

В. А. Стасов, А. М. Миронов, канд. техн. наук, доцент, М. В. Ільченко, канд. техн. наук, доцент, Ю. А. Селіхов, канд. техн. наук, професор, К. О. Горбунов, канд. техн. наук, професор, С. М. Биканов, канд. техн. наук, доцент, Є. В. Краснокутський, канд. техн. наук, доцент

КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИРОДОЄМНОСТІ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків

Ключові слова: теплоенергетична інтеграція, природокористування, енергія, ресурси, хімічна індустрія, оптимізація.

Вступ. Енергетична криза 70-х років ХХ-го сторіччя змусила розвинуті держави підрахувати та оцінити запаси традиційних джерел енергії. Їхня обмеженість призвела до необхідності шукати нові, переважно відновлювані джерела енергії. Найбільш корисним виявилось поєднання кількох видів енергії, одержуваної при згорянні кам'яного вугілля, сонячної теплової та фотоелектричної енергії, енергії вітру, атомного ядра, океану, енергії, що видобувається з біомаси, та деяких інших джерел. За існуючого рівня науково-технічного прогресу енергоспоживання може бути покрите лише за рахунок використання органічних палив (вугілля, нафти, газу), гідроенергії та атомної енергії. Однак, за результатами численних досліджень, органічне паливо у недалекому майбутньому може задовольнити запити світової енергетики лише частково. Залишок енергоспоживання може бути задоволений за рахунок інших джерел енергії – нетрадиційних.

Дедалі частіше питання інтеграції теплової енергії постає на промислових підприємствах. Це пов'язано з тим, що велика кількість енергії викидається до атмосфери у вигляді парникових газів, негативно впливаючи на екологію. У контексті розвитку індустрії, де велика кількість теплових процесів здійснюється паралельно, інтеграція здатна значно підвищити загальну теплову ефективність та знизити викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Наведений комплексний огляд розглядає основні аспекти інтеграції теплових систем, зокрема визначення оптимальних точок взаємодії між процесами, використання теплових насосів, теплової акумуляції та інших новітніх технологій для підвищення теплової ефективності виробництва.

Постановка цілей. Метою даного дослідження є системне узагальнення поточних знань про методи ефективного використання тепла та енергії за допомогою інтеграції хіміко-технологічних процесів. Інтеграція в контексті даної роботи передбачає такий підхід до пов'язання, оптимізації та покращення промислових систем, які виробляють, споживають або використовують тепло та дозволяють значно підвищити енергетичну ефективність виробничих операцій. Робота включає розгляд ключових аспектів інтеграції: визначення оптимальних точок взаємодії між тепловими процесами, використання теплових насосів, теплообмінного обладнання та контекстуально доступних на підприємствах технологій. Також розглянуті принципи втілення інтеграції у різних галузях, включаючи багатотоннажне виробництво, теплостачання, харчову і хімічну промисловість та інші сфери використання наведених підходів та прийомів. Загальну ціль роботи можна визначити як виділення потенціалу інтеграції теплових процесів для оптимізації енергетичного балансу та природоємності у різних секторах промисловості.

Матеріали. Сучасні промислові процеси побудовані таким чином, що майже кожне велике підприємство здійснює викиди тепла та речовин пропорційно до темпів випуску товарної продукції. Найбільш парадоксально, що при цьому основними забруднювачами навколишнього середовища є генеруючі потужності та хіміко-переробна сфера, які у якості сировини використовують або споживають природні блага. Разом з тим, саме тут спостерігається найбільш очевидний потенціал енергоресурсозбереження та відповідального природокористування, оскільки чималу кількість теплової енергії від скидних речовин можна використати повторно – тобто, інтегрувати до виробництва у якості теплоносія для наступних операційних циклів.

Спочатку розглянемо загальноенергетичну сферу. До найважливіших проблем, пов'язаних зі спалюванням органічного палива на теплових електростанціях, відносяться викиди в навколишнє середовище, які відбуваються здебільшого внаслідок неможливості організації безвідходного виробництва. Особливістю енергетичного виробництва є безпосередній вплив на природне середовище в процесі вилучення палива та його спалювання. В результаті повного згоряння палива у повітряному середовищі у димових газах утворюються вуглекислий газ, водяні пари, азот, оксиди сірки, оксиди азоту та зола, які викидаються в атмосферу. Наявність шкідливих газоподібних продуктів згоряння органічних палив в атмосфері призводить до руйнування озонового шару, утворення фотохімічних туманів [1].

У різних виробничих та хімічних процесах теплота димових газів може бути використана для підтримки оптимальної температури та теплопостачання обладнання. Димові, або топкові, гази відносяться до найбільш давно застосовуваних нагрівальних агентів. Топкові гази (ТГ) не втратили свого значення й дотепер, оскільки дозволяють здійснювати нагрівання до високих температур, що досягають 1000-1100°C, при незначному надмірному тиску у теплообміннику (з боку газів). Найчастіше ТГ використовують для нагрівання через стінку інших нагрівальних агентів проміжних теплоносіїв [2].

Також тепло димових газів (ДГ) використовується в процесі когенерації. Тепло ДГ у цьому випадку використовують для виробництва пари або гарячої води, які потім призводять турбіни у рух для генерації електроенергії. Це дозволяє збільшити загальну ефективність процесу та знизити втрати тепла [3].

Димові гази використовуються в технології сушіння, а саме – у деяких сушильних апаратах по типу пневматичних, та у барабанних апаратах. У таких галузях, як сільське господарство та харчова промисловість, ДГ можуть бути використані для сушіння сільськогосподарських продуктів чи інших матеріалів [4].

