означає, що деяка кількість корисної роботи втрачається і коефіцієнт трансформації ТНУ зменшується. Як правило, це виправдано тим, що вартість розширювальної машини не окупається отриманою на ній роботою. Процес розширення в соплі незворотній. Зазвичай він розглядається як адіабатичний, тобто проходить без підведення або відведення теплоти при розширенні робочого тіла.

Тепер наведемо приклад циклу ТНУ в іншій формі, що широко застосовується на практиці для парокompресійних циклів діаграми «тиск - питома ентальпія» ($\ln p-h$), представленої на рис. 2 [5, 26].

Стисле робоче тіло під високим тиском залишає компресор в точці 1. Оскільки на вхід в компресора надходив тільки сухий пар і завдяки нахилу ліній постійної ентропії, в точці 1 пара перегріта. Перш ніж пара почне конденсуватися в точці 2, його слід охолодити при постійному тиску. Між точками 2 і 3 відбувається конденсація при постійній температурі (якщо немає витоків пари). Звідси видно, що теплообмінний апарат, в якому відбувається конденсація (конденсатор), завжди повинен бути розрахований на прийом перегрітого пара. Адіабатичне розширення зображується в $p-h$ діаграмі вертикальної прямої 3-4, і в цьому одна з причин зручності такої діаграми (рис. 3). Для розрахунку циклу необхідно знати стану робочого тіла тільки на вході в компресор ТНУ і виході з нього. Останнє зображується прямими лініями.

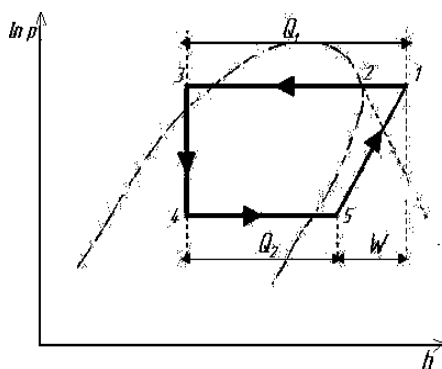


Рис. 2. Термодинамічний цикл ТНУ в $\ln p-h$ діаграмі [26]

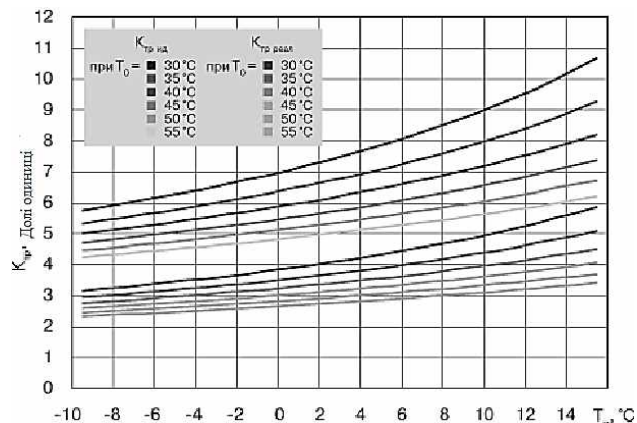


Рис. 3 Залежність величини коефіцієнта трансформації енергії від температури джерела низько потенційної теплоти

Випаровування відбувається при постійному тиску і температурі між точками 4 і 5. Слід зазначити, що розширення відбувається фактично в суміші рідини і пари. Суміш, що входить у випарник містить значну частку пара, іноді до 50% за масою, і ця частка робочого тіла, природно, вже не бере участі в процесі випаровування та поглинання теплоти. Між точками 5 і 1 відбувається ізоентропійне стиснення сухого пара. На практиці його реалізувати не можна, але тут розглянутий ідеалізований цикл. Його ефективність менше, ніж у циклу Карно, через незворотності процесу розширення.

Розглянемо ще одну важливу перевагу $p-h$ діаграми. Оскільки на горизонтальній осі відкладається ентальпія, вона допускає прямий відлік Q_1 , Q_2 і W . Тому з діаграми очевидно просте співвідношення $Q_1 = Q_2 + W$. У той же час дана діаграма дозволяє відразу оцінити значення коефіцієнту трансформації. Очевидно, що воно буде тим вище, чим менше інтервал тисків 3-4 (або, що те ж саме, чим менше інтервал температур) [5, 26].

