

УДК 662.99

HEAT RECOVERY OF WASTE WATER OF FOOD ENTERPRISES

Y. Skuibida, V. Kostyuk

National University of Food Technologies

Key words:

waste heat recovery,
waste water,
heat pump,
heat exchanger,
power of heat flow

Article history:

Received 20.10.2023

Received in revised form
29.03.2024

Accepted 30.03.2024

Corresponding author:

trynog0@ukr.net

ABSTRACT

A significant amount of energy used in the food industry is wasted in the form of heat from exhaust gases, air flows and liquids. In the case of food enterprises that use a large amount of water in production and discharge a lot of heat in the form of waste water, heat recovery is appropriate. Every day, humanity is more and more aware of the importance of water and energy for life, as well as the difficulty of obtaining them.

Waste heat utilization projects should be based on a careful study of existing sources of heat loss and their absorption in order to study acceptor heat flows and choose appropriate technical solutions for preventing losses and reusing the corresponding heat flows.

The article discusses the most effective heat recovery technologies for food enterprises of the dairy, bakery and non-alcoholic beer industries. An increase in the value of thermal discharges is achieved with the help of heat pumps, the efficiency of which depends on the conversion factor (COR) of a specific heat pump, which determines the ratio of the received thermal energy to the amount of consumed electricity, which is spent on the operation of the compressor unit of the pump. Heat exchangers are also an effective solution for waste water heat recovery, which can have a variety of designs, for example, a design in the form of spiral copper coils wrapped around a copper riser, etc. Compared to the use of heat pumps, heat exchangers do not require additional electricity consumption and can be placed close to the consumer, which allows to avoid losses during heat transfer. Direct use of low-potential coolant in heat exchangers does not require significant capital investments and current costs. For an average dairy, non-alcoholic beer, and bakery enterprise, the indicators of water flows and power of heat flows discharged into the sewage system and economic losses at the same time are given. The study proves that recuperative systems implemented in the technological process chain enable the reuse of heat, which helps to reduce the amount of electricity, fuel and water consumed.

DOI: 10.24263/2225-2916-2024-35-12

РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛА СТИЧНИХ ВОД ХАРЧОВИХ ПІДПРИЄМСТВ

Є. Л. Скуйбіда, аспірант, <https://orcid.org/0009-0000-6597-797X>

В. С. Костюк, канд. техн. наук, <https://orcid.org/0009-0000-5507-6027>

Національний університет харчових технологій

Значна кількість енергії, що використовується в харчовій промисловості, марно витрачається у вигляді тепла вихлопних газів, повітряних потоків і рідин. Харчові підприємства використовують у виробництві велику кількість води та скидають багато тепла у вигляді стічних вод, тому доцільно проводити рекуперація тепла. Людство з кожним днем все більше усвідомлює важливість води та енергії для життя, а також складність їх отримання.

Проекти використання відпрацьованого тепла повинні базуватися на ретельному дослідженні існуючих джерел теплових втрат та їх поглинання з метою вивчення акцепторних теплових потоків і вибору відповідних технічних рішень для запобігання втратам та повторного використання відповідних теплових потоків.

У статті розглянуті найбільш ефективні технології рекуперації тепла для харчових підприємств молочної, пиво безалкогольної та хлібопекарської промисловості. Збільшення цінності теплових скидів досягається за допомогою теплових насосів, ефективність використання яких залежить від коефіцієнта перетворення (COP) конкретного тепло насоса, що визначає відношення отриманої теплової енергії до кількості спожитої електрики, яка витрачається на роботу компресорного блока насоса. Також ефективним рішенням для рекуперації тепла стічних вод є теплообмінники, які можуть мати різноманітну конструкцію, наприклад, у вигляді спіральних мідних котушок, обмотаних навколо мідного стояка, тощо. Порівняно з використанням теплових насосів, теплообмінники не вимагають додаткового споживання електроенергії та можуть бути розміщені близько до споживача, що дає змогу уникнути втрат під час перенесення тепла. Пряме використання низькопотенційного теплоносія у теплообмінниках не вимагає значних капіталовкладень і поточних витрат. Для середньостатистичного молочного, пивобезалкогольного та хлібопекарського підприємства наведені показники стоків води та потужності теплових потоків, що скидаються в каналізацію, та економічні втрати при цьому. Дослідження доводить, що рекуператорні системи, впроваджені в ланцюжок технологічного процесу, дають змогу використовувати тепло повторно, що допомагає скоротити кількість споживаної електроенергії, палива та води.

Ключові слова: рекуперація відпрацьованого тепла, стічні води, тепловий насос, теплообмінник, потужність теплового потоку.

Вступ. В Україні виробництво продуктів харчування потребує до п'яти разів більше енергії, якщо порівняти з індустріально розвиненими країнами. На більшості промислових підприємств харчової промисловості відбуваються технологічні процеси, до яких відносять нагрівання певних середовищ. Джерела відпрацьованого тепла включають гарячі димові гази, що викидаються в атмосферу, нагріті продукти, що виходять з промислових процесів, і передачу тепла від гарячої поверхні обладнання та стоків води [1].

У харчовій промисловості утворюється велика кількість відпрацьованого тепла, яке практично не використовується як ресурс для економії енергії та скорочення викидів. Кількість тепла, що не використовується, за результатами дослідження стано-

виставляють від 20 до 50% промислового споживання енергії. На харчових підприємствах України щодня можливо економити значну кількість коштів і ресурсів шляхом впровадження енергоефективних процесів і технологій, таких як рекуперація — процес повторного використання частини енергії, яка виникає при нагріванні припливної води, з метою її подальшого використання [2].

