

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ



ЛУЦЬКИЙ
НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ
УНІВЕРСИТЕТ

ТЕПЛО-, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА РЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО

Конспект лекцій
для здобувачів першого бакалаврського рівня
освітньої програми «Харчові технології»
галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G13 Харчові технології
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 664 (07)
Т55

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозиторій ЛНТУ
Директор бібліотеки _____ Н.П. Поліщук

Рекомендовано до видання вченою радою факультету митної справи, матеріалів та технологій ЛНТУ, протокол № _____ від _____ 2026 року.
Голова вченої ради факультету митної справи, матеріалів та технологій _____ В.В. Ткачук

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ, протокол № _____ від _____ 2026 року.
Завідувач кафедри харчових технологій та хімії _____ І.М. Дударев

Укладач: _____ Тараймович І.В., кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ
Рецензент: _____ Панасюк С.Г., к.т.н., кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Відповідальний за випуск: _____ Дударев І.М., доктор технічних наук, професор кафедри харчових технологій та хімії ЛНТУ

Т 55

Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво [Текст]: Конспект лекцій для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти освітньої програми «Харчові технології» галузь знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності G13 Харчові технології денної та заочної форм навчання/ уклад. І.В. Тараймович. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 110 с.

Конспект лекцій сформовано відповідно до робочої програми курсу «Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво». Видання містить теоретичний матеріал до вивчення дисципліни.

© І. В. Тараймович, 2026

ТЕМА 1. ВСТУП ДО ТЕПЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ

1. Основні терміни та поняття «тепло-», «енергозбереження» і «ресурсоефективність».
2. Актуальність для харчової галузі та зв'язок із концепцією сталого розвитку.
3. Тенденції енергоспоживання і ресурсних втрат у харчовій промисловості України та світу.
4. Мотиви впровадження енерго- та ресурсозбереження: економічні, екологічні, соціальні.
5. Вплив ресурсоефективності на конкурентоспроможність підприємств.

Харчова промисловість є однією з найенергоємніших галузей. За даними ФАО, виробництво і доставка їжі «від ферми до столу» споживають приблизно 30 % глобальних енергетичних ресурсів і спричиняють близько 31 % глобальних викидів парникових газів. Більша частина енергії та води витрачається не на безпосереднє вирощування, а на переробку, транспортування, охолодження й зберігання продукції. У глобальному масштабі агро-харчовий сектор також є великим споживачем води: сільське господарство використовує близько 70 % запасів прісної води, а харчова і напоїва промисловість споживає близько 20 % усієї промислової води. В українських умовах енергоносії становлять значну частку собівартості продукції. Аналітичні дослідження показують, що 20–30 % собівартості готової продукції припадає на витрати на паливо та електроенергію, причому ця частка має тенденцію до зростання.

В умовах обмежених природних ресурсів і високої залежності від імпорту енергоносіїв (Україна забезпечує менш як половину власних потреб у енергії; загальна енергетична залежність сягає 61 %, а імпорт газу складає приблизно 75 % потреб), підвищення енерго- та ресурсоефективності стає ключовою умовою конкурентоспроможності і стійкого розвитку підприємств. Цей вступ до теми дає визначення базових понять, показує актуальність проблеми для харчової галузі та розглядає мотиви впровадження енергозберігаючих заходів.

1 Основні терміни та поняття

Енергозбереження – це реалізація правових, організаційних, наукових, виробничих, технічних та економічних заходів, спрямованих на раціональне використання паливно-енергетичних ресурсів та залучення поновлюваних джерел енергії. Американське управління енергетичної інформації (EIA) пояснює, що поняття енергозбереження охоплює будь-яку поведінкову зміну, яка приводить до скорочення споживання енергії – наприклад, вимикання світла чи зменшення температури опалення. *Енергоефективність*, у свою чергу, стосується технічних характеристик обладнання: це здатність системи виконувати ту саму роботу, споживаючи менше енергії. У практиці промисловості енергоефективність досягається через модернізацію обладнання (наприклад, встановлення інверторних приводів, теплоізоляцію трубопроводів) та оптимізування технологічних режимів. Обидва підходи – і економія, і підвищення ефективності – зменшують енергетичні витрати та скорочують викиди парникових газів.

Поняття теплообмін описує передачу теплової енергії між середовищами. Департамент енергетики США виокремлює три основні механізми теплообміну:

– *Теплопровідність (кондукція)* – передача теплоти через безпосередній контакт між частинами твердого тіла; тепло проходить від більш гарячої ділянки до холоднішої через атомні взаємодії.

