

ХОЛОДИЛЬНА ТЕХНІКА ТА ЕНЕРГОТЕХНОЛОГІЇ

УДК 620.91:621.36:621.1

Аналіз схемних рішень гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії

Д. М. Єрохін

Одеський національний технологічний університет, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна

✉ e-mail: erokhin-dima@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

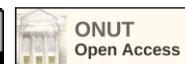
У статті розглянуто особливості побудови та функціонування гібридних систем теплопостачання на основі відновлюваних джерел енергії. Показано, що сучасні гібридні енергетичні системи інтегрують різні джерела енергії, зокрема сонячну, вітрову, а також резервні традиційні установки, що дозволяє забезпечити надійність енергопостачання та зменшити використання викопного палива. Обґрунтовано критерії вибору оптимальної конфігурації систем, які базуються на поєднанні економічної ефективності, екологічної доцільності, рівня технологічної зрілості та енергетичної ефективності. Проаналізовано сучасні підходи до побудови гібридних систем у житловому та промисловому секторах, зокрема комбінації теплових насосів, котлів, сонячних колекторів та систем акумулювання енергії. Встановлено, що ключовим елементом ефективного функціонування таких систем є автоматизоване керування, яке забезпечує оптимальний розподіл теплового навантаження залежно від зовнішніх умов та режимів роботи. Запропоновано схему гібридної системи теплопостачання для зерносушарки, яка поєднує сонячний повітряний колектор та тепловий насос із утилізацією теплоти відпрацьованого повітря. Описано принцип роботи системи, що передбачає попередній нагрів повітря за рахунок сонячної енергії та його подальший догрів у тепловому насосі з використанням вторинних енергоресурсів. Встановлено, що застосування рециркуляції повітря та рекуперації теплоти дозволяє суттєво підвищити енергоефективність процесу сушіння. Стверджується, що запропонована система забезпечує зниження енергоспоживання на 30-50 %, підвищення коефіцієнта корисної дії та зменшення викидів парникових газів. Отримані результати підтверджують доцільність впровадження гібридних систем теплопостачання у технологічні процеси сушіння зерна та інших енергоємних виробництв.

Ключові слова: Енергоефективність; Тепловий насос; Сонячний колектор; Регенерація тепла; Зерносушарка

doi: <https://doi.org/10.15673/ret.v62i1.3389>

© The Author(s) 2026. This article is an open access publication

This work is licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY)

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

1. Вступ

Гібридні системи теплопостачання розглядаються як важливий етап переходу до повністю відновлюваної енергетики. Їх концепція ґрунтується на поєднанні традиційних теплогенеруючих установок із технологіями, що використовують відновлювані джерела енергії. Такий підхід дозволяє одночасно забезпечити економічну ефективність,

характерну для традиційних котлів, та екологічні переваги, властиві тепловим насосам і системам на основі відновлюваних енергетичних ресурсів.

Застосування гібридних систем теплопостачання має низку суттєвих переваг. По-перше, вони дозволяють зменшити експлуатаційні витрати завдяки використанню найбільш економічно вигідного джерела енергії в конкретний момент часу. По-друге, гібридні системи підвищують рівень

енергетичної незалежності, зменшуючи залежність від одного виду палива або енергоресурсу. Крім того, вони характеризуються високою гнучкістю функціонування, оскільки здатні адаптуватися до змін тарифної політики, погодних умов та режимів споживання теплової енергії. Важливою перевагою є також підвищення екологічності теплопостачання за рахунок часткового використання відновлюваних джерел енергії.

Додатковою перевагою гібридних систем є можливість резервування джерел теплової енергії. У разі відмови або аварійного відключення одного з компонентів інше джерело здатне забезпечити безперервність теплопостачання, що підвищує надійність і стабільність функціонування системи.

Водночас розроблення та впровадження гібридної системи теплопостачання не зводиться лише до встановлення кількох теплогенеруючих установок. Це складний інженерний процес, який потребує комплексного підходу та інтеграції знань у галузях теплотехніки, автоматизованих систем керування, енергоменеджменту та техніко-економічного аналізу. Лише за умови належного проектування та оптимізації параметрів роботи можливо забезпечити ефективне функціонування таких систем та реалізувати їх потенціал у сфері підвищення енергоефективності й розвитку відновлюваної енергетики.