Найбільш суттєвими недоліками ТГ є нерівномірність нагріву, обумовлена охолодженням газу у процесі теплообміну, труднощі з регулюванням температури обігріву, низький коефіцієнт тепловіддачі від газу до стінки, можливість забруднення матеріалів, що нагріваються, продуктами неповного згоряння палива (при безпосередньому обігріванні газами). Значні перепади температур між ТГ та середовищем, що нагрівається, створюють «жорсткі» умови нагрівання, які неприпустимі для багатьох продуктів та можуть викликати їх перегрів. Через відносно низьку питому теплоємність ТГ їхні об'ємні витрати доволі великі й транспортування вимагає значних витрат. Тому ТГ зазвичай використовують безпосередньо на місці їх отримання [2].

У свою чергу тепло відпрацьованої пари можна використовувати у більших масштабах, тобто перегріта пара використовується для виробництва електроенергії, наприклад на АЕС, а також у системах централізованого теплопостачання для опалення та гарячого водопостачання житлових будівель [5].

Підчас інтеграції тепла відпрацьованої пари можна використовувати процес когенерації, як і у випадку з димовими газами, але у когенераційних установках, які обслуговують централізовані системи теплопостачання, пара, яка покидає турбіну, конденсується у теплообмінниках та прямує до споживачів у вигляді гарячої води. У коге-

нераційних установках промислових підприємств відпрацьована у турбіні пара повертається на підприємство для використання її теплової енергії. На ТЕЦ протитиск пари нижчий, ніж на промислових когенераційних установках з протитиском, тому співвідношення електричної та теплової енергії у промислових когенераційних установок нижче, ніж у ТЕЦ [6].

Якщо нехтувати процесом утилізації тепла відпрацьованої пари на ТЕЦ, це лише сприятиме виникненню парникового ефекту – тобто, відбувається вторинне теплове забруднення, а жодних корисних результатів при цьому не формуватиметься. До того ж, певна частина тепла ТЕС потрапляє у довкілля через конденсатори турбін, що й так є технологічно не виключеним стоком енергії, який поки що не вдається переглянути [7].

Тому слід звернути увагу на переваги утилізації такої пари: можливість її використання не тільки для санітарно-технічних споживачів, але й для технологічних потреб; швидкий прогрів та охолодження систем парового опалення, що доцільно використовувати для приміщень із періодичним опаленням. Пара має невелику об'ємну масу, що дозволяє не враховувати у парових системах опалення гідростатичний тиск та дає можливість використати її як теплоносій в багатоповерхових будинках, а також при складному рельєфі місцевості району теплопостачання. Нарешті, дуже значну роль відіграє відсутність витрат електроенергії на саме транспортування пари [5].

У технічних та інженерних застосунках внаслідок перегріву пари або збільшення тиску в парових системах понад значення, при якому вона повинна конденсуватися, може виникати так зварна гостра пара (ГП). Ця пара вільна від будь-якої рідини й не утворює водяних крапель при незначному охолодженні [8]. Традиційно тиск ГП використовується у промислових процесах, де потрібно створити рух, тиск чи механічну роботу. У загальному випадку енергія надлишкового тиску пари може бути використана для приводу обладнання. ГП, як й відпрацьована пара, негативно впливає на навколишнє середовище. Якщо ГП не використовується для роботи або інших корисних цілей, це здатне призвести до надмірного споживання палива або електроенергії, що у свою чергу може збільшити викиди парникових газів та негативний вплив на клімат. Для того, щоб зменшити антропогенне навантаження на довкілля, слід доцільно використовувати енергію надлишкового тиску в системі, тобто – здійснити інтеграцію. У цьому випадку можна використати процес когенерації: пара під високим тиском прямує до парової турбіни, де її тиск використовується для приведення в рух механізмів, які, у свою чергу обертають генератор, що виробляє електроенергію. Тиск в конденсаторі цієї турбіни підтримують таким, щоб температура насичення пари була достатньо високою для необхідного нагрівання охолоджувальної води у конденсаторі. Нагріта у конденсаторі вода прямує споживачам для опалення. Тепло, яке утворюється в процесі експлуатації парової турбіни, використовується для обігріву води в системі опалення, виробничих процесів або інших цілей, які потребують застосування теплової енергії [9].

Для того, щоб використати теплоту, яка віддається парою охолоджувальній воді в конденсаторі, необхідно збільшити тиск, за якого конденсується пара. Підвищення нижньої температури циклу призведе до зменшення термічного ККД й водночас до зменшення кількості виробленої електроенергії. Тому з економічної точки зору подібна операція не є вигідною. З іншого боку, це надає можливість одержати велику кількість тепла для технологічних та побутових цілей, оскільки відпадає необхідність у будівництві котлів для опалювання, які нераціонально використовують теплоту високого температурного потенціалу під час спалювання типового для них палива.

Оскільки фізико-хімічна природа вторинної пари не відрізняється від ГП, цілком доцільно впроваджувати системи з її повторного використання та утилізації, як на стадії проектування, так і при модернізації існуючих парових систем. Найбільше застосування знаходить насичена водяна пара, що характеризується високими значеннями питомої теплоти конденсації та коефіцієнта тепловіддачі. Нагрівальну пару подають до

міжтрубного простору нагрівальної камери, де вона конденсується. Тепло, що виділяється при конденсації насиченої пари, передається через стінки кип'ятильних трубок розчину. У трубах нагрівальної камери розчин нагрівається та кипить з утворенням вторинної пари [10]. У такому контексті виглядає абсолютно логічним та доцільним боротися за те, щоб використовувати тепло вторинного кипіння, яке являє собою енергетичний потенціал продукції, побічних та проміжних речовин, що утворюється в технологічних агрегатах (установках) та втрачається у самому агрегаті, але який можна частково або цілком використати для енергопостачання іншим споживачам. Раціональне використання такого тепла є одним з найбільших резервів економії палива, що сприяють зниженню паливо- та енергоємності промислової продукції [11].