Рекуперація відпрацьованого тепла має вирішальне значення підвищення енергоефективності будь-якої галузі. Сьогодні технології дають змогу вловлювати та повторно використовувати надлишкове тепло від існуючих процесів для опалення, вироблення електроенергії тощо. Вода є найбільш широко використовуваною сировиною в харчовій промисловості. Внаслідок утворення великої кількості стічних вод як відходів харчових підприємств і зростання дефіциту питної води, повторне використання потоків стічних вод є важливою економічною та екологічною проблемою [3]. Крім того, в харчовій промисловості існують процеси, які використовують значну кількість тепла, що потім виводиться у вигляді стічних вод, також технологічні процеси з використанням пари і гарячої води: пастеризація, стерилізація, сушіння продуктів, пивоваріння, виробництво молочних та кондитерських виробів і напоїв тощо. Стічні води харчових підприємств містять від 5 до 25% теплової енергії залежно від умов і процесів виробництва [4].

Розглянемо на прикладі молочних, пивобезалкогольних і хлібопекарських підприємств особливості рекуперації тепла.

Невід'ємною складовою кожного технологічного процесу, наприклад, на підприємствах молочної промисловості, є використання води. Воду використовують у різноманітних технологічних процесах — миття технологічного обладнання, тари, підлог, санітарно-гігієнічних цілей, у вигляді теплоносія (пари) тощо. Чиста вода, яка використовується на різні технологічні потреби, забруднюється різноманітними домішками, переважно органічними.

До основних показників їх забруднень належать складові продуктів, миючі засоби та сторонні предмети [1].

Умовно чисті води молочних виробництв, що утворюються в результаті експлуатації охолоджувально-пастеризаційних установок, аміачних і повітряних компресорів, рекомендується після відповідної обробки (охолодження, механічної очистки тощо) направляти в системи оборотного чи повторного водопостачання підприємства [2, 3].

Вилучаючи з неї всі корисні речовини, воду, що залишилася, можна використовувати на технічні потреби. Це стосується заводів, де з молока вилучаються його складові частини. Якщо продукт готується з незбираного молока чи у вигляді вторинного продукту із сироватки, то вода, яка міститься в молоці, йде на споживання. У такому разі необхідна певна кількість свіжої (водопровідної) води для миття обладнання.

Стічні води підприємств молочної промисловості мають значний діапазон коливань концентрації забруднень, який обумовлюється не лише різноманітним асортиментом продукції, але й коливаннями виходу і забрудненості стоку протягом доби. Так, вміст жирів у стічних водах цехів, що випускають молокопродукти які мають високий вміст жиру (масло, вершки, сметана) складає 100 мг/л, в окремих випадках 200...300 мг/л [24].

Оскільки у стічних водах молокозаводів можуть міститись нерозчинені мінеральні домішки, перед подачею їх на біологічні очисні споруди необхідно влаштувати механічне очищення стоків [1, 15, 16].

Для вилучення із стоків жирів, що потрапляють при митті технологічного обладнання, влаштовують жировловлювачі. Для затримання піску, окалини та іншого бруду — пісковловлювачі та спеціальні решітки, а завислі речовини видаляються, застосовуючи первинні відстійники.

Велика кількість води використовується на підприємствах пиво безалкогольних виробництв. У виробництві пива більша частина води задіяна у виробництві напою, а інша — в процесах охолодження та санітарної обробки обладнання, внаслідок чого утворюється значний обсяг забруднених стічних вод з відповідними біологічними та хімічними показниками, наприклад, вміст фосфатів досягає 19 мг/дм³ включаючи відбракований продукт і воду для промивки обладнання. Також стічні води пивоварних заводів мають органічні включення (цукри, крохмаль, етанол, леткі жирні кислоти).

На хлібзаводах воду використовують у процесах для приготування тіста, підігрівання жирів, патоки, приготування заварки тощо. Використовують і водяну пару для кондиціювання повітря в розстійних шафах, зволоження печей і пекарних камер, сушки напівфабрикатів, тари та інших процесів з температурою теплоносія вище 100 °С.

Без попереднього очищення, в кількості (50%...65%) від споживаного об'єму води, можуть скидатися в каналізаційну мережу стічні води підприємств хлібопекарських виробництв, при цьому завислі речовини (ЗР) можуть становити 380 мг/дм³. Допускається сумісне очищення виробничих і господарських стічних вод за дотримання таких вимог: температура стоків — 30—60 °С; загальна концентрація розчинних солей — не більше 10 мг/дм³.

Стосовно використання вторинних енергетичних ресурсів, то перспективним напрямом є опалення тепличних господарств підприємства. Для теплиць можуть бути використані відхідні гази печей, сушарок та іншого технологічного обладнання, котельних агрегатів, в тому числі гаряча вода або пара. Гарячу воду, що має високу температуру, використовують у традиційних системах водяного опалення теплиць, низькотемпературну воду — в контактних апаратах для нагріву і зволоження повітря, що подається в теплицю [15].

Огляд останніх досліджень і публікацій. У вітчизняних і зарубіжних джерелах питання рекуперації тепла харчових виробництв, зокрема використання тепла стічних вод з метою зменшення витрат на отримання теплової енергії, досліджується досить активно. Розглядаються різні підходи рекуперації тепла стічних вод та обґрунтовується необхідність використання такої енергії. В табл. 1 наведено порівняльні дані категорій скинутих стічних вод за 2020 і 2021 роки згідно з узагальненими даними державного обліку водокористування у 2021 р. Міністерством захисту довкілля та природних ресурсів України [17].

Таблиця 1. Порівняльна характеристика скидів стічних вод

Обсяги скинутих стічних вод за категоріями	2020 р. млн м ³	2021 р. млн м ³
Усього	5159	4684,6
Забруднені	518	541,5
Без очищення	100	119,3
Недостатньо очищені	418	422,2
Нормативно очищені	1425	1430,2
Нормативно чисті без очистки	3216	2712,9

Комплексна оцінка потенціалу технології рекуперації тепла стічних вод харчової промисловості, проведена в дослідженні [5], представлена чотирихетапною структурою рекуперації відпрацьованого тепла разом з акцепторними потоками. Автори дослідження наполягають на системному підході з попередньої оцінки потенціалу системи рекуперації шляхом визначення точок генерування потоків відпрацьованого тепла і його виведення (акцепторів теплової енергії). Результати дослідження демонструють значний потенціал низькоякісної рекуперації відпрацьованого тепла, що забезпечує цілеспрямовану, ресурсозберігаючу економію енергії підприємства.