Для отримання високого коефіцієнту трансформації значення Q_1 повинно бути велике, а W (робота стиснення) повинна бути мала. Також при погляді на $p-h$ діаграму будь-якого з холодоагентів можна швидко оцінити його придатність до роботи. Реальний парокompресійний цикл ТНУ. Робочі цикли ТНУ, розглянуті вище, є певною мірою ідеалізованими.

Хоча в них і враховувалися практичні обмеження, пов'язані з необхідністю стиснення тільки сухої пари, а також відсутність розширювальної машини, проте припускалось, що ККД всіх елементів дорівнює 100%. Розглянемо тепер, чим реальний ТНУ відрізняється від ідеального [5, 26]. Основним обладнанням теплового насоса є компресор. Як вже було сказано, компресор повинен стискати тільки суху пару і робоче тіло до входу в компресор повинно бути дещо перегріте. Перегрів створює зону безпеки для зменшення потрапляння крапель рідини в компресор. Це досягається ціною деякого збільшення компресора, оскільки він повинен стискати більш розріджений пар при тій же масовій витраті. Більш серйозна проблема полягає в підвищенні температури на виході з компресора, яка обмежується стійкістю вихлопних клапанів [5, 26].

Інша істотна різниця від ідеалізованого циклу ТНУ визначається ККД компресора. Через теплообміну між робочим тілом і компресором і незворотності течії всередині компресора під-

вищення ентальпії в ньому більше, ніж у ідеалізованому циклі, що також підвищує вихідну температуру. Підвищення ентальпії оцінюється ізоентропічним ККД компресора. На практиці поршневі компресори мають ізоентропічний ККД близько 70 %. Відзначимо, що ізоентропічне стиснення вимагає мінімальної роботи при неохоложеному компресорі. Роботу можна знизити шляхом його охолодження, але оскільки завданням ТНУ є віддача теплоти при високій температурі, таке охолодження не вигідно або фактично неможливо. Існують ще два показники ефективності компресора в ТНУ: механічний ККД (показує, яка частка роботи, підведеної до валу компресора, віддана робочому тілу - зазвичай він дорівнює 95 %) і об'ємний ККД, який впливає не на коефіцієнт трансформації, а на капіталовкладення в обладнання, так як визначає розміри компресора (його значення також у районі 95 %).

Втрати є і в інших елементах робочого циклу, а не тільки в компресорі. Коли робоче тіло проходить через теплообмінник, тиск дещо падає, наслідком чого є відхилення від ізотермічних умов при теплообміні, яке зазвичай не перевищує 1 градус. Це явище розглянуто у роботі [26] на прикладі реального пароконденсійного циклу ТНУ, в якому як холодоагент використовується фреон R-134a. Натомість у роботі [5], аналізом і математичним моделюванням з застосуванням сучасних методів обробки даних та ЕОМ отримано науково-практичні результати у вигляді графічної залежності рис.4, що дає можливість визначити коефіцієнт трансформації теплового насосу в діапазоні параметрів теплоносія (джерела вторинних енергоресурсів) та інших наявних джерел, у тому числі шахтних вод і т. п., що представлені в Україні. Значення даного коефіцієнта впливає на вибір ТНУ для застосування його для зазначених вище умов. Кінцеве рішення про застосування того чи іншого ТНУ доцільно приймати на основі економічного аналізу, приклад якого наведено у роботі [5].