Прикладом використання такого тепла є процес випарювання в багатокорпусних протиточних випарних апаратах. Вихідний розчин подається насосом у останній по ходу нагрівальної пари корпус, з якого випарений розчин перекачується до попереднього корпусу, і т. д., причому з першого корпусу видаляється остаточно випарений розчин. Свіжа (первинна) пара надходить у перший корпус, а вторинна пара з цього корпусу направляється для обігріву другого корпусу, а надалі вторинна пара з попереднього корпусу використовується для обігріву наступного. З останнього корпусу вторинна пара видаляється в конденсатор [12]. Однак необхідність перекачування випарюваного розчину з корпусів, де тиск є меншим, до корпусів з більш високим тиском виступає серйозним недоліком протиточної схеми, оскільки застосування проміжних циркуляційних насосів пов'язане зі значним зростанням експлуатаційних витрат [13].

При інтеграції процесу випарювання вторинну пару цілком можна використовувати у якості гарячої утиліти. Після того як вторинна пара віддала своє тепло, вона конденсується та виливається до каналізації, тим самим частково забруднюючи навколишнє середовище. Але тепло вторинної пари також можна використовувати у процесі когенерації. Наприклад, використати пару для приводу турбіни, яка виробляє електроенергію в генераторі. Після проходження турбіни пара конденсується за допомогою охолодження, при цьому ефективно віддаючи тепло. Використання тепла для опалення та гарячого водопостачання – абсолютно очевидний та доволі популярний прийом. Тепло, яке виділяється під час конденсації, може бути спрямовано на опалення приміщень або на підігрів води для гарячого водопостачання. Таким чином одночасно зменшуються викиди парникових газів до атмосфери та знижується ресурсоємність процесу [14].

Окрім того, у деяких хімічних та фізичних процесах тепло вторинної пари можна використовувати більш нестандартно. Наприклад, відомі декілька застосунків:

1) вторинна пара використовується для дистиляції води, видаляючи солі та домішки з сирової води та створюючи питну воду [15];

2) вторинна пара використовується для виробництва льоду в комерційних або промислових масштабах [16];

3) вторинна пара використовується у харчовій промисловості для термічної обробки продуктів (сушіння, стерилізація або пастеризація) [17].

На сучасних промислових підприємствах багатьох країн часто просто скидають рідкі та газоподібні технологічні відходи в атмосферу чи каналізацію. В результаті втрачається корисне тепло, відбувається забруднення довкілля, погіршується екологічна обстановка у населених пунктах [18]. Утилізація низькопотенційного тепла забруднених шахтних вод здійснюється встановленням у контурі шахтної води спіральних теплообмінників з дискретними турбулізаторами та створенням проміжного контуру. Таким чином, здійснюється трансформація низькопотенційної теплової енергії у високопотенційну, при цьому величина одержуваної високопотенційної дорівнює сумі енергії, отриманої у випарнику, та енергії, витраченої на привід компресора [19].

Особливе місце серед хіміко-технологічних потоків, що традиційно виступають джерелами нераціонально утилізованої високопотенційної теплової енергії, є системи

промислових стоків нешкідливих та слабкозабруднених речовин. Існує чотири основні можливі місця в каналізаційній системі для рекуперації енергії зі стічних вод: на рівні компонентів; на рівні будівлі; у каналізаційній мережі та на очисних спорудах [20].

Рекуперація тепла на рівні компонентів: тепло витягається за допомогою вертикального теплообмінника безпосередньо після компонента, який використовується в роботі. Утилізоване тепло можна використовувати для попереднього нагріву холодної води, що надходить, наприклад, до побутових або комерційних душових, або застосовувати разом з тепловим насосом для інших цілей [20].

Рекуперація тепла на рівні будинку: на цьому рівні для рекуперації тепла стічні води зазвичай збираються в накопичувальному резервуарі, а тепло відновлюється за допомогою теплообмінника або теплового насоса з джерелом води. Для запобігання забрудненню зазвичай використовується система жироловлівачів, яка перехоплює жири та сміття зі стічних вод. Якщо рекупероване тепло не використовується одразу, його можна зберегти в резервуарі з гарячою водою для подальшого використання [20].

Рекуперація тепла на рівні каналізаційної мережі з неочищених стічних вод у суспільних каналізаційних системах також є перспективним джерелом енергії. Потік стічних вод в каналізаційних системах доволі є рясним та безперервним протягом року, з річною температурою 10–20 град, що робить стічні води з труб ідеальним джерелом опалення/охолодження для теплових насосів цілорічно.

Рекуперація тепла на рівні очисних споруд: такі станції переробляють та очищають великі обсяги стічних вод з каналізаційних систем, а потім щодня скидають їх у прилеглі водойми. Температура очищеної води стабільна і має вкрай невеликі добові та щотижневі коливання порівняно із температурою припливної води. Навіть у вологу погоду температура стоків не має настільки хаотичних коливань, як у припливів [20].

Водночас, серйозною проблемою системи добування тепла стоків є забруднення теплообмінників. У загальному значенні, засмічення – це накопичення небажаних відкладень на поверхні теплообмінника. Воно збільшує термічний опір теплообмінника, чим перешкоджає максимально ефективному теплообміну. Через стійкість забруднення ефективність теплообмінника знижується, що призводить до меншої економії енергії. Окрім того, забруднення збільшує витрати на технічне обслуговування пристрою [20].

Наступний величезний пласт некоректно утилізованої теплоти – це операції зміни тиску та технологічні процеси, де спостерігаються відповідні явища. Наприклад, надлишковий тиск може сприяти витоку природного газу з газопроводів, свердловин або інших інфраструктурних об'єктів. Ці витоки можуть містити метан, який є основним компонентом природного газу та сильним парниковим газом. Викиди метану до атмосфери здатні посилювати інтенсивність глобального потепління та різко негативно впливати на клімат [21].

Як відомо, магістральні газопроводи працюють з робочим тиском 5,5–7,4 МПа. Потім газ редукується на газорозподільній станції (ГРС) до 0,3; 0,6 або 1,2 МПа та подається до розподільчої мережі і далі – на ГРП та споживачам. При цьому енергія надлишкового тиску просто безцільно втрачається.

