

Кусаков С.К., аспірант

## ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА НИЗЬКОГО ПОТЕНЦІАЛУ І ВИМОГИ ДО ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТАКОГО ТЕПЛА

*Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»,  
Харків, Україна*

**Ключові слова:** джерело тепла, низький температурний потенціал, утилізація тепла, енергетична ефективність, пластинчатий теплообмінник

### Вступ

Сталий розвиток сучасного суспільства неможливий без постійного зростання потреби в енергії. Постійне зростання населення та його доходів є ключовими рушіями в зростаючому попиті на джерела енергії. Як прогнозує Міжнародне енергетичне агентство [1], попит на всі форми енергії буде зростати. Викопне паливо має обмежені природні запаси і такі види палива не можуть слугувати основою для сталого розвитку в довгостроковій перспективі. Сьогоднішня частка викопного палива у світовій суміші – 82 %, така сама, як і 25 років тому. Сильне зростання відновлюваних джерел енергії лише знизить це до приблизно 75 % у 2035 році, що означає збільшення споживання викопного палива на 25 % порівняно з 2011 роком. Використання викопного палива для виробництва енергії є причиною більшої частини небезпечних забруднень, викидів парникових газів та викидів вуглекислого газу, спричинених людською діяльністю. Прогнозоване збільшення їх використання неминуче призведе до погіршення екологічної ситуації та небезпечних змін клімату. Такі несприятливі наслідки змушують проаналізувати способи використання енергії викопного палива. Під час виробничих процесів до 20–50 % споживаної енергії втрачається за рахунок відпрацьованого тепла, що міститься в потоках гарячих вихлопних газів і рідин, а також від нагрітих потоків продуктів. У деяких випадках підвищення ефективності в результаті відновлення відпрацьованого тепла може підвищити енергоефективність з 10 % до 50 % [2]. Використання цього тепла може значно підвищити ефективність використання енергії та зменшити спалювання викопного палива для виробництва енергії. Там також показано, що більшість втрат тепла, приблизно 60%, знаходяться в діапазоні низьких температур. Хоча низько-сортне відпрацьоване тепло має нижчу якість як джерело тепла, воно доступне у досить великих кількостях, а його робочий потенціал перевищує потенціал інших джерел з більш високою температурою відпрацьованого тепла.

У цій статті наведено аналіз основних джерел тепла низького потенціалу з температурою нижче 260 °С. Також розглянуто дуже важливе питання вибору компактних теплообмінників для якісного використання енергії з усією суворістю умов, властивих різноманітності їх застосувань.

### 1. Скидне тепло промислових підприємств

Згідно з аналізом виконаним в Міжнародному Енергетичному Агентстві [1], в 2005 році обробна промисловість споживала найбільше енергії в світі, з часткою 33 %, за нею слідували домашні господарства (29 %) і транспорт (26 %). При цьому частка

промисловості в викидах вуглекислого газу перевищувала 38 %. Від 10 до 50 % енергії, що генерується втрачається при викидах в навколишнє середовище відпрацьованого тепла, здебільшого (близько 60 %) низького потенціалу. Типові джерела тепла низького потенціалу представлені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Типові джерела низькосортного тепла в промисловості та їх температури

Джерело	Температура, °С
Технологічний паровий конденсат	55–88
<b>Охолодження води:</b>	
Центральний контур охолодження води	30–55
Пічні двері	30–55
Підшипники	30–90
Зварювальні апарати	30–90
Ливарні машини	30–90
Печі відпалу	65–230
Компресори	25–50
Насоси	25–90
Двигуни внутрішнього згорання	65–120
Кондиціонування та штучний холод	30–45
Конденсатори рідин	30–90
Печі сушильні та пекарні	90–230
Гарячі процесові рідини	30–230
Гарячі процесові тверді	90–230
Вентиляційні викиди будівель	20–25

Температура і інші параметри скидного тепла в промисловості сильно залежать від конкретної галузі. Наприклад, теплові викиди в нафтохімічній і нафтопереробній промисловості можуть бути у вигляді забрудненого пара при температурі близько 150 °С або охолоджуючої води близько 30–55 °С, в харчовій промисловості і виробництві напоїв рівень температури може бути близько 80 °С. Найбільший потенціал заощадження тепла в металургійній, цементній, хімічній та нафтохімічній галузях. Найбільш високий рівень енергоефективності відзначений в промисловості Японії і Республіки Корея, за ними слідує Європа і Північна Америка. Рівні енергоефективності в країнах, що розвиваються, і країнах з перехідною економікою демонструють змішану картину. Як правило, рівні ефективності нижче, але там, де останнім часом спостерігається швидке розширення використання новітніх технологій, ефективність може бути досить високою [1]. Енергоспоживання і його ефективність сильно залежать від конкретної галузі.