– *Конвекція* – перенесення теплоти внаслідок руху рідини чи газу. Наприклад, циркуляція гарячої пари в теплообміннику переносить тепло до охолоджуваної продукції.

– *Випромінювання (радіація)* – передача тепла у вигляді електромагнітних хвиль, що не потребує контактного середовища; сонячне випромінювання або інфрачервоні нагрівники є прикладами такого процесу.

Розуміння механізмів теплообміну важливе для розроблення енергоощадних технологій, таких як рекупераційні теплообмінники чи інфрачервоні нагрівальні системи.

Ресурсоефективність означає досягнення «більшого з меншого» шляхом оптимального використання ресурсів протягом усього життєвого циклу продукту. Європейська Комісія визначає ресурсоефективність як отримання більшої економічної цінності при найкращому використанні ресурсів (металів, мінералів, палива, деревини, води, ґрунтів, чистого повітря тощо) та мінімізації впливу на довкілля. Такий підхід сприяє економічному зростанню, створює робочі місця, підвищує конкурентоспроможність і забезпечує стійкість бізнесу до стрибків цін на сировину.

У ширшому контексті ресурсоефективність включає принципи циркулярної економіки. Згідно з поясненням ЄС, це спосіб виробництва й споживання, що передбачає переосмислення дизайну, виготовлення і використання продуктів так, щоб вони служили довше і генерували менше відходів. Коли продукт завершив свій цикл життя, його матеріали максимально повертаються в економіку шляхом *повторного використання, ремонту, відновлення та перероблення*. Переваги циркулярної моделі полягають у скороченні споживання природних ресурсів, зменшенні залежності від імпортової сировини та створенні нових робочих місць: перехід до циркулярної економіки може стимулювати інновації, підвищити конкурентоспроможність і створити приблизно 700 тис. робочих місць у ЄС до 2030 року.

2 Актуальність для харчової галузі та зв'язок зі сталим розвитком

Енерго- та ресурсоефективність мають особливу актуальність для харчової галузі з кількох причин:

1. *Висока частка енергоспоживання та вплив на довкілля.* Агропродовольчий сектор використовує приблизно 30 % усієї доступної енергії та генерує близько 30 % глобальних парникових газів. За оцінкою ФАО та IRENA, 70 % енергії в агро-харчових системах витрачається після ферми, тобто під час транспортування, перероблення, пакування, зберігання та маркетингу. Крім того, значні енергетичні втрати пов'язані з харчовими відходами, так як близько третини вироблених продуктів харчування втрачається або псується, і разом з ними марнується приблизно 38 % енергії, що була витрачена на їх виробництво.

2. *Великі обсяги споживання води та парникових газів.* Харчова й сільськогосподарська промисловість використовує 70 % прісної води на планеті та продукує близько 24 % глобальних викидів CO₂. Більшість викидів виникає через залежність від викопного палива на етапах перероблення та логістики.

3. *Енергетична залежність і економічна вразливість України.* Вітчизняна харчова промисловість тривалий час спиралася на дешевий природний газ. Енергетичний аудит молокопереробних підприємств показав, що 57,8 % енергоспоживання забезпечується природним газом, а виробничі процеси (пастеризування, випарювання, сушіння) споживають до 80 % усієї енергії. Внаслідок зниження обсягів виробництва спільне споживання енергії галуззю впало, але питомі витрати залишаються високими. Разом із цим, близько 40 % підприємств харчової галузі використовують застаріле обладнання, і без модернізації частка енергетичних витрат може зрости до 35 % операційних витрат.

4. *Зв'язок зі сталим розвитком і Цілями ООН.* Зменшення енергоспоживання та впровадження відновлюваних джерел енергії відповідає Цілям сталого розвитку (СДР 7 «Доступна та чиста енергія» й СДР 13 «Боротьба зі зміною клімату»). Впровадження енергозберігаючих та ресурсоефективних технологій сприяє «зеленій» економіці, скорочує викиди парникових газів, зменшує навантаження на довкілля й забезпечує здорові умови праці.

3 Тенденції енергоспоживання й ресурсних втрат у харчовій промисловості України та світу

Глобальна система харчування є високоєфективною, але надзвичайно енергоємною. Аналітичні дані ФАО та IRENA свідчать, що близько 30 % світової енергії споживає агро-харчовий сектор, причому приблизно 70 % цього енергоспоживання припадає на стадії після ферми – перероблення, охолодження, пакування, зберігання й логістику. При цьому сектор генерує близько 30 % глобальних парникових газів. Прогнозована потреба у харчових продуктах до 2050 року збільшиться на 70 %, що створить додатковий тиск на енергетичні ресурси.