У турбодетандерних установках відбуваються явища іншого характеру. Процес розширення газу в утилізаційних турбодетандерних установках близький до ізоентропійного, що забезпечує одержання максимальної величини енергії з одиниці маси установки, а, отже і мінімальної собівартості виробництва. Турбодетандерні утилізаційні установки застосовуються на компресорних станціях магістральних газопроводів, газорозподільчих станціях, на газорегуляторних пунктах різних енергетичних об'єктів, наприклад, теплових електричних станцій та ін. Потужність турбодетандерів найчастіше використовується для приводу електрогенераторів [22]. Впровадженню турбодетандерів на газоспоживаючих підприємствах, наприклад, в опалювальних котельнях, перешкоджає, зокрема, відсутність фахівців-турбіністів, що потребує створення окремого це-

ху або підрозділу, відсутність інфраструктури для передачі надлишків електроенергії, що виробляється, в електричну мережу [23].

Для наведеного типу задач цілком підходить наступний приклад інтегрованої системи: попередньо підігрітий у підігрівачі газ з магістралі високого тиску проходить послідовно два ступені детандера. За рахунок розширення газу у дизель-генераторному агрегаті отримуємо електроенергію, яка передається до електричної мережі. Потім газ з тиском 0,5 МПа надходить у пневмоелектрогенераторний агрегат, де додатково з електроенергією у теплообміннику отримується холод. Підігрітий у теплообміннику газ з низьким тиском надходить споживачеві в магістраль низького тиску [24].

Технології утилізації теплової енергії дедалі частіше використовуються на об'єктах різного призначення: від промислових виробництв до приміщень громадського користування. Це зумовлено дефіцитом первинних енергоносіїв. Холодильні системи будівель – наприклад, супермаркетів або складів – для вироблення холоду витрачають велику кількість енергії. При цьому вони також виробляють значну кількість тепла. Ця тепла енергія утворюється в процесі конденсації газоподібного холодоагенту. У звичайних холодильних установках вона віддається навколишньому повітрі за допомогою конденсаторних блоків і зовсім не використовується корисно. Між тим, на сьогодні є не менше двох ефективних способів використання тепла холодильних агрегатів.

1. Рекуперація тепла для нагрівання води, що використовується для технологічних потреб або опалення. Цей метод дозволяє ефективно використати близько 20 % тепла, що виробляється холодильними установками. Накопичувальний бак (бойлер) підключається до холодильної системи через теплообмінник, в якому акумулюється гаряча вода або контур системи опалення. Оскільки температура холодоагенту наприкінці процесу стиснення може перевищувати 100 °С, середовище (повітря або вода) нагрівається до 80–90 °С. У випадках, коли холодильна машина не забезпечує необхідну продуктивність або не може працювати постійно, а ємності накопичувального бака недостатньо для підтримки температури, використовуються електронагрівачі або газові котли.

2. Використання тепла для повітряного опалення приміщень без використання теплоносія (торгова площа, склад, офісна зона). Цей спосіб набагато ефективніший і дозволяє використовувати майже 100 % тепла, що дозволяє нагрівати воду або повітря до 30 °С [25].

Компанія Maeykawa активно використовує ідею з реалізації «П'яти натуральних холодоагентів». Джерелом тепла для теплових насосів (ТН) високого тиску є тепло конденсації, що виробляється холодильною установкою. ТН стискає аміак, тим самим підвищуючи його температуру з 40 °С до 65 °С, що дозволяє виробляти воду з температурою 60 °С за температури вхідної води 12 °С. Нагрівання води з 12 °С до 60 °С забезпечується за рахунок застосування вискоефективного теплообмінника на боці високого тиску теплового насоса, а також теплообмінника газ/рідина на лінії всмоктування [26].

Обговорення. Як видно, палітра технічних та технологічних можливостей для більш ефективного використання теплоенергоресурсів є доволі великою, а потенціал зниження ресурсоемності і впровадження підходів раціонального природокористування майже необмеженим за умови ретельного аналізу перспектив інтеграції матеріальних потоків на конкретних підприємствах з урахування їхньої специфіки.

Інтеграція тепла димових газів у промислових процесах на перше місце виносить підвищення енергоефективності та зменшення викидів в атмосферу. Використання тепла димових газів дозволить підприємствам зменшити споживання пального та енергетичні витрати. Крім того, якщо використовувати інтеграцію тепла ДГ раціонально, можна пропорційно зменшити обсяг шкідливих викидів до атмосфери, проте сама інтеграція може бути досить технічно складною й вимагати адаптації обладнання та проце-

сів. Інтеграція тепла ТГ у кожному випадку напряму залежить від конкретних технічних, економічних та регуляторних факторів.

Аналіз джерел теплових відходів показує, що близько 60 % скидного тепла є низькотемпературним (232 град та нижче). Утилізація такого тепла є менш ефективною з технічної та економічної точки зору, але саме цей вид теплових відходів присутній на підприємствах у великих кількостях, що нашоє на думку про те, що утилізацією низькопотенційних відходів нехтувати не варто. Як вже вказувалось вище, сучасні технології надають різні можливості рекуперації тепла відпрацьованих газів та застосування його з метою опалення і гарячого водопостачання, а також у технологічних цілях.

Парові системи мають свої особливості. Якщо існує значна різниця між надлишковим тиском гострої пари і тиском системи, яку намагаються жити, інтеграція може бути складною або вимагати встановлення дорогого обладнання для зниження тиску. Перспективи масового запровадження інтеграції енергії надлишкового тиску гострої пари є дуже гарними в контексті прагнення до сталого розвитку, підвищення енергетичної ефективності і зменшення впливу людської діяльності на навколишнє середовище. З економічної точки зору інтеграція надлишкового тиску може призвести до збільшення прибутковості, зменшення витрат та підвищення стійкості до зовнішніх ризиків, що робить цей підхід ще більш привабливим для власників бізнесу.