Поділ потенціалів регенерації скидного тепла між різними процесами в найбільш перспективних галузях хімічної та нафтопереробної промисловості з рекуперації тепла представлено в роботі [2]. Орієнтовні можливості утилізації річних викидів тепла у виробництвах хімічних речовин у США:

Етиленові виробництва	27.01x10 <sup>15</sup> Дж;
Пропіленові виробництва	5.56 x10 <sup>15</sup> Дж;
Виробництва Бензол – Толуол – Ксилен	16.14 x10 <sup>15</sup> Дж;

Сільськогосподарська хімія - добрива	34.61 x10 <sup>15</sup> Дж;
Содові виробництва	16.15 x10 <sup>15</sup> Дж;
Всього п'ять ланцюгів	99.47 x10 <sup>15</sup> Дж;
Орієнтовні додаткові заощадження	211.02 x10 <sup>15</sup> Дж;
ВСЬОГО Промисловість	310.49 x10 <sup>15</sup> Дж.

Можливості утилізації викидів тепла на нафтопереробних заводах США згідно даним у книзі [2] загалом сягають  $520.16 \cdot 10^{15}$  Дж на рік.

Хімічна, нафтохімічна і інші галузі важкої промисловості розподілені нерівномірно між різними країнами світу. Сектор продуктів харчування і напоїв присутній досить рівномірно, більш точно відповідаючи розподілу населення країн. Існує значний потенціал для утилізації скидного тепла в харчовій промисловості і виробництві напоїв, як це показано в роботі [3]. Тільки у Великобританії цей сектор має близько  $10.08 \cdot 10^{15}$  Дж скидного низько потенційного тепла за рік, доступного для рекуперації. Використання цього тепла аналогічно використанню зеленого, або нейтрального по викидах вуглекислого газу джерела енергії, оскільки використовується те, що практично за відсутності утилізації забруднює навколишнє середовище відходами. Тому, коли скидне тепло використовується замість викопних видів палива, відбувається досить істотне скорочення викидів шкідливих речовин та парникових газів, поряд з економією енергії. Наведений аналіз можливого скорочення теплових викидів у розвинутих країнах дозволяє сподіватись що ці показники набагато відносно вищі для менш промислово розвинутих країн та країн з перехідною економікою.

## 2. Втрати тепла в будинках

У багатьох країнах на житлові та комерційні будівлі припадає близько 40 % від загального попиту на енергію та 36 % від загального обсягу викидів парникових газів, і тому вони вважаються як споживачами, так і виробниками енергії [4]. Опалення приміщень і гаряче водопостачання складають найбільшу частку енергії, що виділяється в житлових будинках. Крім втрат тепла через стіни, вікна, двері та інші будівельні елементи, скидне тепло виходить в навколишнє середовище зі стічними водами і вентиляційним повітрям, які мають низько потенційне тепло з температурою, близькою до внутрішньої температури будівель.

### 2.1. Стічні води

Гаряча вода має безліч застосувань всередині будівель, включаючи душові, ванни, раковини, посудомийні і пральні машини. Різні громадські та приватні басейни також скидають теплі води в каналізаційні колектори. Як було підтверджено в роботі [5], в більшості з цих видів використання стічні води зберігають значну частину початкової енергії гарячої води у вигляді низько потенційного тепла, яке можна було б утилізувати. Крім того, навіть холодна водопровідна вода нагрівається, коли вона потрапляє в будинок взимку, споживаючи певну кількість енергії яка використовується для опалення приміщень.

Для нагріву води витрачається значна кількість викопних видів палива. Наприклад, як показано в роботі [6] для Нідерландів, близько 23 % споживання природного газу для побутових потреб використовується для нагріву води. У розвинутих країнах в останні роки робляться значні зусилля для поліпшення енергетичних характеристик будівель з розробкою і практичною реалізацією таких концепцій, як «Будинок з позитивною енергією», «Будинок з суперізоляцією», «Будинок з нульовою енергією». Дослідження, представлене Шмідом [7], показало, що 15 % теплової енергії, яка подається

в будівлі, надходить в навколишнє середовище через каналізаційні колектори, і ця величина збільшується до 30 % в добре утеплених будівлях з низьким споживанням енергії. Це призвело до того, що в сучасних будівлях каналізаційні труби є одними з найбільших носіїв втрат тепла в будівлях. Для вилучення цього низько потенційного тепла можуть використовуватися різні стратегії, такі як використання тепла приміщення, використання тепла стічних вод. Для реалізації всіх цих стратегій необхідно ефективне обладнання для теплопередачі.

## 2.2. Витяжна вентиляція

Сучасні енергетично ефективні будівлі навіть добре ізольовані для економії енергії без належної вентиляції не підходять для здорового проживання. Повітря у внутрішніх приміщеннях може бути набагато більш забруднене, ніж навколишнє повітря зовні. Різні біологічні забруднювачі, такі як цвіль, лупа домашніх тварин і пилок рослин, а також такі хімічні речовини, як радон і летючі органічні сполуки, можуть створювати токсичну середу всередині приміщень. Щоб запобігти такій небезпечній ситуації, будівлям необхідна вентиляція протягом дня для підтримки здорового внутрішнього середовища.