Метою статті є аналіз існуючих гібридних систем теплопостачання з використанням нетрадиційних джерел енергії та гібридних систем рекуперації енергії, що застосовуються в промисловому та житловому секторах, з подальшою розробкою схеми гібридної системи теплопостачання для зерносушарки на основі відновлюваних джерел енергії.

2. Аналітичний огляд наукових праць. Існуючі схеми гібридних систем теплопостачання

Гібридна енергетична система інтегрує низку компонентів відновлюваних ресурсів, таких як сонячна, вітрова, дизель-генератор, інвертори та акумулятори. Критерії вибору найкращої комбінації компонентів гібридної енергії для запропонованого місця базуються на компромісі між вартістю, сталим розвитком, зрілістю технологій, ефективністю та мінімальним використанням дизельного палива.

Запропонована схема модернізації неефектив-

ної секції централізованого теплопостачання [1]. Відповідно до світових побоювань щодо збільшення викидів парникових газів, промисловий ринок має тенденцію переходити до більш екологічних методів для дотримання суворих стандартів викидів. Однак майбутнє виробництво енергії буде залежати виключно від відновлюваних джерел енергії через швидке скорочення традиційних джерел енергії. Більше того, багато дослідників ігнорують недоліки відновлюваних джерел енергії (HRS), і вони не здатні усунути потребу в традиційних джерелах енергії [2]. Стверджується, що вдосконалення повинно працювати над досягненням вищої ефективності двигуна, тривалішого терміну служби, дешевшого обслуговування та кращих екологічних систем. Крім того, відчутна теплота димових газів та температура подачі є основними граничними умовами, які необхідно визначати в більшості досліджень теплових насосів. Критичний аналіз гібридних енергетичних систем та рекомендації надані в роботі [2]. Показовим прикладом гібридної системи теплопостачання є система, що поєднує тепловий насос та газовий котел. У такій конфігурації тепловий насос забезпечує основне теплове навантаження за температури зовнішнього повітря приблизно до +5 °C, тоді як при зниженні температури до -15 °C до роботи автоматично підключається газовий котел. При цьому система керування враховує економічні фактори, зокрема енергетичні тарифи, а також технічні параметри обладнання, зокрема коефіцієнт корисної дії. Найпоширенішими комбінаціями джерел тепла в гібридних системах є поєднання теплового насоса з газовим або електричним котлом, використання сонячних колекторів у поєднанні з котельними установками, а також комбінації пелетних і газових котлів. У системах централізованого теплопостачання часто застосовується поєднання центрального джерела тепла з локальним резервним обладнанням. Важливою характеристикою таких систем є наявність автоматизованої логіки вибору джерела теплової енергії, що забезпечує оптимальний розподіл навантаження між компонентами системи.

Гібридна система, яка складається з теплового насоса та газового котла, наведена на рис. 1 [3]. Тепловий насос ефективно використовує низькопотенційну енергію повітря, води або ґрунту. Найкраще підходить для низькотемпературного опалення, такого як системи теплої підлоги. Газовий котел забезпечує надійну високотемпературну

продуктивність, вмикаючись, коли попит досягає пікового рівня або під час сильних холодів. Гібридна система опалення об'єднує два або більше теплогенераторів, що використовують різні джерела енергії, всі вони керуються спільним блоком керування.

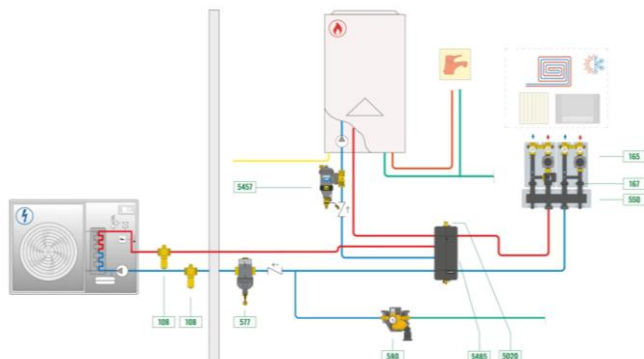


Рисунок 1 – Гібридні системи опалення [3]