Ефективність системи рекуперації відпрацьованого тепла на пивоварнях доведено у дослідженні [6]. Автори визначили, що тепло втрачається в основному в котлі, трубі нагрівача технологічної води та димоході котла. Проведене в дослідженні математичне моделювання утилізації відпрацьованого тепла показало можливість отримання від рекуперації 17,5 кВт потужності, що може заощаджувати до 456 л палива на день.

У дослідженні [7] обґрунтовується також екологічний ефект від використання систем рекуперації стічних вод на харчових підприємствах. Наголошується, що багато країн зменшують повторне використання стічних вод через законодавче обмеження, проблеми з громадським здоров'ям і екологічною безпекою. В Україні згідно зі ст. 10 Закону України «Про водовідведення та очищення стічних вод» в 2018 р. затверджено «Порядок повторного використання очищених стічних вод та осаду стічних вод за умови дотримання нормативів гранично допустимих концентрацій забруднюючих речовин», але на практиці таке використання обмежене непридатною для споживання людиною лише технічною водою. Використання стічних вод з метою повернення відпрацьованої теплової енергії дасть змогу значно оптимізувати використання води в технологічних процесах харчової промисловості і знизити негативний вплив на екологію в аспекті рекуперації тепла стічних вод.

У комплексному дослідженні технології енергозбереження для обробки та виробництва харчових продуктів [8] стверджується, що лише 3% споживаної енергії у виробничому процесі рекуперується, що робить харчову промисловість привабливою з точки зору енергозаощадження, та свідчить про можливості невикористаних шляхів енергозбереження.

У статті [9] зазначається, що переробка молочних продуктів вимагає великої кількості енергії для охолодження пастеризації, із супутніми утвореннями великої кількості відходів, в тому числі і відпрацьованого тепла. Тому застосування інноваційних технологій енергозбереження у харчовій промисловості, таких як використання відпрацьованої теплової енергії з одного технологічного процесу, як придатної енергії для іншого процесу, а також виробництво енергії на місці зменшує витрати енергії і має велике економічне значення.

Для підігріву води та для гарячого водопостачання, опалення промислових, складських і офісних приміщень, підігріву рідин і газів, які використовуються для технологічних процесів, та для попереднього підігріву сировини можливе використання рекуператорів [11, 12]. Дослідження ефективності технологій рекуперації тепла на підприємствах є актуальним. Принцип роботи усіх систем рекуперації базується на акумуляції або передачі залишкового тепла, наприклад, від стічної води до систем попереднього нагріву холодної води, що надходить до бойлера, проточного нагрівача, тобто назад до системи теплопостачання.

Мета досліджень: огляд ефективних способів систем рекуперації тепла харчових підприємств.

Матеріали і методи. Недавні європейські норми та директиви щодо відновлювальних джерел енергії поступово розширюють зобов'язання використовувати системи рекуперації тепла.

Для вирішення поставлених завдань у процесі дослідження було використано такі методи: описовий, аналітичний і графічний. Теоретичною основою дослідження є праці провідних зарубіжних і вітчизняних вчених, присвячені питанням розробки і впровадженню систем рекуперації тепла на промислових підприємствах, що використовуються не в повній мірі.

Результати досліджень. Тривалий час технології рекуперації тепла стічних вод розвиваються швидкими темпами. Ще з 1980-х років централізовані системи в Німеччині, Швейцарії та скандинавських країнах використовують тепло стічних вод, яке збирається або в каналізаційних колекторах, або на очисних спорудах.

Існує кілька схем рекуперації тепла стічних вод. Найпростіша схема — «пряме» використання низькопотенційного теплоносія у теплообмінниках першого рівня підігріву гарячого водопостачання та припливного повітря. Такі схеми рекуперації не вимагають значних капіталовкладень і поточних витрат. Проте вказані схеми утилізації мають один істотний недолік: низький температурний напір, як правило, не більше 20 °С, що не дає змоги повністю вирішити питання теплопостачання систем гарячого водопостачання та вентиляції, а отже, необхідно встановлювати додаткові ступені підігріву.

В іншій схемі рекуперації тепла стічних вод використовується тепловий насос для підвищення корисного температурного тиску. Така схема більш енерговитратна, вимагає значних капіталовкладень і дає змогу досягти необхідного температурного рівня теплоносіїв (50—60 °С). Створення сприятливих у часі умов роботи теплового насоса можливе за наявності приймальних резервуарів каналізаційних насосних станцій з використанням їх як акумуляторів. Проте переважно в таких випадках отримана теплота використовується для теплопостачання самої насосної станції. Це не дозволяє максимально використовувати теплову енергію стоків (потрібні теплопостачання каналізаційних насосних станцій значно нижче ніж тепловий потенціал стічних вод). З іншого боку, у централізованих системах теплопостачання харчових підприємств тепло стоків частково втрачається у теплових мережах, тому для підприємств також важливо впровадження децентралізованих теплових мереж. У такому разі використання теплових насосів є досить перспективним [13].

Наприклад, особливістю використання тепла стічних вод житлових приміщень є випередження за часом споживання тепла щодо скидання стічних вод. Для вирішення цієї проблеми, а також для згладжування піків споживання гарячої води встановлюють акумулятор гарячої води (рис. 1).

З метою досягнення можливості одночасної рекуперації тепла від різних джерел (технологічне обладнання, вентиляційні системи, тощо) та забезпечення рівномірної роботи компресора теплового насоса доцільно встановити акумулятор тепла проміжного теплоносія.

Приведена схема має низку переваг. Встановлення бака акумулятора дає змогу згладити нерівномірності в часі споживання гарячої води та скидання в каналізацію. У випадку надлишкового тепла, яке надходить від конденсатора теплового насоса, над необхідною кількістю тепла для потреб гарячого водопостачання, циркуляційні насоси проміжного теплоносія видалять його повітрям з каналізаційними стоками.