У різних країнах діє законодавство, яке встановлює мінімальну вентиляцію. Наприклад Департамент енергії США (USDE) [8] рекомендує, щоб, згідно стандарту Американської спілки інженерів з опалення, охолодження та кондиціонування (ASHRAE) [9], житлову площу будинку необхідно було вентилувати з інтенсивністю 0.35 повної зміни повітря в приміщенні за годину або 15 куб. футів в хвилину (близько 25 м<sup>3</sup>/год) на людину, в залежності від того, що більше. Взимку при кімнатній температурі 20 °C і температурі зовні мінус 10 °C це означає, свіже повітря що надходить повинно отримувати на годину близько 940 кДж енергії (0,26 кВт по потужності) на людину для обігріву. Така ж значна кількість теплової енергії низької якості буде втрачена з витяжним повітрям в навколишнє середовище, якщо воно не зазнає рекуперації або не буде використане іншими способами. Системи вентиляції з рекуперацією енергії забезпечують контрольований спосіб вентиляції будинку, зводячи до мінімуму втрати енергії. Вони знижують витрати на обігрів вентильованого повітря взимку, передаючи тепло і / або вологість від теплового внутрішнього повітря, яке випускається, до свіжого (але холодного) повітря. Влітку внутрішнє повітря охолоджує тепле, що надходить припливне повітря, що знижує витрати на кондиціонування. Існує два типи систем рекуперації такої енергії. Вентилятор з рекуперацією тепла, втягує свіже повітря в будинок і одночасно витягає повітря з дому. Під час такого обміну два повітряні потоки проходять через теплообмінник всередині блоку, де теплова енергія від одного повітряного потоку передається іншому. Вентилятор з рекуперацією енергії працює аналогічним чином, за винятком того, що частина вологи в більш вологому повітряному потоці (зазвичай повітря всередині приміщення взимку) передається в потік прийдешнього зовні повітря. З метою рекуперації тепла також можуть використовуватися теплові насоси, які забирають тепло у повітря, що відходить і передають його повітряю що надходить або нагрівальним елементам всередині будівлі, наприклад теплим полам.

## 3. Отримання енергії при утилізації побутових і промислових відходів

З поліпшенням стандартів життя в сучасному суспільстві і зростанням населення світу споживання різних товарів постійно зростає, що неминуче веде до збільшення кількості відходів в домашніх господарствах і комерційній діяльності. Ці відходи можуть бути важливим джерелом енергії. Його також можна розглядати як зелений, тому що,

при розміщенні відходів на сміттєвих полігонах, при розкладанні вони будуть виділяти не меншу кількість небезпечних для навколишнього середовища забруднюючих речовин і вуглекислого газу порівняно з їх спалюванням. Утилізація відходів є основною метою їх термічної переробки. В ході цього процесу рекуперація тепла стає все більш важливою і невід'ємною частиною сучасних технологій в цій галузі. В даний час технології переробки відходів в енергію (WtE) вважаються максимально можливими і здійсненними [10]. Даний підхід разом з використанням біопалива допомагає зменшити споживання викопних видів палива. Ефективність переходу від енергії хімічних відходів, до її кінцевих корисних форм (тепла або електрики) залежить від ряду аспектів, включаючи типи і властивості відходів, що спалюються, використовувані технології, місцеві умови і поточні ціни на енергію.

#### 4. Поновлювані джерела теплової енергії

Необхідність мінімізувати споживання викопних видів палива і безпека для навколишнього середовища від викидів вуглекислого і парникових газів визнана у всьому світі. Директива 2009/28 / ЄС підтверджує прихильність Європейського Союзу розвитку енергетики в ЄС на основі відновлюваних джерел, стверджуючи обов'язкову мету 20 % частки енергії з відновлюваних джерел до 2020 року. Вона встановлює загальні рамки для утилізації енергії з поновлюваних невикопних джерел, а саме енергії вітру, сонячної, геотермальної, гідротермальної і океанської енергії, гідроенергії, біомаси, газу звалищ сміття, газу очисних споруд та біогазу. Нижче розглядаються можливості сонячних і геотермальних джерел енергії.

##### 4.1. Сонячна енергія

Основним джерелом зовнішньої енергії на Землі є сонячна радіація. За даними довідника [11], її інтенсивність на зовнішньому краю атмосфери становить близько  $1353 \text{ Вт/м}^2$ . Це значення відомо як сонячна постійна. Воно дещо змінюється протягом року, будучи найбільшим в січні, коли Земля найближче до Сонця. Це випромінювання частково відбивається назад в космос, частково поглинається в атмосферу, а частково розсіюється. Тільки близько двох третин цієї енергії надходить на поверхню землі в години пік. Цей пік сонячного випромінювання на поверхні Землі становить близько  $1 \text{ кВт/м}^2$ . Дані сонячної радіації для конкретного місця часто наводяться в  $\text{кВтг} / \text{м}^2$  в день. Наприклад, в різних місцях в США цей показник коливається між 3,5 до  $6,8 \text{ кВт/м}^2$  в день. Використання цієї сонячної енергії можна розділити на чотири категорії: 1) пасивна, яка використовує принципи проектування та будівельні матеріали для кращого використання сонячної енергії; 2) сонячна тепла енергія для виробництва низькосортного тепла; 3) сонячно-теплова електрична енергія для виробництва електроенергії, як правило, з використанням високоякісного тепла, виробленого сонячною енергією; 4) сонячне фотоелектричне обладнання для виробництва електроенергії за допомогою фотоелектричних панелей.