Система складається з первинного контуру, який включає конденсаційний котел, моноблочний тепловий насос, інерційний акумулятор з функцією гідравлічного роздільника, пристрої захисту від замерзання для захисту моноблочного теплового насоса, пристрої очищення води (брудовий сепаратор) для захисту генераторів та, загалом, усіх компонентів системи, зарядний блок системи з редуційним клапаном та запобіжником зворотного потоку. Котел і тепловий насос підключені паралельно до теплового акумулятивного бака з підключеннями з боку первинного контуру. Два генератори можуть працювати по черзі або одночасно; акумулятивний бак також функціонує як гідравлічний роздільник і робить два контури незалежними. Вторинний контур складається з колектору центрального блоку, блоку прямого підсилення, моторизований регулювальний та підсилюючий блок. Миттєве виробництво гарячої води спрощує конфігурацію системи, але його слід оцінювати відповідно до конкретних потреб. Це рішення має кілька переваг: не потрібен простір для акумулятивного бака гарячої води, якщо прийняти обмеження на кількість користувачів. Не створюються умови, за яких розвиваються бактерії *Legionella*: вода нагрівається лише під час використання, і це позбавляє необхідності термічної дезінфекції розподільчої мережі.

Гібридна система на основі повітряно-водяного теплового насоса та котла на біомасі наведена на рис. 2 з різними конфігураціями систем опалення [4]. Досліджувані гібридні системи базуються на тепловому насосі повітря-вода, а котел

на біомасі розглядається як резервний пристрій. Цей тип гібридної установки спеціально розроблений для ізольованих будинків, де дуже ймовірно, що немає підключення до мережі та доступу до газорозподільних мереж. У таких випадках виробництво електроенергії для живлення ефективного теплового насоса може частково підтримуватися фотоелектричними (PV) системами, доповненими місцевими ресурсами біомаси, які не обов'язково мають бути гранульованими.

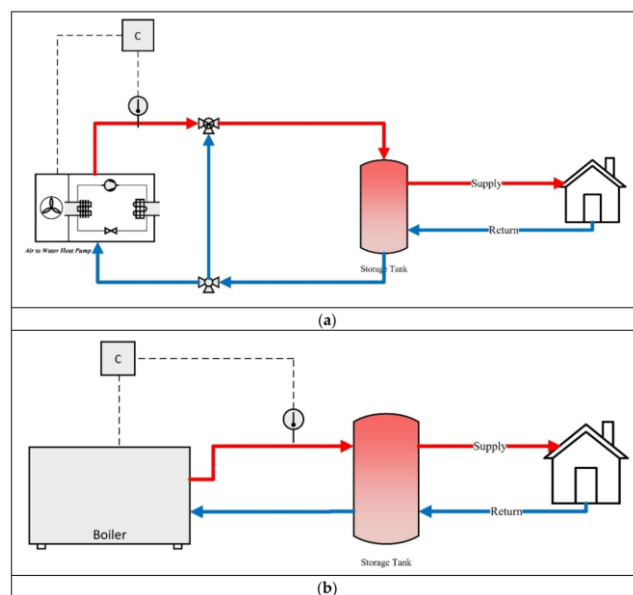


Рисунок 2 – Гібридна система на основі повітряно-водяного теплового насоса (а) та котла на біомасі (б)

У цих конфігураціях система опалення складається виключно на один генератор тепла, а саме на тепловий насос типу «повітря-вода». У цьому сценарії генератор розрахований на задоволення пікового навантаження будівлі на опалення. Отже, потреби будівлі в енергії задовольняються протягом усього зимового сезону. Іншим варіантом є використання котла на біомасі для системи опалення взимку, що показано на рис. 2б. У цій конфігурації тепловий насос використовується лише для потреб охолодження.

Креативні рішення в вигляді комбінації традиційних котлів та електричних систем для опалення будинку допомагають заощадити на експлуатаційних витратах, маючи повністю автономну систему (рис. 3). Піролізний котел та електрика наближають рівень комфортного опалення до газового опалення за принципово меншими витратами. Піролізний котел допомагає досягти економії в 5 разів [5]; електричний котел підтримувати-

ме мінімальну температуру вдома.