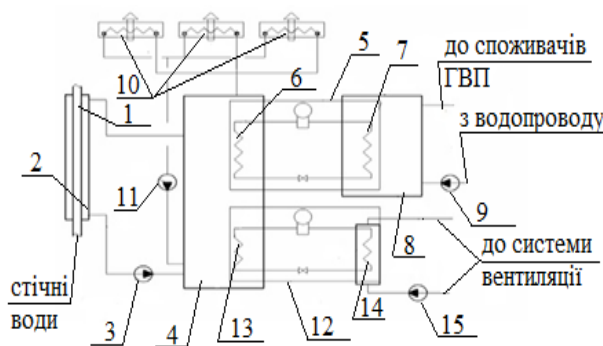


Рис. 1. Схема рекуперації тепла стічних вод [15]: 1 — каналізаційний колектор; 2 — теплообмінник «труба у трубі»; 3, 9, 10, 11 — циркуляційний насос проміжного теплоносія контуру каналізації; системи ГВП (гаряче водопостачання), теплопостачання контуру вентиляції, контуру витяжної вентиляції; 4, 8 — бак акумулятор проміжного теплоносія гарячої води; 5, 12 — тепловий насос системи ГВП контуру вентиляції; 6, 13 — випарник теплового насоса; 7, 14 — конденсатор теплового насоса

Також варто відзначити, що наведена схема має можливість підключення до бака-акумулятора інших джерел низькопотенційного тепла, що розширює можливості використання енергії для рекуперації.

Ще однією технологією рекуперації тепла стічних вод є використання теплообмінників. Теплообмінники забезпечують перенесення теплоти від носія з вищою температурою до носія з нижчою температурою без контакту чи змішування між ними. Існують різні теплообмінні технології, пристосовані до різних потреб (рис. 2): ротаційні, обребрені, пластинчасті та трубчасті теплообмінники.

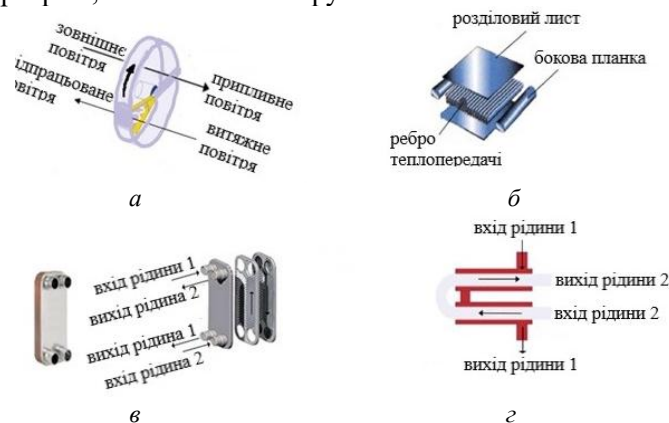


Рис. 2. Види теплообмінників [14]: а) ротаційний теплообмінник «повітря — повітря»; б) обребрений теплообмінник «повітря — повітря, повітря — рідина»; в) пластинчастий теплообмінник «рідина — рідина, газ — газ, газ — рідина»; г) трубчастий теплообмінник «рідина — рідина, газ — газ, газ — рідина»

Розглянемо більш детально кожний вид. Так, у ротаційному теплообміннику (рис. 2, а) обертовий контактний пристрій безперервно прорізає потоки гарячого і холодного середовищ, (найчастіше газів), які мають протилежно напрямлений рух. У таких теплообмінниках, що включають тонкі пластини з металевого або керамі-

чного матеріалу, контактний обертовий пристрій виконаний з пористою структурою.

За конструктивними ознаками використовують ротаційні генератори дискового (а) та барабанного (б) типу (рис. 3).

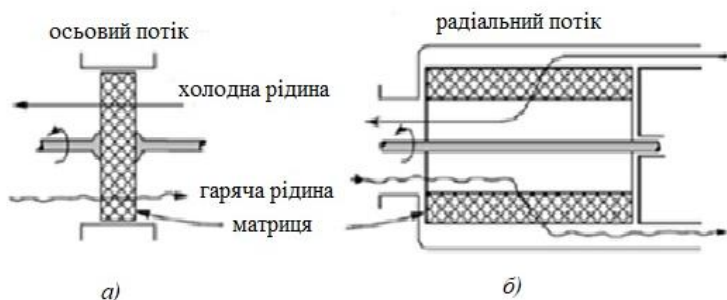


Рис. 3. Схема ротаційного дискового (а) та барабанного (б) регенеративного теплообмінника [25]

Найпростішою за формою конструкції теплообмінника є тип «труба в трубі» (рис. 4, а, б), де одне середовище протікає по внутрішній трубі, а в кільцевому зазорі між поверхнями двох труб рухається інше середовище. Поверхнею теплопередачі є стінка внутрішньої (меншої) труби. З метою зменшення габаритів і більшої компактності такі теплообмінники виготовляють секціями.

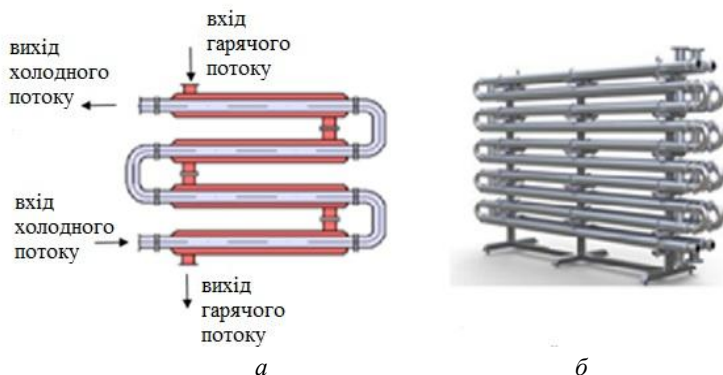


Рис. 4. Схема теплообмінника «Труба в трубі» [25]

Для забезпечення відносно великої питомої площі теплообміну використовують промисловий теплообмінник з великою кількістю секцій, (рис. 4, б), що дає змогу змінювати площу теплообміну до 47 м² та отримувати конструкцію модульного типу.