Теплове використання сонячної енергії в даний час є одним з найбільш поширених застосувань поновлюваних джерел енергії. Необхідна температура низькотемпературного тепла, що виробляється сонячними колекторами, залежить від області застосування. Для обігріву приміщення потрібно температура в діапазоні від 45 до 90 °C, в залежності від використовуваної технології обігріву приміщення. Для приготування гарячої води з-під крана від 50 до 60 °C. Для промислових процесів це від 60 до 260 °C і навіть вище, до 400 °C.

#### 4.1.1. Сонячні ставки

Сонячний ставок є найпростішою формою сонячного теплового колектора великої площі, що представляє собою просто неглибокий басейн глибиною в кілька метрів, заповнений солоною водою. Солоність води збільшується з глибиною, а градієнт солоності запобігає конвекційним потокам. Сонячна радіація проникає через воду ставка в його нижній шар з концентрованим сольовим розчином. Температура там підвищується, так як поглинене там тепло не може переміститися вгору конвекцією. Тому сонячне тепло зберігається в нижньому шарі ставка. Влітку при температурі навколишнього середовища близько 20 ° С воно може дати теплову енергію з температурою близько 80 °С.

#### 4.1.2. Сонячні колектори

Використання сонячної теплової енергії значно варіюється в різних регіонах світу. Основні області застосування: підготовка гарячої водопровідної води, опалення приміщень, тепlopостачання промислових процесів і охолодження. Основними елементами, які визначають потужність, ефективність і вартість сонячної теплової системи, є сонячні колектори. Основні типи сонячних колекторів, які виробляють низькосортне тепло:

- Неглазуровані колектори (UG);
- Плоскі колектори (FPC);
- Евакуйовані трубні колектори (ETC).

Для кожного з цих типів існує велика кількість різних модифікацій, що випускаються різними виробниками. Більшість з них призначені для виробництва тепла при температурі нижче 95 °С для таких застосувань, як центральне опалення, гаряча вода і опалення басейнів. Високоєфективні плоскі колектори з вакуумною ізоляцією і вакуумні трубчасті колектори можуть виділяти тепло при температурах до 250 °С для таких застосувань, як промисловий нагрів, опріснення, охолодження і т.д. Тепло з температурою до 250 °С і навіть набагато вище може бути отримано за допомогою вдосконалених концентрованих колекторів, таких як лінійні колектори Френеля і параболічних жолобів, сонячні тарілки і сонячні башти, як описано, наприклад. Це тепло середньої і високої якості, яке виходить за рамки цієї статті, використовується для високотемпературних процесів, головним чином для виробництва електроенергії з тепловими циклами пари.

Що стосується сонячних низькотемпературних теплових установок по всьому світу, то, згідно [2], частка вакуумних трубчастих колекторів становить 63 % від загальної встановленої потужності. Частка колекторів цього типу становить до 82 % встановлених останнім часом, в основному через ролі евакуйованих колекторів в Китаї, оскільки це поки найбільший ринок з високими темпами зростання. На відміну від цього, в Європі більшість установок з великими сонячними колекторами засновані на плоских колекторах (FPC) [2]. Найбільший в Європі такий об'єкт в Марсталь, Данія має загальну площу колекторів FPC 33 300 м<sup>2</sup> з теплової потужністю 23 300 кВт. Найбільша установка з вакуумними колекторами в Вельсі, Австрія, має загальну площу в 10 разів менше, ніж 3388 м<sup>2</sup>, а тепла потужність – 2400 кВт. Всі основні сонячні теплові установки для різних промислових застосувань (харчова, хімічна, автомобільна промисловості), використовують колектори FPC. Зменшити вартість плоских колекторів зі збереженням їх ефективності дозволяє їх виготовлення з використанням полімерних матеріалів [12].