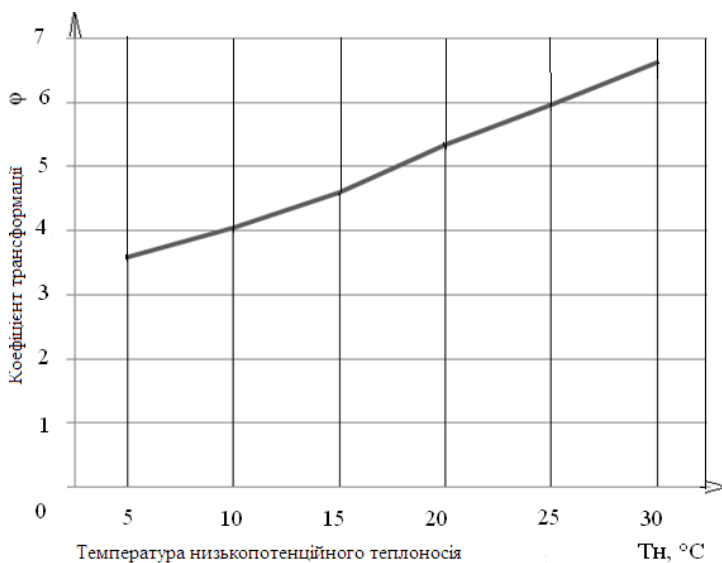


Рис. 4. Графік залежності T_n від коефіцієнту ϕ

Висновки та напрямки подальших досліджень. На основі вище викладеного можливо зробити наступні висновки: Досліджено можливість використання ТНУ спільно з технологіями використання вторинних енергоресурсів, та існуючих технологій утилізації теплоти і різних аспектів використання та можливостей застосування теплонасосних установок. В результаті аналізу встановлено джерела виділення низькопотенційної енергії в технологічних процесах гірничо-металургійного комплексу та окреслено перспективні технології для використання альтернативних джерел енергії на потреби теплозабезпечення; Розроб-

лені практичні рекомендації і методику розрахунків та конструктивних рішень ефективних засобів підбору ТНУ для використання вторинних енергоресурсів.

Список літератури

1. Патент України №55206А Пристрій для мокрої грануляції металургійних шлаків / Суртаєв В.В., Суртаєв В.М. - 17.03.2003 р. - Бюл. №3.
2. Суртаєв В. В. Система утилізації тепла и обезвреживания вредных выбросов при мокром тушении раскалённого кокса // Разраб. рудн. месторожд., 2002. - Вып.78. - С.150-154.
3. Підвищення ефективності утилізації теплоти при мокрому гасінні коксу. /Дисертація на здобуття наукового ступеня канд. техн. наук., Суртаєва В.В. за спеціальністю 05.14.06. - «Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. 2008.
4. Суртаєв В.В. Інноваційні технології мокрого гасіння коксу та грануляції металургійних шлаків з утилізацією теплоти та знешкодженням шкідливих викидів. // Суртаєв В.В. / Тези. В зб. Розвиток промисловості та суспільства. Матеріали конференції. Том 1.- Кривий Ріг, 2016. – С. 187.