Крім енергоспоживання, значними є втрати ресурсів унаслідок відходів. За оцінками ФАО, близько третини всієї виробленої їжі втрачається або марнується, і разом з нею марнується 38 % енергії, витраченої на виробництво. Причиною таких втрат є недостатня інфраструктура холодового ланцюга, адже щороку 526 млн т харчових продуктів псується через відсутність холодильних потужностей, і впровадження сучасних холодильно-логістичних технологій могло б запобігти втратам 144 млн т продовольства на рік.

Україна має значний потенціал зменшення енергоспоживання у харчовій галузі. Енергетичні аудити молокопереробних підприємств, проведені GIZ і Міністерством економіки, виявили, що *приблизно 45 % енергії можна заощадити* завдяки впровадженню заходів з енергоефективності (теплоізоляція, рекуперация тепла, удосконалення парових котлів), а окупність інвестицій становить 1–2 роки. Попри скорочення загального споживання енергоресурсів через падіння виробництва, питомі витрати залишаються високими. За оцінкою SAP Business One, у 2023 р. частка енерговитрат досягла 30 % у структурі операційних затрат підприємств, а без впровадження сучасних енергоефективних технологій вона може

зрости до 35 % у 2025 р.. Крім того, біля 40 % підприємств працюють на застарілому обладнанні, і модернізація дозволила б зменшити витрати на 10–20 %.

Варто враховувати і зовнішні фактори: Україна сильно залежить від імпорتنих енергоносіїв (75 % газу та 88 % нафти), що робить підприємства вразливими до цінових коливань. Тому розвиток власних відновлюваних джерел енергії, теплових насосів, біогазових установок і систем акумулювання холоду стає стратегічним напрямом для галузі.

4 Мотиви впровадження енерго- та ресурсозбереження

Економічні мотиви

1. *Зниження операційних витрат.* У структурі собівартості харчової продукції витрати на паливо й електроенергію становлять значну частку (20–30 %). Скорочення споживання енергії прямо зменшує собівартість і підвищує прибутковість.

2. *Підвищення конкурентоспроможності.* Підприємства, що мають високу ресурсоефективність, пропонують продукцію з нижчою ціною та кращим екологічним профілем. Впровадження інноваційних «чистих» технологій відкриває доступ до нових ринків, особливо ринків ЄС, де діють суворі стандарти енергоефективності.

3. *Швидка окупність інвестицій.* Практичні приклади свідчать, що модернізація парових котлів, установка систем рекуперації та теплоізоляції мають окупність 1–2 роки. Впровадження систем управління енергоспоживанням дозволяє скоротити енерговитрати на 10–20 % вже в перший рік експлуатації.

Екологічні мотиви

1. *Зменшення викидів парникових газів.* Зниження споживання викопного палива у виробництві і логістиці безпосередньо скорочує викиди CO₂ та інших забруднювачів. За даними ФАО, агро-харчова система генерує приблизно 30 % глобальних викидів; отже, підвищення ефективності є суттєвим внеском у боротьбу зі зміною клімату.

2. *Збереження природних ресурсів.* Енергозбереження скорочує потребу у видобутку викопного палива, а ресурсоефективність зменшує витрати води, матеріалів та землі. Концепція циркулярної економіки сприяє повторному використанню та переробленню матеріалів, скорочуючи потребу у первинних ресурсах.

3. *Зниження обсягів відходів та харчових втрат.* Сучасні технології холодового ланцюга можуть запобігти втратам сотень мільйонів тонн продукції, зберігаючи енергію, вкладену у її виробництво.

Соціальні мотиви

1. *Підвищення енергетичної безпеки та незалежності.* Зменшення споживання енергії та перехід на місцеві відновлювані джерела (біогаз, сонячна енергія, теплові насоси) зменшують залежність України від імпорту енергоносіїв.

2. *Створення «зелених» робочих місць.* Розвиток енергоефективних та відновлюваних технологій, модернізація обладнання та сервісні послуги створюють нові робочі місця і підвищують кваліфікацію працівників. Перехід до циркулярної економіки може створити сотні тисяч нових робочих місць у ЄС, що є орієнтиром і для України.

3. *Покращення якості життя.* Зменшення викидів та підвищення енергоефективності покращує екологічний стан, що позитивно впливає на здоров'я населення і розвиток громад.

5 Вплив ресурсоефективності на конкурентоспроможність підприємств

Рациональне використання енергії та матеріалів сприяє зростанню конкурентоспроможності підприємств через:

1. *Зниження витрат і поліпшення фінансових результатів.* Підприємства з високою ресурсоефективністю зменшують собівартість продукції і стають більш стійкими до коливань цін на паливо та сировину. У харчовій галузі економія 15–30 % енергії можлива завдяки впровадженню рекупераційних теплообмінників, індукційного та мікрохвильового нагріву, що підвищують коефіцієнт корисної дії до 90 % і скорочують тривалість технологічних процесів на 30–50 %.