#### 4.2. Геотермальне тепло

Серед відновлюваних джерел енергії використання низько потенційного тепла геотермальної енергії має найбільший досвід роботи з системами централізованого теплопостачання, враховуючи безперервну роботу теплової станції Шод-Ег у Франції з 14-го століття [13]. Всебічний огляд прямого використання геотермальної енергії був зроблений в роботі [14]. Загальна кількість геотермальної енергії, використаної безпосередньо, в 2010 році склала 117 778 ГВтч. Лідерами по щорічному використанню енергії геотермального тепла для централізованого теплопостачання є Ісландія, Китай, Японія, Туреччина, Німеччина і Франція. Крім прямого використання в світі 67 246 ГВтч в 2010 році було використано для вироблення електроенергії. Існує два способи отримання геотермального тепла. У деяких місцях його можна отримати безпосередньо з гарячих джерел, гарячих гейзерів або пари, що йде з-під землі. Наприклад, в Ісландії геотермальна електростанція в Несявеллірі використовує пар, який мимовільно надходить з-під землі. Крім Ісландії, є й інші країни, які мають надійні геотермальні джерела такого роду. Серед них Угорщина, Кенія, США і Росія. Природні мимовільні геотермальні джерела тепла є досить рідкісними винятками. У більшості місць геотермальне тепло повинно бути вилучено. Температура Землі піднімається з глибиною землі. Градієнт температури становить від 20 до 30 °С в більшості країн світу, не рахуючи районів поблизу кордонів тектонічних плит. Типовим методом використання геотермального тепла є закачування холодної води глибоко в землю і відкачування її назад, коли вона нагрівається підземним теплом. Геотермальне тепло відносно дешеве, стійке, надійне і екологічне.

#### **5. Вимоги до теплообмінного обладнання при використанні тепла низького потенціалу**

Представлений в цьому розділі аналіз різних низько потенційних джерел тепла показує, що в переважній більшості застосувань нагрівальні середовища джерела тепла не можуть бути використані безпосередньо або змішані із середовищами, які завдають тепло кінцевому користувачеві, передача тепла між цими середовищами повинна бути виконана з рекуперативними теплообмінниками. Крім того, всі методи низькотемпературної модернізації або перетворення її в електроенергію вимагають рекуперативних теплообмінників для здійснення процесів теплообміну газ-газ, газ-рідина, рідина-рідина, випаровування і конденсація. Умови всіх цих процесів сильно розрізняються по температурах, тиску, наявних перепадах тиску, теплофізичних властивостях потоків, тенденціям до забруднення і корозії поверхонь теплообміну. Все розмаїття цих умов процесу не може бути реально здійснене одним типом теплообмінників, як, наприклад, найбільш поширені звичайні кожухотрубні теплообмінники, навіть з технічної точки зору. Інше міркування є економічним, оскільки теплообмінне обладнання може скласти значну частку в капітальних витратах багатьох установок для утилізації низькосортного тепла.

В даний час розробка теплообмінного обладнання з метою задоволення вимог різних застосувань в промисловості, гірничодобувної промисловості, на транспорті, в аерокосмічній та комунальній сферах привела до створення теплообмінників різних типів. Багато з цих типів можуть бути використані в різних застосуваннях низько потенційного використання тепла, які висувають деякі конкретні вимоги. Основні такі вимоги сформульовані нижче.

### 5.1. Невеликі температурні напори

Як можна судити з наведеного вище аналізу, більшість низько потенційних джерел тепла в промисловості, комунальному секторі, поновлюваних геотермальних і сонячних джерелах мають досить обмежені рівні температури. Для безпосереднього використання цього тепла різниця температур між джерелом і споживачем зазвичай обмежена. Інтеграція процесів - це потужний інструмент для підвищення енергоефективності в різних застосуваннях, включаючи використання низько потенційної теплової енергії. Сучасний стан цієї методології описано в книзі [15]. Переваги інструментів інтеграції процесів для розробки низько потенційних систем утилізації тепла були продемонстровані в ряді публікацій на прикладах різних виробництв: нафтопереробного [16, 17], мінеральних добрив [18], інтеграції різних виробництв промислового майданчика [19,20] та інших. Одним з основних параметрів в інтеграції процесів є мінімальна різниця температур (MTD) в системі рекуперації тепла. Нижча MTD призводить до кращої рекуперації тепла і підвищення ефективності використання енергії, але зі збільшенням вартості рекуперативних теплообмінників. При використанні звичайних кожухотрубних теплообмінників нижня межа мінімальної різниці температур становить близько 10 K з найменшим значенням 5 K, враховуючи їх конструктивні особливості. Використання більш низьких значень MTD без значного збільшення капітальних витрат було б вигідно для енергоефективності рекуперативної системи теплообмінників. Це можливо з іншими типами теплообмінників, заснованих на технологіях інтенсифікації теплопередачі, таких як пластинчаті теплообмінники (ПТО) [2].