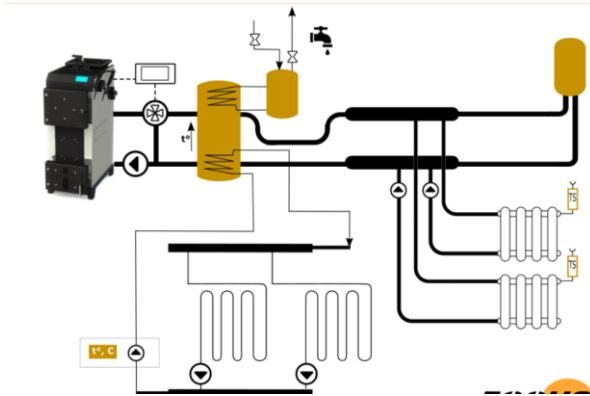


Рисунок 3 – Гібридне опалення як комбінація традиційних котлів та електричних систем [5]

Додавання електричного опалення створює гібридну систему опалення, яка може працювати в різних режимах залежно від потреб та умов. Наприклад, електричне опалення може використовуватися як додаткове джерело тепла в періоди надзвичайно холодної погоди або для підтримки комфортної температури в окремих кімнатах та міжсезоння, коли основний котел не працює. Електричне опалення зазвичай легко контролюється та керується за допомогою термостатів та систем автоматичного керування, що забезпечує точний контроль температури та економію енергії та служить як резервне джерело.

Гібридна система з пелетами та технологією газової конденсації наведена в роботі [6]. Котел з газовою конденсацією працює з високим ККД (часто 95% та вище), використовуючи тепло від конденсації водяної пари – це значно дешевше, ніж класичне спалювання газу. Пелетний котел дозволяє замінювати частину газу біопаливом (пелетами) – часто дешевшим і частково незалежним від коливань цін на газ. Система може автоматично переключатися між джерелами енергії залежно від доступності, ціни і потреб у теплі. У пікові моменти можна використовувати пелети, а решту часу – газову конденсацію для оптимальної вартості опалення. При перебоях з постачанням газу пелети забезпечують резервне джерело тепла, що важливо для холодних періодів.

Гібридна система кондиціонування повітря, що складається з осушувального колеса, теплообмінника, геотермальної циркуляції, циклу паро-стиснення, сонячного повітряного колектора та допоміжного нагрівача, наведена на рис. 4 [7]. Навколишнє повітря використовується для підготовки потоку технологічного повітря та потоку

регенераційного повітря. Осушувальне колесо використовується спочатку для осушення технологічного повітря (1). Після того, як технологічне повітря осушується в осушувальному колесі (2), воно попередньо охолоджується, пропускаючи його через теплообмінник (3), а потім через геотермальну циркуляцію (4). Після цього попередньо охолоджене повітря (4) охолоджується, проходячи через охолоджувальний змійовик.

Процес охолодження осушувачем має два потоки повітря: технологічний (точки 1-R) та регенераційний (точки 5-8). Коли температура сонячного повітряного колектора нижча за температуру осушення, вмикається допоміжний нагрівач. Навколишнє повітря використовується для підготовки потоку технологічного повітря та потоку регенераційного повітря. Осушувальне колесо використовується спочатку для осушення технологічного повітря (1). Після того, як технологічне повітря осушується в осушувальному колесі (2), воно попередньо охолоджується, пропускаючи його через теплообмінник (3), а потім через геотермальну циркуляцію (4). Після цього попередньо охолоджене повітря (4) охолоджується, проходячи через охолоджувальний змійовик.

Гібридні системи кондиціонування повітря можуть забезпечити значну економію енергії та скорочення викидів порівняно зі звичайними системами кондиціонування повітря. Гібридна система є ефективнішою, ніж система парокомпресійного охолодження. Гібридна система зменшує навантаження охолоджувального змійовика приблизно на 48% в порівнянні з системою парокомпресійного охолодження.

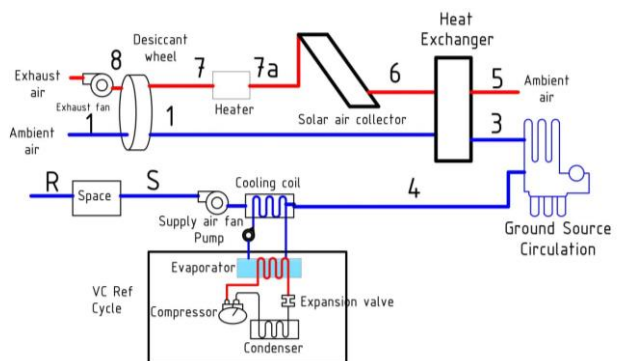


Рисунок 4 – Гібридна система кондиціонування повітря з колесом-адсорбційним теплообмінником та циркуляцією геотермального повітря [7]