Пластинчасті теплообмінники (рис. 5) можуть застосовуватися для відбору тепла від стічних вод або інших рідких стоків, що утворюються виробничими процесами [15].

Основною перевагою пластинчастих теплообмінників є велика питома площа теплообміну за рахунок розподілення середовищ тонким шаром між пластинами, що дає змогу отримати більший у 2–4 рази коефіцієнт теплопередачі між середовищами порівняно з трубчастими теплообмінниками.

Використання теплообмінників для утилізації теплоти стічних вод має кілька переваг порівняно з тепловими насосами:

- не вимагає споживання електроенергії;

- має компактніший дизайн і нижчу вартість;
- може бути розміщений безпосередньо біля споживача, що дає змогу уникнути втрат тепла під час транспортування [16].

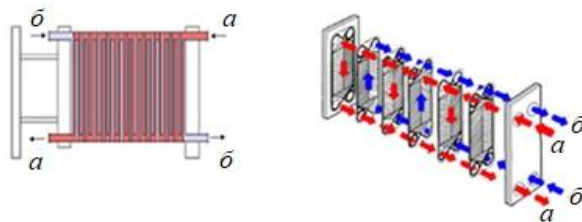


Рис. 5. Схема пластинчастого теплообмінника: потоки: а — гарячий теплоносіє; б — холодний теплоносіє

В окремих рекуператорах, зазвичай, вмонтована стандартна система очищення, за допомогою якої можна утилізувати і брудні стічні води. При спільному застосуванні теплового насоса і теплообмінника — рекуператора для нагріву води виникає необхідність 10% загального запасу енергії.

Гравітаційні пластинчасті теплообмінники працюють за принципом термосифону: гаряче середовище з низькою густиною піднімається вгору, а холодне середовище з високою густиною опускається вниз. Це сприяє створенню вільного теплового потоку між двома середовищами без використання додаткової енергії. Ефективною конструкцією теплообмінників для рекуперації теплоти стічних вод є пристрої у формі спіральних мідних котушок [23], які огортають мідний каналізаційний стояк (рис. 6, а, б).

Для рекуперації тепла стічних вод, побутових приміщень на підприємствах, може використовуватися два принципи: циліндричний блок рекуперації тепла (рис. 6, б) і піддон під душем (рис. 7). Схеми використовуються в країнах Європи, також вони набули популярності у світі. Такі рекуператори мають форму циліндра та виготовлені з міді.

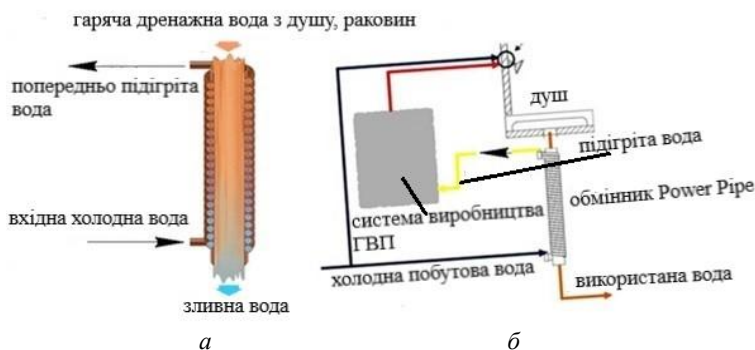


Рис. 6. Рекуперація тепла дренажної води (а) та схема циліндричного блоку рекуперації тепла (б) [23]

Конструктивно їх можна поділити на дві системи: перша — дві трубки є коцентричними, одна всередині іншої. Гаряча стічна вода проходить через внутрішню трубку, а чиста вода, яка буде нагріватися, проходить навколо першої труби. Максимальний діаметр трубки для стічної води становить 50 мм; Друга система — це котушка з трубки, яка намотана навколо прямолінійної труби. Діаметр труби стічної

води може становити 50, 75 або 100 мм. Ця система підходить для однієї або декількох душових кабін.

На рис. 7 представлена схема рекуперації тепла з використання піддону під душем. У таких випадках, як правило, теплообмінники є пластинчастими, недоліком є проблеми забруднення, для чого можуть використовуватися механізми їх очищення.

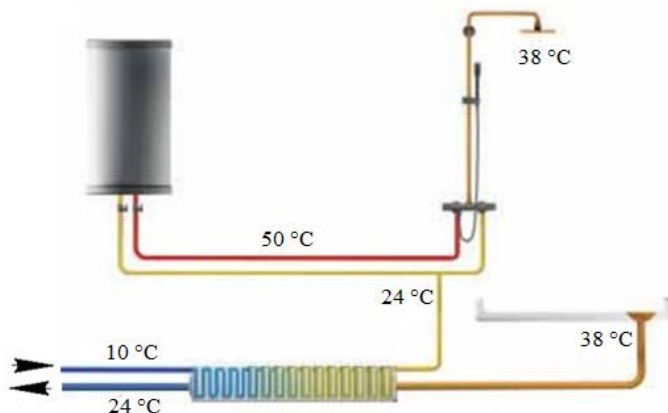


Рис. 7. Схема розташування плити рекуператора (піддону) тепла в душі [27]

Відома система утилізації тепла стічних вод фірми PKS — THERMPIPE (Німеччина) створена на базі теплопровідної системи FRANK PKS, в якій шляхом заміни звичайної каналізаційної труби тепло стічних вод можна використовувати для економного опалення або охолодження житлових і комерційних будівель [22]. Контур рекуператора занурений у розчин пропіленгліколю, а зсередини труби гладкі, що дає змогу стічним водам вільно рухатися по контуру. Така система утилізації тепла стічних вод виготовлена з поліетилену високої якості PE 100, який використовується також для водопостачання, питної води і газопостачання.

Як згадувалось вище, важливим фактором рекуперації стічних вод є якість самого використаного середовища. Параметри забруднення стічної води можуть створювати свої специфічні впливи на ефективність проведення процесу рекуперації тепла з таких середовищ.