### 5.2. Малі різниці температур

Коли дві рідини обмінюються теплом в теплообміннику, нагріта рідина отримує всю теплову енергію, передану від охолоджувальної рідини, за винятком втрат тепла в навколишнє середовище, які зазвичай невеликі і можуть бути практично усунені за допомогою ізоляції в певних типах теплообмінників. Тим часом корисна частина теплової енергії, яка називається ексергією, втрачається, оскільки неможливо нагрівати холодну рідину до температури, при якій подається гаряча рідина. Ці втрати ексергії можна мінімізувати, нагріваючи холодну рідину якомога ближче до температури подачі гарячої рідини і зводячи до мінімуму різницю температур. Така можливість є в ПТО, як це показано в методиці розрахунку цих апаратів [21]. Можливість точного розрахунку на конкретні умови процесу з заданою малою різницею температур забезпечується наявністю науково обґрунтованих точних кореляцій для розрахунку падіння тиску у ПТО [22], тепловіддачі в умовах газових та водних потоків [23] та інших середовищ [24].

### 5.3. Зменшення забруднень поверхні теплопередачі

У ряді застосувань низько потенційне тепло виробляється за допомогою речовин, які мають високий вміст матеріалів, що утворюють відкладення на поверхнях теплопередачі, надаючи на неї негативний вплив. Це відноситься до багатьох промислових джерел тепла, геотермальних і стічних вод і т.д. Утворення забруднень призводить до збільшення падіння тиску і збільшення споживання енергії для перекачування середовищ. Зменшення загального коефіцієнта теплопередачі призводить до зменшення кількості енергії, яку повертатимуть в систему, і вимагає, щоб надлишкова площа поверхні була встановлена, щоб уникнути цього. Одним із заходів щодо зниження забруднення є використання поліпшених поверхонь теплопередачі. Наприклад, швидкість забруднення в пластинчастих теплообмінниках, як правило, приблизно в десять разів менше, ніж в звичайних трубчастих для тих же умов [25]. Це вимагає надійних і точних методів для



врахування забруднення в конструкції теплообмінника [26], які в даний час обмежені. Інший метод - періодичне очищення поверхні теплопередачі. Конструкція теплообмінника повинна передбачати процедури очищення для боку потоку з утворенням забруднень як це і передбачає конструкція ПТО.

#### 5.4. Застосування в процесах конденсації газових сумішей

Існує велика кількість низько потенційних джерел, тепла енергія яких передається газовими потоками з присутністю парів здатних до конденсації. За рахунок інтенсифікації процесів переносу тепла та маси [27] ПТО добре зарекомендували себе при роботі в конденсаційних процесах як чистої пари, так і в присутності повітря яке не конденсується [28]. ПТО можуть бути ефективно використані також в процесах конденсації парових сумішей [29] та в умовах низького тиску парів [30].

#### 5.5. Компактність і низька вартість при використанні дорогих матеріалів для теплообмінної поверхні

Існує велика кількість низько потенційних джерел, тепла енергія яких передається потоками з високою корозійною природою, особливо відпрацьоване тепло в хімічній промисловості, на коксових заводах, в стічних водах, в деяких геотермальних областях. Багато тепла втрачається у вигляді пари, що виходить в навколишнє середовище з димовими газами, які у вигляді конденсату утворюють кислотні розчини, які поглинають оксиди з димових газів. У всіх цих випадках поверхня теплопередачі повинна бути виготовлена з матеріалів і металевих сплавів з більш високою корозійною стійкістю. Це може зробити такий теплообмінник дуже дорогим і навіть заборонити використання тепла з економічних міркувань. Проблема може бути вирішена за допомогою компактних поліпшених поверхонь теплопередачі ПТО [2], які можуть зажадати набагато менших кількостей дорогого матеріалу для їх виробництва, що призводить до достатнього зниження вартості теплообмінника. Для підвищених температур і тиску потоків теплоносіїв розроблені спеціальні зварні конструкції [31], в яких відсутні гумові ущільнення.

Залежно від конкретних застосувань, які численні при використанні низько потенційного тепла, можуть виникнути інші вимоги до теплообмінників. Тому, щоб вибрати правильний тип і необхідну конструкцію, слід проаналізувати всю різноманітність наявного обладнання для теплопередачі, щоб знайти найкраще рішення на ринку або поліпшити його з подальшою розробкою для даного випадку.

## 6. Висновки

Сталий розвиток сучасного суспільства потребує зростання потреб в енергії. В умовах обмежених запасів викопного палива, спалення якого до того ж дуже шкідливе для навколишнього середовища, цю проблему можна вирішити скорочуючи втрати теплової енергії та використовуючи більше відновлюваних джерел енергії. До 80 % втрат теплової енергії та енергії її відновлюваних джерел трапляється з потоками маючими низький температурний потенціал до 260 °С. Це потоки після промислових процесів, стічні води та вентиляційне повітря будівель, тепло спалювання промислових та побутових відходів, тепло сонячних колекторів та геотермальне тепло. Для використання такого тепла потрібні високоефективні пластинчаті теплообмінні апарати. Вони відповідають всім умовам необхідним для ефективною утилізації тепла низького потенціалу.