Тепловий фотоелектричний гібридний сонячний колектор (ТФГСК), що поєднує виробництво сонячної фотоелектричної електроенергії та соняч-

ного тепла в одній інтегрованій панелі представлений в роботі [8]. Замість встановлення окремих сонячних панелей та сонячних теплових колекторів, система виконує обидві ці функції одночасно. Його застосування в житлових, комерційних і громадських будівлях є технічно та економічно виправданим та може слугувати джерелом попереднього нагріву для теплового насоса. Як стверджується в [8], гібридні сонячні колектори, що поєднують функції генерації теплової та електричної енергії, є одним із найперспективніших рішень для підвищення ефективності енергетичних систем. Дослідження [9] підкреслюють перспективність розвитку гібридних сонячних колекторів як однієї з провідних технологій у сфері відновлюваної енергетики в контексті глобальних викликів зі зміною клімату. Схема теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора наведена на рис. 5.

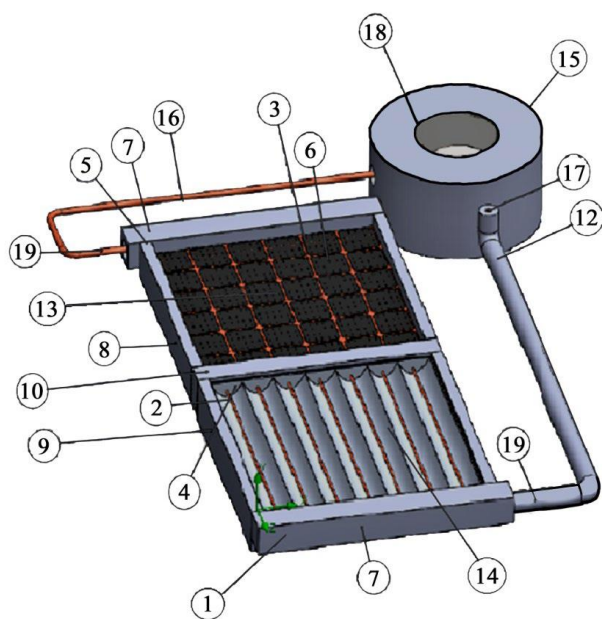


Рисунок 5 – Схема теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора [9]: 1 – ТФГСК; 2 – трубка-концентратор; 3 – зазори (відстань між сонячними елементами); 4 – концентратор; 5 – гребінець; 6 – сонячний елемент; 7 – гребінчастий нагрівач; 8 – ізоляція термофотоелектричної частини; 9 – ізоляція відбивача (концентратора); 10 – ізоляція адаптера; 12 – ізоляція вихідної труби; 13 – термофотоелектрична частина ТФГСК; 14 – тепла частина з концентраторами ТФГСК; 15 – бак; 16 – вхідна труба; 17 – вихідна труба; 18, 19 – місця для кріплення датчиків температури

Використання теплового фотоелектричного гібридного сонячного колектора має низьку перевагу: дозволяє ефективно використовувати площу даху, дає можливість отримання двох видів енергії з одного модуля, характеризується кращою електричною продуктивністю через охолодження. Основний принцип роботи складається в наступному: сонячне випромінювання проходить через захисне скло; фотоелектричні елементи (PV-комірки) генерують постійний струм; інвертор перетворює постійний струм у змінний струм для використання в будинку або подачі в мережу. Загальна (комбінована) ефективність досягає 70-80%.

3. Розробка гібридної системи теплопостачання для зерносушарки на основі відновлюваних джерел енергії

Робота зерносушарки з гібридною системою теплопостачання, що поєднує тепловий насос і сонячний повітряний підігрівач, ґрунтується на використанні відновлюваних джерел енергії та утилізації тепла відпрацьованого повітря (рис. 6). Такий підхід дозволяє підвищити енергоефективність процесу сушіння зерна, зменшити витрати енергії та забезпечити більш стабільні технологічні умови сушіння.