У табл. 2 наведено характеристики забруднень стічних вод для підприємств молочної, пивобезалкогольної та хлібопекарської промисловості.

Залежності від місця відбору теплоти можна виділити три категорії використання енергії стічних вод: низькопотенційна теплота стічних вод, що отримується всередині приміщень технологічних ліній, теплота, відібрана в каналізаційних колекторах, що ведуть до очисних станцій, теплота, відібрана на очисних спорудах.

Показники стічних вод за 2020 р. [18] для середньостатистичного молокозаводу, пивзаводу, хлібзаводу наведені в табл. 3. Згідно з даними, годинні скиди стічних вод підприємства становлять для молокозаводу 0,711 м³, пивзаводу — 0,687 м³, хлібзаводу — 0,215 м³.

Кількісно оцінити процеси втрат теплової енергії можна за формулою (1) [26], що дає змогу визначити потужності теплового потоку початкової та кінцевої води стічних вод, кВт:

$$P = \frac{cM(t_2 - t_1)}{3600}, \quad (1)$$

де c — питома теплоємність води $c = 4,18 \frac{\text{кДж}}{\text{кг}\cdot^{\circ}\text{C}}$;
 M — годинна пропускна здатність, кг/год;
 t_1, t_2 — початкова та кінцева температура стічних вод, $^{\circ}\text{C}$;
 $t_1 - t_2 = \Delta t$ — перепад температур за рекуперації теплового потоку, $^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 2. Характеристика стічних вод підприємствами

Походження стічних вод	Показники забруднень, мг/дм ³	pH	Температура Стоків, $^{\circ}\text{C}$
Молокозавод	ХСК	3,6—10,4	16—33
	БСК		
	ЗР		
	Нітроген загальний.....		
	Флюор		
	Жири		
	Хлориди		
Пивзавод	ХСК	5—10,5	25—38
	БСК		
	ЗР		
	Нітроген амонійний		
	Фосфати		
	Жири		
Хлібозавод	ХСК	6,5	30—60
	БСК		
	ЗР		
	Азот амонійний		
	Фосфор		

Примітка. ХСК — хімічне споживання кисню; БСК — біологічне споживання кисню; ЗР — завислі речовини.

Таблиця 3. Показники стічних вод харчових підприємств

Показники		Молокозавод	Пивзавод	Хлібозавод
Сумарні річні скиди в поверхневі водні об’єкти зворотних (стічних) вод всього підприємствами, млн м ³		0,965	0,208	0,231
Кількість підприємств		157	35	124
Скиди стічних вод, всього для одного середньо-статистичного підприємства, м ³	в рік	6146	5943	1863
	в місяць	512,16	495,25	155,25
	за добу	17,072	16,508	5,175
	за годину	0,711	0,687	0,215

Визначення годинної пропускної здатності прийемо з урахування значень табл. 3. Оскільки скиди стічних вод подані в м³, то для переходу від об’ємної до вагової пропускної здатності прийемо 1 м³ = 1000 кг.

Максимальна потужність теплових потоків, яку можна отримати на підприємствах, становитиме на:
молокозаводі:

$$P_{\text{молоко}}^{\text{max}} = \frac{4,18 \cdot 711(33-16)}{3600} = 14,03 \text{ кВт} ;$$

пивзаводі:

$$P_{\text{пиво}}^{\text{max}} = \frac{4,18 \cdot 687(38-25)}{3600} = 10,369 \text{ кВт} ;$$

хлібозаводі:

$$P_{\text{хліб}}^{\text{max}} = \frac{4,18 \cdot 215(60-30)}{3600} = 7,489 \text{ кВт} .$$

Результати проведеного дослідження представлені діаграмою (рис. 8) залежності максимальної потужності теплових потоків від температури води в технологічних процесах різних підприємств.

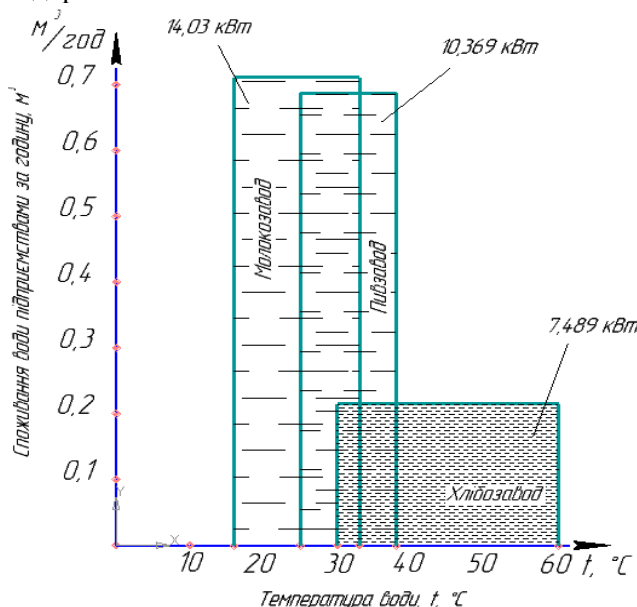


Рис. 8. Характеристики стічних вод та годинна максимальна потужність їх теплових потоків

Враховуючи вартість електроенергії за тарифами 2023 р. (5—6 грн за 1 кВт·год для підприємств, табл. 4), економія від рекуперації тепла становитиме:

$$E = P B_{\text{ел}}, \quad (2)$$

де P — потужність теплового потоку;

$B_{\text{ел}}$ — вартість електроенергії для підприємства.

Економія з максимальної потужності теплового потоку, наприклад, для молока, становитиме:

$$E_{\text{молоко}}^{\text{max}} = P_{\text{молоко}}^{\text{max}} B_{\text{ел}} = 14,03 \cdot 5 = 70,15 \text{ грн.}$$

У табл. 4 наведені економічні показники грошового еквіваленту максимальної потужності теплових потоків підприємств, а також рекуперативної потужності теплових потоків за перепаду температури $\Delta t = 5 ^\circ\text{C}$ та $\Delta t = 10 ^\circ\text{C}$.