5. Теплові насоси у промисловій та комунальній сферах України. /Наукова робота. // Цидуля П.А., кер. Суртаєв В.В. – Кривий Ріг. – 2011, 26 с.
6. Електронний ресурс: <http://www.ad.ugatu.ac.ru/knbase/conten.htm>
7. Електронний ресурс: <http://www.rdom.com.ua>
8. **Кокорин О. Я.** Установки кондиціонування воздуха / **Кокорин О. Я.**– М.: Машиностроение, 1970.-343 с.
9. **Білянський А.М.** Актуальні проблеми енергозбереження в житлово-комунальному господарстві України. // Тези доповідей на міжнародній науково-технічній конференції «Енергоефективність - 2002», Київ, Навчальна книга, 2002, С. 41-42
10. Справочник коксохіміка в 6-ти томах / Под ред. А. И. Шелкова.-М.: Металлургия.- 1965. - Т. 2: Производство кокса, - С.165-173.
11. Адсорбция фенолов : Информационная записка №2 к проекту очистки транзитных вод мокрого тушения кокса коксохимического производства комбината «Криворожсталь» / Материалы КДП «Экопром»; Научн. руководитель Коряков В. Б., автор технологии, к.т.н. Письменный В. Б., гл. инж. проекта, к.т.н. Белан Н. Д., утв. дир. КДП «Экопром» Сулимкович Ю. Н. - Жёлтые Воды: Б. и., 2000.
12. Коксохимическое производство : Отчёт. / ГИПРОМЕЗ; Фонды КГГМК «Криворожсталь».- Кривой Рог: Б. и., 1999. – 155 с.
13. **Нашокин В. В.** Техническая термодинамика и теплопередача / **Нашокин В. В.**; Изд. 3-е, исп. и доп.- М.: Высшая Школа, 1980. – 469 с.
14. **Хоблер Т.** Теплопередача и теплообменники / **Хоблер Т.** - М.: Госхимиздат, 1961. - 820 с.
15. **Суртаєв В. В.** Алгоритм определения параметров систем утилизации теплоты мокрого тушения кокса / **Суртаєв В. В.** // Системні технології : Регіональний міжвузівський зб. наук. пр. - Випуск 1(54).-Дніпропетровськ, 2008.- С.126-134.
16. Технологии охраны окружающей среды : каталог / фирма «Haldor Topse A/C» (Дания). – 2000. – 26 с.
17. **Шлихтинг Г.** Теория пограничного слоя / **Шлихтинг Г.** - М.: Наука, 1969.- 742 с.
18. **Суртаєв В.В., Кривенко О.Ю.** Методичні вказівки до виконання практичних робіт з дисципліни «Екологія теплоенергетики» для студентів спеціальності 7.05060101, 8.05060101 – Теплоенергетика усіх форм навчання /Видавничий центр ДВНЗ «Криворізький національний університет» КНУ. - Кривий Ріг. - 2016, 37 с., Р № 19.
19. **Васильев Г. П., Хрустачев Л. В., Розин А. Г., Абуев И. М. и др.** Руководство по применению тепловых насосов с использованием вторичных энергетических ресурсов и нетрадиционных возобновляемых источников энергии // Правительство Москвы Москомархитектура, ГУП «НИИЦ», 2001
20. <http://www.wseas.us/elibrary/conferences/2007/portoroz/papers/555-237.pdf>
21. [Energy Savers: Types of Geothermal Heat Pump Systems](http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=114)
22. http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=114, Данные по Финляндии
23. http://www.sulpu.fi/index.php?option=com_content&task=view&id=20&Itemid=114, Водоём – обогреватель.
24. <http://ru.wikipedia.org/wiki>
25. Уголь Украины, - 1997,- №10,- с. 40-41.
26. www.progress21.com.ua
27. **Суртаєв В. В.** Перспективные направления обеспечения экологической безопасности установок утилизации теплоты мокрого тушения кокса / **В. В. Суртаєв** // Энергетика: экономика, технологии, экология / НТУУ КПИ.- №1.-2004.-С.77-81

Рукопис подано до редакції 08.11.2021

УДК 338.322.01

А.А. ТУРИЛО, д-р екон. наук, проф., С.А. РТИЩЕВ, канд.екон. наук, доц.
Криворізький національний університет

СУТНІСТЬ КАТЕГОРІЇ «ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗВИТОК»

Метою даної статті є розкриття сутності категорії «економічний розвиток» і визначення особливостей оцінки механізму економічного розвитку підприємств.

Методи дослідження. Авторами роботи представлено науково-логічний підхід щодо визначення сутності категорії «економічний розвиток».

Наукова новизна. Дослідження та оцінка економічного розвитку підприємства займає важливе місце серед питань сучасної економічної науки і практики. Незважаючи на великий інтерес до цього напрямку дослідження у вітчизняних та зарубіжних науковців, на даний момент багато питань залишаються дискусійними. Тому детальний аналіз та запропонована класифікація підприємства за видами економічного розвитку є актуальною. Усі типи економічного розвитку тісно пов'язані між собою (як прямими так і зворотними зв'язками). Так економічний розвиток регіону або галузі залежить від рівня економічного розвитку підприємств, які розташовані на території даного регіону або відносяться до відповідної галузі. Сукупний економічний розвиток регіонів, так само як і економічний розвиток усіх галузей народного господарства, забезпечує економічний розвиток країни, який в свою чергу є внеском у загальний світовий економічний розвиток. Також існує і зворотній зв'язок між наведеними видами економічного розвитку.

© Турило А.А., Ртищев С.А., 2021