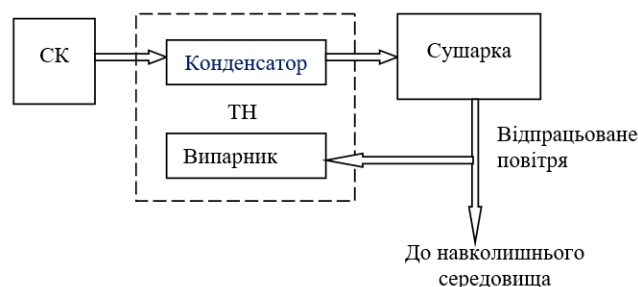


Рисунок 6 – Схема зерносушарки з гібридною системою теплопостачання: СК – сонячний колектор; ТН – тепловий насос

Процес роботи зерносушарки починається з подачі атмосферного повітря до сонячного повітряного підігрівача. У цьому пристрої повітря нагрівається під дією сонячної радіації. Сонячний колектор перетворює енергію сонячного випромінювання на теплову, внаслідок чого повітря, проходячи через канал колектора, підвищує свою температуру. Залежно від інтенсивності сонячного випромінювання та конструкції колектора температура повітря може підвищуватися до 30-60 °С. Таким чином відбувається попередній нагрів су-

сушильного агента, що зменшує потребу в додаткових джерелах тепла.

Після попереднього нагріву повітря надходить до системи теплового насоса, а саме до його конденсатора. Тепловий насос працює за замкненим холодильним циклом, у якому циркулює холодоагент. У випарнику теплового насоса відбувається відбір теплоти з вологого відпрацьованого повітря, яке виходить із сушильної камери. Холодоагент, що має низьку температуру і тиск, поглинає це тепло та переходить у пароподібний стан. Далі пари холодоагенту надходять у компресор, де вони стискаються, унаслідок чого значно підвищуються їх температура і тиск.

Нагрітий холодоагент потрапляє до конденсатора, де віддає накопичене тепло повітрю, що використовується як сушильний агент. У результаті цього повітря додатково нагрівається і досягає температури, необхідної для процесу сушіння зерна. Після віддачі тепла холодоагент конденсується і через дросельний клапан знову надходить у випарник, де цикл повторюється.

Нагріте повітря за допомогою вентилятора подається в сушильну камеру. Проходячи крізь шар зерна, воно передає йому теплоту та спричиняє випаровування вологи з поверхні і внутрішніх шарів зернівок. Унаслідок цього вологість зерна поступово зменшується до необхідного рівня, що забезпечує його безпечне зберігання. Температура сушильного повітря, як правило, підтримується в межах 40–65 °С, що дозволяє уникнути перегріву зерна та зберегти його якість.

Після проходження через шар зерна повітря насичується вологою і частково охолоджується. Відпрацьоване повітря, що виходить із сушильної камери, розділяється на кілька потоків. Одна його частина викидається в атмосферу для видалення надлишкової вологи. Друга частина спрямовується до випарника теплового насоса, де відбувається відбір залишкової теплоти. У цьому процесі повітря охолоджується, а отримана теплова енергія передається холодоагенту та надалі використовується для нагріву сушильного агента в конденсаторі.

Крім того, частина відпрацьованого повітря може повертатися в систему у вигляді рециркуляційного потоку. Рециркуляційне повітря змішується зі свіжим повітрям, повторно нагрівається в конденсаторі теплового насоса і знову подається в сушильну камеру. Такий підхід дозволяє зменшити теплові втрати та підвищити енергоефектив-

ність сушарки.

Таким чином, у гібридній зерносушарці відбувається поєднання двох джерел тепла: сонячної енергії та теплового насоса. Сонячний повітряний підігрівач забезпечує попередній нагрів повітря за рахунок безкоштовної відновлюваної енергії, тоді як тепловий насос підвищує температуру сушильного агента до необхідного рівня та одночасно утилізує тепло відпрацьованого повітря. Завдяки цьому значно зменшуються енергетичні витрати на сушіння зерна, підвищується коефіцієнт корисної дії системи та забезпечується екологічно безпечніший процес сушіння.

Для гібридної зерносушарки з тепловим насосом та сонячним повітряним підігрівачем холодоагент слід обирати з урахуванням температурного режиму сушіння, енергоефективності, екологічних вимог і безпеки. У такій системі зазвичай потрібна температура нагріву повітря 50–80 °С, тому холодоагент має ефективно працювати у середньо- та високотемпературних теплових насосах.