Річна економія за цілодобової рекуперації тепла становитиме :

$$PE = 365 \cdot 24 E, \quad (3)$$

де 365 — кількість днів у році; 24 — кількість годин в добі.

Таблиця 4. Економічні показники низькопотенційної рекуперації тепла

Показники	Молокозавод	Пивзавод	Хлібозавод
Максимальна потужність (P^{max}) теплових потоків (за годину), кВт	14,03	10,369	7,489
Вартість електроенергії (B_{el}) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії (E^{max}) від рекуперації, грн.		
5	70,15	51,845	37,445
5,5	77,165	57,029	41,189
6	84,16	62,214	44,934
Рекуперативна потужність теплового потоку (за годину) при $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, кВт	8,25	7,97	2,49
Вартість електроенергії (B_{el}) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії ($E^{\Delta t 10\text{ }^{\circ}\text{C}}$) від рекуперації, грн.		
5	41,25	39,85	12,45
5,5	45,375	43,835	13,695
6	49,5	47,82	14,94
Рекуперативна потужність теплового потоку (за годину) при $\Delta t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$, кВт	4,127	3,988	1,248
Вартість електроенергії (B_{el}) 1 кВт·год, грн:	Грошовий еквівалент економії ($E^{\Delta t 5\text{ }^{\circ}\text{C}}$) від рекуперації, грн.		
5	20,635	19,994	6,24
5,5	22,698	21,93	6,864
6	24,762	23,928	7,488

Максимальна можлива річна економія рекуперації тепла стічних вод при для молокозаводу:

$$PE_{\text{молоко}}^{max} = 365 \cdot 24 E_{\text{молоко}}^{max} = 365 \cdot 24 \cdot 70,15 = 614514 \text{ грн.}$$

Річна економія рекуперації при $\Delta t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}$ для молокозаводу:

$$PE_{\text{молоко}}^{\Delta t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}} = 365 \cdot 24 \cdot E_{\text{молоко}}^{\Delta t = 5\text{ }^{\circ}\text{C}} = 365 \cdot 24 \cdot 20,635 = 180762,6 \text{ грн.}$$

Зменшення споживання енергії від традиційних джерел можливе за модернізації кожної окремої будівлі й технологічного устаткування, а також обмеження теплових втрат із застосуванням невичерпних відновлювальних альтернативних джерел енергії для виробництва теплоти на підігрівання води, опалення та вентиляцію приміщень тощо.

Аналіз використання різних технічних пристроїв і вирішення питань рекуперації тепла стоків води на харчових підприємствах свідчить про актуальність заходів до впровадження енергозбереження. Особливого значення такі роботи набувають нині, тому потребують досліджень у кожній галузі виробництва з впровадженням інноваційних і рекупераційних магістральних систем ще на етапі проектування підприємства.

З метою збільшення енергоефективності харчових підприємств використовуються різноманітні шляхи рекуперації енергії та їх технічне забезпечення, кожний з яких має свої переваги та недоліки. Важливим є і вплив самої конструкції рекуператора на ефективність використання стічних вод, а також значення показника коефіцієнта перетворення тепла, обумовленого зокрема характеристиками матеріалів, що використовуються в технічних рішеннях.

Висновки. Стан поведження з ефективним використанням рекуперації тепла стічних вод на підприємствах харчової промисловості свідчить про економічну доціль-

ність проведення заходів рекуперації тепла з використанням найбільш ефективних технологічних проєктів. Дослідження вказують, що річна економія енергії, наприклад, на молокозаводі може становити 180762,6 грн в рік за рекупераційного температурного перепаду 5 °C, а за пропорційного збільшення температурного перепаду стічних вод отримаємо пропорційне збільшення економії енергії. Не менш важливим є фактор відношення максимально можливої річної економії рекуперації тепла стічних вод до рекуперації при $\Delta t = 5$ °C, який для підприємств складає: молокозаводу — 3,4; пивзаводу — 2,6; хлібозаводу — 6,0.

З метою досягнення максимально можливого ефекту кожен окремий випадок повинен бути розглянутий індивідуально і базуватися на ретельному дослідженні існуючих джерел теплових втрат та їх поглинання з метою вивчення акцепторних теплових потоків і вибору відповідних технічних рішень для запобігання втратам та повторному використанню відповідних теплових потоків.

Для ефективної роботи систем рекуперації тепла важливо, щоб джерело відпрацьованого тепла й тепловідведення були розташовані поруч. Якщо вони надто віддалені один від одного, при плануванні слід враховувати втрати енергії при транспортуванні трубопроводами. Для окупності установки рекуперації тепла необхідно, щоб між джерелом тепла, що відходить, і тепловідведенням станції дотримувалося значення Δt не менше 5...10 °C.

Рекуперація тепла стічних вод особливо виправдовує себе при використанні в рамках виробничих процесів, що діють постійно, як у харчовій промисловості. Також система рекуперації тепла вигідна за низького рівня відпрацьованого тепла, але високого робочого навантаження, тобто рекуперація тепла тим вигідніша, чим довше обладнання знаходиться в роботі, наприклад, у броварнях, виробництві хліба, молочних продуктів і кондитерських виробів.

До перспектив подальших наукових розробок слід віднести дослідження комбінованих рекупераційних систем для харчових підприємств із застосуванням додаткового джерела теплової енергії, а також проєктування децентралізованих систем енергопостачання з повним циклом утилізації відпрацьованого тепла, пошуків шляхів ефективних акумуляторів тепла, використання енергоприводів у часи мінімальних пікових навантажень енергоспоживань.

Забезпечення рекуперації тепла на харчових підприємствах показує ефективність енергозбереження енергії та ресурсів, про що свідчить можливі показники економії.