Одним з традиційних напрямків застосування вторинної пари є опалення цехів та виробничих приміщень за допомогою пароповітряних калориферів. Однак це актуально лише у опалювальний період, тоді як у теплу пору року гостро постає питання про кондиціювання та непридатність для цього вторинної пари. Тоді більшу перевагу має так зване послідовне використання вторинної пари в тому ж технологічному процесі, від якого був відведений конденсат високого тиску для отримання цієї вторинної пари. Ще одним суттєвим моментом виступає наявність споживача вторинної пари поблизу джерела конденсату високого тиску, оскільки транспортувати пару є проблематичним. Для цього знадобляться трубопроводи великого діаметра, що може зробити економічно недоцільним утилізацію вторинної пари взагалі. Загалом вторинна пара є побічним продуктом при експлуатації парових систем. Доцільно впроваджувати системи з її повторного використання та утилізації – як на стадії проектування, так і при модернізації існуючих парових систем. Це дозволить отримати найбільш результативний показник з енергозбереження та максимально швидко окупність проєктів реконструкції.

Забруднені стоки побутових, промислових та комерційних об'єктів зберігають значну кількість теплової енергії після скидання до каналізаційної системи. Це тепло можна відновити за допомогою добре відомих технологій – теплообмінників та теплових насосів – та повторно використовувати для задоволення потреб у опаленні. Традиційно цей ресурс суттєво недооцінюється, тому важливо розглянути кількісні показники. Так, за оцінками експертів у Швейцарії в каналізації втрачається 6000 ГВтч теплової енергії на рік, що еквівалентно 7 % загальної потреби цієї країни в опаленні. Водночас за тими ж оцінками стічні води у каналізаційних трубах у Німеччині містять достатньо енергії для обігріву 2 мільйонів будинків [19]. Насправді, інтеграція теплоти забруднених стоків – це важливий крок у напрямку сталих та ефективних систем управління відходами і стічними водами. Вона сприяє досягненню більшої екологічної стійкості, раціональному використанню ресурсів та зменшенню негативного впливу на навколишнє середовище, що важливо для підтримання здоров'я планети та забезпечення життєздатності нашого суспільства.

У сферах видобутку енергоресурсів та виробництва енергії ситуація дещо інша – там чільну роль відіграють внутрішні процеси та технологічні обмеження. Наприклад, для мінімізації впливу надлишкового тиску природного газу на екологію важливо вживати заходи щодо виявлення та усунення витоків, а також дотримуватися суворих норм та стандартів у галузі безпеки та екології в газовій промисловості. Ці загалом очевидні

речі виступають чинниками стримування при інтеграції технологічних потоків. Тільки сучасні технології та методи можуть ефективно допомогти в управлінні: зниженні негативного впливу на навколишнє середовище шляхом теплоенергетичної інтеграції [21]. Здавалося б, подібні питання вже досить кваліфіковано вирішені на великих теплових електростанціях, які мають необхідні кадри та інфраструктуру, але у їхніх власників відсутня зацікавленість у впровадженні турбодетандерів, оскільки генерована цими пристроями електрична потужність становить зазвичай менше 1% від встановленої. Таким чином, на шляху широкого впровадження турбодетандерів у вітчизняній промисловості необхідно вирішити великий обсяг складних проблем: адміністративних, суто бізнесових та комплексних технологічних.

Висновок. Загальний аналіз існуючих напрямів теплоенергетичної інтеграції з урахуванням балансу складності, витрат та економічної доцільності чітко демонструє їхню перспективність. Серед запропонованих варіантів найбільш перспективним є напрямком інтеграції теплоти димових газів. Це обумовлено не тільки можливістю ефективного використання відхідної теплової енергії, але й порівняльною простотою технології, а також супутнім величезним потенціалом зниження екологічного впливу.

З іншого боку, цікаві перспективи пропонує й інтеграція теплоти відпрацьованої пари, яка теж забезпечує ефективне використання тепла в процесах виробництва. Однак, незважаючи на це, подібний напрямком модернізації вимагає складніших технологічних рішень та високих інвестицій.

Доволі неочікувано, але на сьогоднішній день найменш перспективною виглядає інтеграція теплоти забруднених стоків. У першу чергу, це пов'язано з високою складністю очищення та підготовки таких стоків, що може не тільки знизити економічну доцільність цього підходу, але й відвернути промисловців, які витратять на регенерацію води суми, співставні з собівартістю товару без застосування інтеграції.

Загалом, вибір найкращого напрямку теплоенергетичної інтеграції буде залежати від конкретних умов підприємства, враховуючи його профіль, технологічні можливості, наявні вторинні ресурси та матеріальне забезпечення, потенційні економічні ефекти та ступінь соціально-екологічної відповідальності.

Література

1. Коваленко Т., Коваленко П. Аналіз та оцінка впливу шкідливих викидів ТЕС України на навколишнє середовище. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26866/1/013-036-039.pdf>.
2. Касаткин А. Г. Основные процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1973. 752 с.
3. Маляренко В. А., Шубенко О. Л., Андреев С. Ю. та ін. Когенераційні технології в малій енергетиці : монографія / Харків. Нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова, Ін-т проблем машинобуд. ім. А. М. Підгорного. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2018. 454 с.
4. Сажин Б. С. Основы техники сушки. Москва : Химия, 1984. 320 с.
5. Клімов Р. О. Конспект лекцій з дисципліни «Джерела теплопостачання та теплові мережі». Дніпродзержинськ : ДДПУ, 2016. 103 с.
6. Казарова І. О. Підвищення ефективності систем енергопостачання за рахунок впровадження когенерації : кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Харків, 2017. 194 с.