В день, коли сонячна радіація висока, сонячний колектор нагріває повітря, а тепловий насос лише допідігріває. Це забезпечує мінімальне споживання електроенергії. В нічний час або при похмурій погоді основним джерелом тепла для підігріву повітря є тепловий насос. Можливість використання відпрацьованого після сушарки повітря забезпечує підвищення енергоефективності гібридної сушарки.

Орієнтовні параметри зерносушарки з гібридною системою теплопостачання наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Параметри зерносушарки з гібридною системою теплопостачання

Параметр	Значення
Температура повітря після колектора	30–60 °С
Температура сушіння	40–70 °С
COP теплового насоса	3–4
Рециркуляція повітря	30–60 %
Економія енергії	30–50 %

Переваги розробленої гібридної зерносушарки полягають в наступному: зменшення витрат палива, використання відновлюваної енергії, утилізація тепла відпрацьованого повітря, нижча температура сушіння, що дозволяє отримати зерно кращої якості та також використовувати зерносушарку для насіннєвого зерна; зменшення викидів CO₂ та інших трьохатомних газів.

4. Висновки

Гібридні системи теплопостачання є ефективним рішенням для підвищення енергоефективності та зниження екологічного навантаження за рахунок поєднання відновлюваних і традиційних джерел енергії.

Вибір оптимальної конфігурації системи повинен базуватися на комплексному врахуванні економічних, технічних та експлуатаційних факторів, зокрема вартості енергії, ефективності обладнання та умов експлуатації.

Найбільш доцільним на сучасному етапі є використання гібридних рішень із резервними джерелами енергії, що компенсують нестабільність відновлюваних ресурсів.

Ефективність функціонування гібридних систем значною мірою залежить від застосування автоматизованих систем керування та раціонального розподілу теплового навантаження між джерелами.

Перспективи розвитку пов'язані з удосконаленням схемних рішень, впровадженням комбінованих технологій (зокрема гібридних сонячних колекторів) та підвищенням рівня енергонезалежності і екологічності систем.

Розроблена гібридна зерносушарка, робота якої базується на використанні комбінованого теплопостачання, що включає сонячний повітряний підігрівач та тепловий насос. Такий підхід дозволяє реалізувати енергоефективний процес сушіння за рахунок використання відновлюваних джерел енергії та утилізації теплоти відпрацьованого повітря.

Література

1. **C.-M. Dumitru et al.** Optimizing the development process of a hybrid energy supply system based on renewable sources using the LEAN Methodology // 7th International Conference on Smart Energy Sys-

tems 21-22 September 2021. Smart Energy Systems – international conference.

2. **O. Farhat et al.** A short recent review on hybrid energy systems: Critical analysis and recommendations // Energy Reports. – 2022. – Vol. 8. – P. 792-802. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.091>

3. A hybrid heating system consisting of a heat pump and a gas boiler. URL: <https://www.linkedin.com/pulse/r290-101-hybrid-heating-system-consisting-7roae> (дата звернення 15.01.2026)

4. **Uche J., Tajik Jamalabad M., Martínez A.** Configurational Design of a Hybrid System Based on an Air–Water Heat Pump and Biomass Boiler for a Rural Dwelling // Applied Sciences. – 2024. – Vol. 14, No. 21. – P. 9840. <https://doi.org/10.3390/app14219840>

5. Pyrolysis boiler and electricity for heating » FireBox – Solid fuel pellet boilers, pellet burners, industrial. URL: <https://firebox.com.ua/en/piroliznyj-kotel-i-jelektrichestvo-dlya-obogreva/> (дата звернення 15.01.2026)

6. Sustainable heating: save money and protect the climate with a hybrid system. Technologically superior indoor climate control solutions. URL: <https://www.hoval.com/en/blog/nachhaltig-heizen-mit-hybridssystem> (дата звернення 15.01.2026)

7. **S. El-hetamy et al.** Thermal Analysis of a Hybrid Air Conditioning System with Geothermal Energy // Journal of Engineering Research. – 2021. – Vol. 5, No. 2. – P. 1-9.

8. **S. P. Shapoval et al.** Modelling of thermal processes in a hybrid solar collector // Modern construction and architecture. – 2024. – Vol. 10. – P. 126-133. <https://doi.org/10.31650/2786-6696-2024-10-126-133>.