Література

1. IEA. 2019. World Energy Outlook 2019 <https://webstore.iea.org/download/summary/2467?fileName=English-WEO-2019-ES.pdf> (Accessed 20th November 2019).
2. Klemes J.J., Arsenyeva O., Kapustenko P., Tovazhnyansky L., 2015, Compact Heat Exchangers for Energy Transfer Intensification: Low Grade Heat and Fouling Mitigation, CRC Press, Boca Raton, FL, USA.
3. Law R., Harvey A., Reay D. 2013. Opportunities for low-grade heat recovery in the UK food processing industry. Applied Thermal Engineering 53: 188-196.
4. Kapustenko P.O., Arsenyeva O.P. 2013. Process Integration for Energy Saving in Buildings and Building Complexes. Chapter 31 in Handbook of Process Integration (PI), Edited by Klemeš J.J., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, UK: 938-965. ASHRAE. 2013., Handbook Fundamentals. [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org). (Accessed 10th April 2014).
5. Cipolla S.S., Maglionico M. 2014. Heat recovery from urban wastewater: analysis of the variability of flow rate and temperature in the sewer of Bologna, Italy. Energy Procedia 45: 288 – 297.
6. Frijns, J., Hofman, J., Nederlof, M. 2013. The potential of (waste) water as energy carrier. Energy Conversion and Management 65: 357–363.
7. Schmid F., 2009, Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers, Energy-engineer FH, Swiss Energy Agency for Infrastructure Plants. Zürich, Switzerland. 10p.
8. Energy Saver. 2019. Whole house ventilation systems. USDE. <https://www.energy.gov/energysaver/weatherize/ventilation/whole-house-ventilation> (Accessed 27<sup>th</sup> November 2019).
9. ASHRAE Handbook Fundamentals, 2017, <https://www.ashrae.org/technical-resources/ashrae-handbook> (accessed 30 November 2019).
10. Kilkovsky B., Stehlik P., Jegla Z., Tovazhnyansky L. L., Arsenyeva O., Kapustenko P. O. 2014. Heat exchangers for energy recovery in waste and biomass to energy technologies—Energy recovery from flue gas. Applied Thermal Engineering 64(1): 213–223.
11. Doty S., Turner W. C. 2009. Energy management handbook. The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA, USA.
12. Selikhov Y.A., Kotsarenko V.A., Klemes J.J., Kapustenko P.O.– 2018. The Performance of Plastic Solar Collector as Part of Two Contours Solar Unit. Chemical Engineering Transactions, 70, 2053–2058.
13. Rezaie B., Rosen M.A. 2012. District heating and cooling: review of technology and potential enhancements. Applied Energy 93: 2–10.
14. Lund J.W., Freeston D.H., Boyd T.L. (2011), Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review, Geothermics, 40, 159–180.
15. Klemeš J., editor, 2013. Handbook of Process Integration (PI): Minimisation of energy and water use, waste and emissions. Woodhead Publishing/Elsevier, Cambridge, UK.
16. Клемеш Й., Костенко Ю.Т. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., ПЕРЕВЕРТАЙЛЕНКО А.Ю., ЗУЛИН Б.Д. (1999). Применение метода пинч-анализа для проектирования энергосберегающих установок нефтепереработки. Теорет. основы хим. технологии, 33(4), 420–431.
17. ТОВАЖНЯНСКИЙ Л.Л., КАПУСТЕНКО П.А., УЛЬЕВ Л.М., БОЛДЫРЕВ С.А., АРСЕНЬЕВА О.П., ТАРНОВСКИЙ М.В., 2009, Интеграция тепловых процессов на установке первичной переработки нефти АВТ А12/2 при работе в зимнее время. Теорет. основы хим. технологии, 43(6), 665–676.
18. Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Ulyev L., Boldyryev S., Arsenyeva O. (2010). Process integration of sodium hypophosphite production. Applied thermal engineering, 30(16), 2306–2314.