Використання можливого рекупераційного потенціалу енергії на підприємствах дає змогу підвищити ефективність використання традиційних джерел енергії, забезпечити раціональне споживання ресурсів і зменшити вплив на екологію навколишнього середовища. Але через низьку впроваджуваність у виробництві існуючих технологій рекуперації на наших підприємствах заходи повернення тепла стічних вод мало поширені.

ЛІТЕРАТУРА

1. Шидловський, А. К. (2007). *Енергоефективність та відновлювальні джерела енергії*. К.: «Українські енциклопедичні знання»
2. Клименко, В. В., Кравченко, В. І., Телюта, Р. В. (2020). *Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках*: навч. посіб. Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем.
3. Бурдо, О. Г., Трішин, Ф. А., Яровий І. І. Бурдо, О. Г. *Енергетичний моніторинг харчових виробництв*. Електронний довідковий посібник, Одеса: ОНАХТ, Електронне видання. DOI: <https://card-file.ontu.edu.ua/bitstream/123456789/11792/1/776-A1.pdf>.
4. Степанець, О. І., Пригодій, Д. В., Ткачук Н. А. (2017). Динаміка і енергетична рекуперація в технологічних машинах. *Наукові праці НУХТ*, 23(5). <https://doi.org/10.24263/2225-2924-2017-23-5-2-5>.

5. Luo, Y., Jagtap, S., Trollman, H., Garcia-Garcia, G. (2023). A framework for recovering waste heat energy from food processing effluent. *Water*, 15(1), 12. <https://doi.org/10.3390/w15010012>.
6. Kebedel, A. Y., Hassen, A. A. (2020). Design and simulation of waste heat recovery system for heavy oil preheating in Dashen brewery company. Chapter № 3. https://doi.org/10.1007/978-3-030-43690-2_43.
7. Shrivastava, V., Ali, I., Marjub, M. M., Rene, E. R., Soto A. M. (2022). Wastewater in the food industry: Treatment technologies and reuse potential. *Chemosphere*, 293(4). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.133553>.
8. Vetriselvan, S., Shanmugaraj, G. (2020). Energy conservation techniques for food processing and manufacturing industries. *Researchgate*, 8. <https://www.researchgate.net/publication/342503636>.
9. Akama O. Energy use in food processing industry. A Research. *J. Food Technol. Pres.*, 6(7): 210—215. DOI: <https://www.alliedacademies.org/food-technology-and-preservation/>.
10. Соколенко, А. І., Васильківський, К. В., Степанець О. І. (2016). Рекуперація кінетичної енергії в технологічних машинах. *Харчова промисловість*, 20, 138—145. DOI: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Khp_2016_20_22.
11. Піддубний, В. А., Кравченко, М. Ф., Стадник, І. Я., Михайлик, В. С. (2022). Ефективність перерозподілу енергетичних ресурсів на підприємствах харчової промисловості системою повітряного теплонасоса. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-205-0-11>.
12. Клименко, В. В., Кравченко, В. І., Телюта, Р. В. (2020). *Енергозбереження в теплотехнологічних процесах та установках*: навч. посіб. Кропивницький: ПП Ексклюзив-Систем.
13. Denysova, A. E., Klymchuk, O. A., Ivanova, L. V., Zhaivoron, O. S. (2020). Energy efficiency of heat pumps heating systems at subsoil waters for south-east regions of Europe. *Problemele energeticii regionale*, 4(48), 78—89.
14. Титар, С. С., Климчук, А. А. (2011). Використання скидного тепла у системі автономного теплопостачання житлових будівель. Вісник Нац. техн. ун-та «ХПІ»: зб. наук. тр. темат. вип.: *Енергетичні та теплотехнічні процеси та обладнання*, 6, 121—125. <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/1146>.
15. Кьовенер, Д., Вільгельм, Б. (2021). *Міжгалузеві технології, здатні підвищити енергоефективність українських підприємств*. Проект «Консультавання підприємств щодо енергоефективності». GIZ. DOI: <https://saee.gov.ua/sites/default/files/blocks/2021-Cross-Cutting-Technologies-ukr.pdf>.
16. Кожушко, О. Д., Кізєєв, М. Д. (2017). Утилізація теплової енергії стічних вод та питної води в системах водопостачання і каналізації населених пунктів. *Сучасні технології та методи розрахунків у будівництві*, 7, 94—100. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/stmrb_2017_7_16.
17. Національна доповідь про стан навколишнього природного середовища в Україні у 2021 році. Режим доступу: <https://mepr.gov.ua/wp-content/uploads/2023/01/Natsdopovid-2021-n.pdf>.
18. Показники використання води за 2020 рік. Режим доступу: https://davr.gov.ua/fls18/st2019/KVED_2020.pdf.
19. Буляндра, О. Ф., Драганов Б. Х., Федорів, В. Г. та ін. (1998). *Теплотехніка*: навч. Посібник. Київ: Вища школа.
20. Босий, М. В. (2014). Перспективи застосування відновлювальних джерел енергії у системах теплопостачання. *Наукові записки*, 15, 89—92.
21. F. Schmid Sewage water: interesting heat source for heat pumps and chillers/ 9th International IEA Heat Pump Conference, 20—22 May 2008, Zürich, Switzerland.
22. Теплові насоси фірми Altermatica. Режим доступу: <https://altermetica.com.ua/>.
23. Zaloum C., Lafrance, M., Gusdor, J. (2007). Drain water recovery characterization and modeling. Sustainable Buildings and Communities. Natural Resources Canada, Ottawa. Url: http://www.gfxtechnology.com/NRCAN-6_29_07.pdf.
24. Гивлюд, А. М. (2014). Моніторинг забруднення стічних вод молокопереробних підприємств. Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування, 787, 301—305. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VNULPX_2014_787_59.
25. *Процеси і апарати харчових виробництв. Курсове проектування*: навч. посіб. / За ред. проф. І. Ф. Малєжика. К.: НУХТ, 2012.
26. *Технічна термодинаміка*: підруч. для студентів енерг. спец. вищ. навч. закладів. К.: Техніка, 2001.
27. Спеціалізована насосна компанія Tvist режим доступу: <https://euro-pump.com.ua>.