9. **Mysak S., Shapoval S.** Analysis of the energy efficiency of a system with a hybrid solar collector and thermal energy storage // Industrial and technology systems. – 2024. – Vol. 2, No. 1(76). – P. 51-56. <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.301779>.

Отримана в редакції 11.02.2026, прийнята до друку 03.03.2026

Analysis of a schematic solutions of hybrid heat supply systems based on renewable energy sources

Dmytro Yerokhin

Odesa National University of Technology, 112 Kanatnaya Str., Odessa, 65039, Ukraine;

✉ e-mail: erokhin-dima@ukr.net

ORCID: <http://orcid.org/0009-0001-7302-8245>

The article examines the features of the design and operation of hybrid heat supply systems based on renewable energy sources. It is shown that modern hybrid energy systems integrate various energy sources, including solar and wind energy, as well as backup conventional units, which ensures the reliability of energy supply and reduces the use of fossil fuels. The criteria for selecting the optimal system configuration are substantiated, based on a combination of economic efficiency, environmental feasibility, technological maturity, and energy efficiency. Modern approaches to the design of hybrid systems in residential and industrial sectors are analyzed, in particular combinations of heat pumps, boilers, solar collectors, and energy storage systems. It is established that a key element of the efficient operation of such systems is automated control, which ensures the optimal distribution of thermal load depending on external conditions and operating modes. A scheme of a hybrid heat supply system for a grain dryer is proposed, combining a solar air collector and a heat pump with the utilization of exhaust air heat. The operating principle of the system is described, which involves preliminary air heating by solar energy and its further heating in a heat pump using secondary energy resources. It is established that the use of air recirculation and heat recovery significantly increases the energy efficiency of the drying process. It is stated that the proposed system provides a reduction in energy consumption by 30-50 %, an increase in efficiency, and a decrease in greenhouse gas emissions. The obtained results confirm the feasibility of implementing hybrid heat supply systems in grain drying processes and other energy-intensive industries.

Keywords: Energy efficiency; Heat pump; Solar collector; Heat recovery; Grain dryer

References

1. Dumitru, C.-M., Pătrașcu R., Ionescu, C., Sanduo, M.-R. (2021). Optimizing the development process of a hybrid energy supply system based on renewable sources using the LEAN Methodology. *7th International Conference on Smart Energy Systems 21-22 September 2021. Smart Energy Systems – international conference.*
2. Farhat, O., Khaled, M., Faraj, J., Hachem, F., Taher, R., & Castelain, C. (2022). A short recent review on hybrid energy systems: Critical analysis and recommendations. *Energy Reports*, 8, 792-802.
3. A hybrid heating system consisting of a heat pump and a gas boiler. Retrieved 15 January 2026 from <https://www.linkedin.com/pulse/r290-101-hybrid-heating-system-consisting-7roae>
4. Uche, J., Tajik Jamalabad, M., & Martínez, A. (2024). Configurational Design of a Hybrid System Based on an Air-Water Heat Pump and Biomass Boiler for a Rural Dwelling. *Applied Sciences*, 14(21), 9840.
5. Pyrolysis boiler and electricity for heating. FireBox – Solid fuel pellet boilers, pellet burners, industrial. Retrieved 15 January 2026 from <https://firebox.com.ua/en/piroliznyj-kotel-i-jelektrichestvo-dlya-obogreva/>
6. Sustainable heating: save money and protect the climate with a hybrid system. Hoval Corporate. Technologically superior indoor climate control solutions. Retrieved 15 January 2026 from <https://www.hoval.com/en/blog/nachhaltig-heizen-mit-hybridssystem>
7. El-hetamy, S., Khalil, A., El-Agouz, S., & Samadony, M. (2021). Thermal Analysis of a Hybrid Air Conditioning System with Geothermal Energy. *Journal of Engineering Research*, 5, 2, 1-9.
8. Shapoval, S. P., Pryshliak, Y. V., Ivashchyshyn, F. O., & Bundzylo, V. P. (2024). Modelling of thermal processes in a hybrid solar collector. *Modern construction and architecture*, (10), 126-133.
9. Mysak, S., Shapoval, S. (2024). Analysis of the energy efficiency of a system with a hybrid solar collector and thermal energy storage. *Technology Audit and Production Reserves*, 2 (1 (76)), 51-56.

Received 11 February 2026

Approved 03 March 2026

Available in Internet 31 March 2026