19. Nemet A, Varbanov PS, Kapustenko P, Boldyryev S, Klemeš JJ., 2012, Capital cost targeting of total site heat recovery. *Chemical Engineering Transactions*, 29, 1447–1452.
20. Boldyryev S, Varbanov P.S, Nemet A, Klemeš J.J, Kapustenko P., 2014, Minimum heat transfer area for Total Site heat recovery. *Energy conversion and management*. 87, 1093–1097.
21. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2009.– Mathematical modelling and optimal design of plate-and-frame heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*. 18, 791–796.
22. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Khavin G., 2011, The generalized correlation for friction factor in crisscross flow channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25, 399–404.
23. Kapustenko P., Arsenyeva O., Dolgonosova O., 2011, The heat and momentum transfers relation in channels of plate heat exchangers, *Chemical Engineering Transactions*, 25: 357–362.
24. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Demirskiy O.V., 2014, Generalised semi-empirical correlation for heat transfer in channels of plate heat exchanger. *Applied Thermal Engineering*, 70(2), 1208–1215.
25. Gogenko A.L., Anipko O.B., Arsenyeva O.P., Kapustenko P.O., Accounting for fouling in plate heat exchanger design, *Chemical Engineering Transactions*, 12 (2007) 207–212.
26. Crittenden B.D., Yang M., Dong L., Hanson R., Jones J., Kundu K., Harris J., Klochok O., Arsenyeva O., Kapustenko P., 2015, Crystallization fouling with enhanced heat transfer surfaces. *Heat Transfer Engineering*. 36(7-8): 741–749.
27. Tovazhnyansky L.L. and Kapustenko P.A., 1984, Intensification of heat and mass transfer in channels of plate condensers. *Chemical Engineering Communications*, 31(1–6), 351–366.
28. Arsenyeva O.P., Čuček L., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Savchenko Y.A., Kusakov S.K., Matsegora O.I., 2016b, Utilisation of waste heat from exhaust gases of drying process. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*. 10(1):131–138.
29. Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Nagorna O.G., Perevertaylenko O.Y. (2004). The simulation of multicomponent mixtures condensation in plate condensers. *Heat transfer engineering*, 25(5), 16–22.
30. Arsenyeva O., Tovazhnyansky L., Kapustenko P., Perevertaylenko O., Khavin, G. (2011). Investigation of the new corrugation pattern for low pressure plate condensers. *Applied Thermal Engineering*, 31(13), 2146–2152.
31. Arsenyeva O.P., Tovazhnyansky L.L., Kapustenko P.O., Khavin G.L., Yuzbashyan A.P., Arsenyev P.Y.– 2016, Two types of welded plate heat exchangers for efficient heat recovery in industry. *Applied Thermal Engineering*, 105, 763–773.

УДК 66.021.4

Кусаков С.К.

### **ДЖЕРЕЛА ТЕПЛА НИЗЬКОГО ПОТЕНЦІАЛУ І ВИМОГИ ДО ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЕНЕРГЕТИЧНО ЕФЕКТИВНОЇ УТИЛІЗАЦІЇ ТАКОГО ТЕПЛА**

Наведено аналіз можливих джерел тепла низького потенціалу серед яких визначено потоки після промислових процесів, стічні води та вентиляційне повітря будівель, тепло спалювання промислових та побутових відходів, тепло сонячних колекторів та геотермальне тепло. Утилізація цього тепла дозволяє в значній мірі скоротити потреби

в викопних паливах та викиди у навколишнє середовище вуглекислого газу та інших шкідливих речовин, які утворюються при спаленні викопних палив. Сформульовано основні вимоги до теплообмінного обладнання для енергетично ефективної утилізації тепла низького потенціалу. Показано, що цим вимогам у повній мірі задовольняють сучасні компактні теплообмінні апарати, серед яких найбільш перспективними є пластинчаті теплообмінники.

**Ключові слова:** джерело тепла, низький температурний потенціал, утилізація тепла, енергетична ефективність, пластинчатий теплообмінник.

Кусаков С.К.

### **ИСТОЧНИКИ ТЕПЛА НИЗКОГО ПОТЕНЦИАЛА И ТРЕБОВАНИЯ К ТЕПЛО-ОБМЕННОМУ ОБОРУДОВАНИЮ ДЛЯ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИ ЭФФЕКТИВНОЙ УТИЛИЗАЦИИ ТАКОГО ТЕПЛА**

Приведен анализ возможных источников тепла низкого потенциала, среди которых определены потоки после промышленных процессов, сточные воды и вентиляционный воздух зданий, тепло сжигания промышленных и бытовых отходов, тепло солнечных коллекторов и геотермальное тепло. Утилизация такого тепла позволяет в значительной степени сократить потребность в ископаемых топливах и выбросы в окружающую среду углекислого газа и других вредных веществ, образующихся при сжигании ископаемых топлив. Сформулированы основные требования к теплообменному оборудованию для энергетически эффективной утилизации тепла низкого потенциала. Показано, что этим требованиям в полной мере удовлетворяют современные компактные теплообменные аппараты, среди которых наиболее перспективными являются пластинчатые теплообменники.

**Ключевые слова:** источник тепла, низкий температурный потенциал, утилизация тепла, энергетическая эффективность, пластинчатый теплообменник.

Kusakov S.K.

### **LOW POTENTIAL HEAT SOURCES AND REQUIREMENTS FOR HEAT EXCHANGE EQUIPMENT FOR ENERGY EFFICIENT UTILIZATION OF SUCH HEAT**

The analysis of possible sources of low potential heat is presented. Among such sources are the streams after industrial processes, sewage and ventilation air of buildings, heat of combustion of industrial and household waste, heat of solar collectors and geothermal heat. The utilization of this heat can significantly reduce the fossil fuel demand and the environmental emissions of carbon dioxide and other harmful substances produced by the burning of fossil fuels. The basic requirements for heat exchange equipment for energy efficient utilization of low potential heat are formulated. It is shown that these requirements are fully satisfied by modern compact heat exchangers, among which the most promising are plate heat exchangers.

**Keywords:** heat source, low temperature potential, heat recovery, energy efficiency, plate heat exchanger.