7. Вітер Н. Г., Кавун Е. М. Утилізація та поводження з відходами : наукова брошура для організації лабораторно-практичних та семінарських занять студентів агрономічного факультету денної та заочної форми навчання з спеціальності 7.04010601 «Екологія та охорона навколишнього середовища». Вінницький національний аграрний університет, 2015. 180 с.

8. Конспект лекцій до розділу «Теплові процеси» з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв» : для студентів III–IV курсів усіх спеціальностей / уклад.: О. С. Смірнова, С. О. Опарін, А. О. Черемисінова. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2013. 106 с.

9. Конспект лекцій з курсу «Енерготехнологія хіміко-технологічних процесів» для зд. вищої освіти за спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад.: Л. В. Іванченко, В. Я. Кожухар ; Нац. ун-т «Одеська політехніка». Одеса, 2024. 91 с.

10. Методичні вказівки до виконання курсового проекту на тему «Розрахунок однокорпусної випарної установки» з курсу «Основні процеси та апарати хімічної технології» : для студентів IV–V курсів усіх спеціальностей і форм навчання / уклад.: Т. Ю. Гіріч, В. М. Задорожній, Т. П. Єльцова. Дніпропетровськ : ДВНЗ УДХТУ, 2009. 36 с.

11. Слободян Н. М. Аналітичний огляд основних схем використання відпрацьованого тепла. *Матеріали XLIX науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ*. Вінниця, 27–28 квітня 2020 р. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8823>.

12. Черевко О. І., Поперечний А. М. Процеси і апарати харчових виробництв : підручник. 2-е вид., доп. та випр. Харків : Світ Книг, 2014. 495 с.

13. Колач Т. Н., Радун Д. В. Выпарные станции. Москва : Машгиз, 1963.

14. Прядко М. О. Василенко С. М., Петренко В. П. Ефективність використання теплоти вторинних енергоресурсів (ВЕР) в теплових схемах цукрових заводів. *Цукор України*. 2014. № 8. С. 21–24.

15. Пирисунько М. А., Подвигін В. В. Особливості використання вторинних енергоресурсів в судновому енергетичному обладнанні. *Інновації в суднобудуванні та океанотехніці* : матеріали XIV міжнар. наук.-техн. конф. Миколаїв : НУК, 2023. С. 209–211.

16. Холодильна техніка. Конспект лекцій [Електронний ресурс]: навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра за освітньою програмою «Комп'ютерно-інтегровані технології проектування обладнання хімічної інженерії» спеціальності 133 «Галузеве машинобудування» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: С. В. Гулієнко, О. В. Гусарова. Електронне мережне навчальне видання (1 файл: 6.83 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 148 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/129c97f0-b4dc-4984-9962-ca88d7419c20/content>

17. Бліщ Р. О., Петришин Н. З. Енергозберігаючі технології приготування пивного суслу. *Вісник Львівського торговельно-економічного університету. Технічні науки*. 2021. Вип. 28. С. 13–17.

18. Низькопотенційні джерела енергії: розрахунково-графічна робота [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Ю. П. Вишневецька, О. В. Козачук ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 2,11 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 28 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/edfd3265-d5e9-48cb-8422-76e4d70d4c7f/content>

19. Низькопотенційні джерела енергії : лабораторний практикум. [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад.: Ю. П. Вишневецька, О. А. Мельник ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. Електронні текстові дані (1 файл: 1,34 Мбайт). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 31 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b633023b-f414-45cf-93cd-08d868a47408/content>

20. Nagpal H., Spriet J., Krishna et al. Heat Recovery from Wastewater – A Review of Available Resource. *Water*. 2021. Vol.13, Iss. 9. 1274.

21. Білецький В. С., Суярко В. Г., Сіренко В. І. та ін. Екологічна безпека у нафтогазовій промисловості : конспект лекцій / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». Харків, 2021. 175 с. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54002>

22. Говдяк Р. М. Утилізація енергії тиску природного газу в турбодетандерних установках на об'єктах газової промисловості. *Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ*. 2014. № 1. С. 7–12.

23. Костенко Д. А., Дмитренко В. О. Енергозберігаючий потенціал надлишкового тиску природного газу у газотранспортній системі України. *Нафтова і газова промисловість*. 2003. № 1. С. 54.

24. Гічов Ю. О. Проблеми теорії і технології перетворення і використання енергії : конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2011. 54 с.

25. Клименко В. В., Кравченко В. І., Телюта Р. В. Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках : навч. посіб. / М-во освіти і науки України, Центральноукраїн. нац. техн. ун-т. Кропивницький : Ексклюзив-Систем, 2020. 220 с.

26. Хмельнюк М. Г., Подмазко О. С., Подмазко І. О. Холодильні установки та сфери їх використання : підручник. Херсон : ФОП Грінь Д. С., 2014. 484 с.

Bibliography (transliterated)

1. Kovalenko T., Kovalenko P. Analiz ta otsinka vplyvu shkidlyvykh vykydiv TES Ukrainy na navkolyshnie seredovyshche. URL: <http://ena.lp.edu.ua:8080/bitstream/ntb/26866/1/013-036-039.pdf>.

2. Kasatkyn A. H. (1973). Osnovnye processy i aparaty khymycheskoi tekhnolohyy. Moskva : Khymyia. 752 p.

3. Maliarenko V. A., Shubenko O. L., Andrieiev S. Yu., Babak M. Yu., Senetskyi O. V. (2018). Koheneratsiini tekhnolohii v malii enerhetytsi : monohrafiia / Kharkiv. Nats. un-t misk. hosp-va im. O. M. Beketova, In-t problem mashynobud. im. A. M. Pidhornoho. Kharkiv : KhNUMH im. O.M. Beketova. 454 p.

4. Sazhyn B. S. (1984). Osnovi tekhniky sushky. Moskva: Khymyia. 320 p.

5. Klimov R. O. (2016). Konspekt lektsii z dystsypliny «Dzherela teplopostachannia ta teplovi me-rezhi». Dniprodzerzhynsk: DDP. 103 p.

6. Kazarova I. O. (2017). Pidvyshchennia efektyvnosti system enerhopostachannia za rakhunok vprova-dzhennia koheneratsii: kvalifikatsiina naukova pratsia na pravakh rukopysu. Kharkiv. 194 p.

7. Viter N. H., Kavun E. M. (2015). Utylizatsiia ta povodzhennia z vidkhodamy: naukova broshura dlia orhanizatsii laboratorno-praktychnykh ta seminarskykh zaniat studentiv ahronomichnoho fakultetu dennoi ta zaochnoi formy navchannia z spetsialnosti 7.04010601 «Ekolohiia ta okhrona navkolyshnoho seredovyshcha». Vinnytskyi natsionalnyi ahraryni universytet. 180 p.

8. Konspekt lektsii do rozdiluv «Teplovi protsesy» z kursu «Protsey ta aparaty khimichnykh vyrobnytstv» : dlia studentiv III–IV kursiv usikh spetsialnostei. O. S. Smirnova, S. O. Oparin, A. O. Cheremysynova (uklad.). (2013). Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU. 106 p.
9. Konspekt lektsii z kursu «Enerhotekhnolohiia khimiko-tekhnologichnykh protsesiv» dlia zd. vyshchoi osvity za spets. 161 «Khimichni tekhnolohii ta inzheneriia». L. V. Ivanchenko, V. Ya. Kozhukhar (uklad.); Nats. un-t «Odeska politekhnika». (2024). Odesa. 91 p.
10. Metodychni vказivky do vykonannia kursovoho proektu na temu «Rozrakhunok odnokorpusnoi vyparnoi ustanovky» z kursu «Osnovni protsey ta aparaty khimichnoi tekhnolohii» : dlia studentiv IV–V kursiv usikh spetsialnostei i form navchannia. T. Yu. Hirich, V. M. Zadorozhnii, T. P. Yeltsova (uklad.). (2009). Dnipropetrovsk: DVNZ UDKhTU. 36 p.
11. Slobodian N. M. (2020). Analitychnyi ohliad osnovnykh skhem vykorystannia vidpratsovanoho tepla. *Materialy XLIX naukovo-tekhnichnoi konferentsii pidrozdiliv VNTU*. Vinnytsia, 27–28 kvitnia 2020. URL: <https://conferences.vntu.edu.ua/index.php/all-fbtegp/all-fbtegp-2020/paper/view/8823>.
12. Cherevko O. I., Poperechnyi A. M. (2014). Protsey i aparaty kharchovykh vyrobnytstv: pidruchnyk. (2nd ed.). Kharkiv: Svit Knyh. 495 p.
13. Kolach T. N., Radun D. V. (1963). Vyparnye stantsyy. Moskva: Mashhyz.
14. Priadko M. O. Vasylenko S. M., Petrenko V. P. (2014). Efektyvnist vykorystannia teploty vtorynnykh enerhoresursiv (VER) v teplovykh skhemakh tsukrovykh zavodiv. *Tsukor Ukrainy*, 8, 21–24.
15. Pyrysunko M. A., Podvyhin V. V. (2023). Osoblyvosti vykorystannia vtorynnykh enerhoresursiv v sudnovomu enerhetychnomu obladdanni. *Innovatsii v sudnobuduvanni ta okeanotekhnitsi: materialy XIV mizhnar. nauk.-tekhn. konf.* (pp. 209–211). Mykolaiv: NUK.
16. Kholodylna tekhnika. Konspekt lektsii: navchalnyi posibnyk dlia zdobuvachiv stupenia bakalavra za osvithoiu prohramoiu «Kompiuterno-intehrovani tekhnolohii proektuvannia obladdannia khimichnoi inzhenerii» spetsialnosti 133 «Haluzeve mashynobuduvannia». KPI im. Ihoria Sikorskoho. S.V. Hulienko, O.V. Husarova (uklad.). (1 fail: 6.83 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 148 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/129c97f0-b4dc-4984-9962-ca88d7419c20/content>
17. Blishch R. O., Petryshyn N. Z. (2021). Enerhozberihaiuchi tekhnolohii pryhotuvannia pyvnoho susla. *Visnyk Lvivskoho torhovelno-ekonomichnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, 28, 13–17.
18. Nyzkopotentsiini dzherela enerhii: rozrakhunkovo-hrafichna robota: navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Yu. P. Vyshnevskia, O. V. Kozachuk (uklad.). KPI im. Ihoria Sikorskoho. (1 fail: 2,11 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 28 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/edfd3265-d5e9-48cb-8422-76e4d70d4c7f/content>
19. Nyzkopotentsiini dzherela enerhii : laboratornyi praktykum. [Elektronnyi resurs] : navch. posib. dlia stud. spetsialnosti 141 «Elektroenerhetyka, elektrotekhnika ta elektromekhanika». Yu. P. Vyshnevskia, O. A. Melnyk (uklad.). KPI im. Ihoria Sikorskoho. (1 fail: 1,34 Mbait). (2023). Kyiv: KPI im. Ihoria Sikorskoho. 31 p. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b633023b-f414-45cf-93cd-08d868a47408/content>
20. Nagpal H., Spriet J., Krishna Murali M., McNabola A. Heat Recovery from Wastewater – A Review of Available Resource. *Water*. 2021, 13, 1274.

21. Biletskyi V. S., Suiarko V. H., Sirenko V. I., Fyk M. I., Orlovskyi V. M. (2021). Ekologichna bezpeka u naftohazovii promyslovosti: konspekt leksii. Nats. tekhn. un-t «Kharkiv. politekhn. in-t». Kharkiv. 175 p. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/54002>

22. Hovdiak R. M. (2014). Utylizatsiia enerhii tysku pryrodnoho hazu v turbodetandernykh ustanovkakh na ob'ekтах hazovoi promyslovosti. *Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch*, 1. 7–12.

23. Kostenko D. A., Dmytrenko V. O. (2003). Enerhozberihaiuchy potentsial nadlyshkovoho tysku pryrodnoho hazu u hazotransportnii systemi Ukrainy. *Naftova i hazova promyslovist*, 1, 54.

24. Hichov Yu. O. Problemy teorii i tekhnolohii peretvorennia i vykorystannia enerhii : konspekt leksii. Dnipropetrovsk : NMetAU, 2011. 54 p.

25. Klymenko V. V., Kravchenko V. I., Teliuta R. V. (2020). Enerhozberezhennia v teplotekhnolohichnykh protsesakh ta ustanovkakh: navch. posib. Tsentralnoukrain. nats. tekhn. un-t. Kropyvnytskyi: Ekskliuzyv-System. 220 p.

26 Khmelniuk M. H., Podmazko O. S., Podmazko I. O. (2014). Kholodylni ustanovky ta sfery yikh vykorystannia: pidruchnyk. Kherson: FOP Hrin D. S. 484 p.

УДК 62-6:662.6/.9

В. А. Стасов, А. М. Миронов, М. В. Ільченко, Ю. А. Селіхов, К. О. Горбунов,
С. М. Биканов, Є. В. Краснокутський

КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД МЕТОДІВ ТЕПЛОВОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ВТОРИННИХ ЕНЕРГОРЕСУРСІВ У ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ ДЛЯ ОПТИМІЗАЦІЇ ПРИРОДОЄМНОСТІ ПРОМИСЛОВОЇ ПРОДУКЦІЇ

У статті представлено комплексний системний огляд методів теплоенергетичної інтеграції у хіміко-технологічних процесах з акцентом на підвищення енергоефективності, зниження викидів парникових газів та раціональне використання вторинних ресурсів, які виступають джерелами теплоти. Досліджено основні напрями утилізації відпрацьованого тепла, зокрема використання димових газів, гострої пари, вторинної пари, тепла побутових та промислових стоків, а також енергії надлишкового тиску в газорозподільних системах. Особливу увагу приділено технологіям когенерації, рекуперації, використанню теплових насосів та теплообмінного обладнання у різних галузях промисловості. Показано, що димові гази можуть бути ефективним джерелом повторного теплового використання завдяки високій температурі та поширеності у більшості теплових процесів. Водночас описано обмеження, пов'язані з нерівномірністю впливу їхнього теплового поля та високими витратами на транспортування. Розглянуто переваги та недоліки використання вторинної пари у процесах випарювання, дистиляції, сушіння, опалення та генерації електроенергії. Проаналізовано перспективи інтеграції у стічних і промислово-каналізаційних системах, що дозволяє зменшити екологічне навантаження та частково компенсувати втрати тепла. Наголошено на потенціалі рекуперації тепла на рівні компонентів, будівель, мереж та очисних споруд, визначено технічні складності впровадження через забруднення теплообмінного обладнання. Розглянуто феномен втрати енергії при редуванні тиску у газопроводах, що відкриває можливості для впровадження турбодетандерів. У підсумку дослідження вказано на стратегічну важливість теплоенергетичної інтеграції як шляху до зниження ресурсоемності та підвищен-

ня стійкості промислових систем. Обґрунтовано, що найбільш перспективним напрямом є утилізація тепла димових газів, хоча у залежності від галузі більш доцільними можуть виступати й інші варіанти. Практичне значення дослідження полягає у створенні теоретичного підґрунтя для впровадження енергоощадних рішень у промисловості на основі системної інтеграції теплових потоків.

Ключові слова: теплоенергетична інтеграція, природокористування, енергія, ресурси, хімічна індустрія, оптимізація.

V. A. Stasov, A. M. Myronov, M. V. Ilchenko, Yu. A. Selikhov, K. O. Gorbunov,
S. M. Bykanov, Ye. V. Krasnokutsky

A COMPREHENSIVE REVIEW OF METHODS OF SECONDARY ENERGY RESOURCES THERMAL INTEGRATION INTO TECHNOLOGICAL PROCESSES FOR OPTIMIZATION THE NATURAL CAPACITY OF INDUSTRIAL PRODUCTS

The article presents a systematic review of heat-and-power integration methods into chemical-technological processes, focusing on enhancing energy efficiency, reducing greenhouse gas emissions and optimizing thermal resource utilization. The study investigates key directions for waste heat recovery, including the use of flue gases, superheated and secondary steam, heat from domestic and industrial wastewater, and the energy of excess pressure in gas distribution systems. Special attention is given to technologies of cogeneration, heat recovery, and the application of the heat pumps and exchangers across various industrial sectors. It is shown that flue gases offer high potential for thermal reuse due to their elevated temperatures and prevalence in heat-intensive operations. At the same time, limitations such as uneven heating and high transport costs are noted. The study discusses the advantages and shortcomings of secondary steam in processes like evaporation, distillation, drying, heating, and electricity generation. It further explores the integration potential in sewage systems, highlighting how thermal recovery at component, building, network and treatment plant levels can reduce environmental impact and reclaim energy losses. However, challenges such as heat exchanger fouling present significant barriers to implementation. The article also addresses energy losses due to pressure reduction in gas pipelines, underlining the potential of turboexpander technologies. The analysis concludes that thermal energy integration plays a strategic role in reducing resource intensity and enhancing the sustainability of industrial systems. Among the evaluated solutions, the recovery of flue gas heat emerges as the most promising due to its efficiency and technological feasibility, although other approaches may be more appropriate depending on industry-specific conditions. The practical value of the study lies in providing a theoretical basis for the implementation of energy-saving measures in industry through a systematized approach to thermal flow integration.

Keywords: heat-and-power integration, environmental management, energy, resources, chemical industry, optimization.