2. *Вихід на нові ринки і відповідність стандартам.* Використання «чистих» технологій і дотримання екологічних стандартів є важливою умовою експорту до країн ЄС. Компанії, що впроваджують системи енергоменеджменту та сертифікують продукцію за європейськими екодирективами, отримують конкурентну перевагу.

3. *Створення інноваційних бізнес-моделей.* Підприємства можуть розвивати сервісно-орієнтовані моделі: замість продажу обладнання – надання послуг з охолодження чи освітлення, де оплата залежить від обсягу зекономленої енергії. Такий підхід стимулює постачальників інвестувати у найефективніші технології.

4. *Підвищення стійкості та репутації.* Споживачі та партнери все більше звертають увагу на екологічний слід продукції. Ресурсоефективні компанії мають кращий імідж, що сприяє зміцненню бренду й залученню інвестицій. Крім того, вони краще підготовлені до можливих обмежень у постачанні енергоносіїв чи сировини.

Таким чином, заходи з тепло- та енергозбереження і ресурсоефективності є не лише технологічною необхідністю, а й стратегічною можливістю для харчової промисловості України та світу. Вони сприяють досягненню цілей сталого розвитку, зміцнюють енергетичну безпеку та забезпечують тривалу конкурентоспроможність підприємств.

Контрольні питання.

1. Що означають поняття теплозбереження, енергозбереження і ресурсоефективність і чим вони відрізняються?

2. Які тенденції енергоспоживання та втрат ресурсів спостерігаються у харчовій промисловості України та світу?

3. Чому харчова промисловість вважається енергоємною галуззю і як це пов'язано із викидами парникових газів?

4. Наведіть економічні, екологічні та соціальні мотиви впровадження енергозберігаючих та ресурсозберігаючих заходів.

5. Як поняття ресурсоефективності пов'язане із концепцією сталого розвитку?

6. Яким чином підвищення ресурсоефективності впливає на конкурентоспроможність підприємства?

7. Чому підвищення енергоефективності важливе для України з огляду на залежність від імпорту енергоносіїв?

8. Які міжнародні організації здійснюють оцінювання енергоспоживання та викидів харчового сектору і які показники вони наводять?

ТЕМА 2. РЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО ЯК ІНСТРУМЕНТ ПЕРЕХОДУ ДО «ЗЕЛЕНОЇ» ЕКОНОМІКИ

1. «Зелена» економіка в контексті сталого розвитку
2. Ресурсоефективність: поняття, цілі, переваги, екологічні аспекти
3. Індикатори ресурсоефективного виробництва
4. Найкращі доступні технології та методи керування
5. Національне та міжнародне законодавче підґрунтя для реалізації ресурсоефективного виробництва.

1. «Зелена» економіка в контексті сталого розвитку

Зелена економіка (англ. *green economy*) – це економічна модель, що поєднує економічне зростання з охороною довкілля й соціальною справедливістю. Згідно з визначенням Програми ООН з навколишнього середовища (UNEP), зелена економіка – це економіка, яка забезпечує покращення добробуту людей та соціальну рівність, значно зменшуючи екологічні ризики та екологічний дефіцит. Вона є низьковуглецевою, ресурсоефективною та соціально інклюзивною. У такій економіці зростання зайнятості та доходів забезпечується інвестиціями у види діяльності, що дають змогу скорочувати викиди, підвищувати ефективність використання енергії та ресурсів, запобігати втраті біорізноманіття та екосистемних послуг.

Зелена економіка тісно пов'язана зі стратегічними цілями сталого розвитку – вона підтримує економічне зростання, не виснажуючи ресурси майбутніх поколінь. Офіційний документ ЄС нагадує, що зелена економіка прагне підвищити добробут людей і соціальну справедливість, зменшуючи екологічні ризики, і пов'язана з поняттям сталого розвитку, оскільки обидва терміни спрямовані на збереження природних ресурсів для майбутніх поколінь. У 2019 р. Європейська комісія представила Європейський зелений курс – стратегію, що націлює ЄС на кліматичну нейтральність до 2050 року та створення сучасної, ресурсоефективної й конкурентоздатної економіки.

Основні принципи зеленої економіки

Різні міжнародні організації пропонують принципи «зеленої» економіки; вони охоплюють економічні, соціальні та екологічні аспекти. Блог EpeI, що узагальнює позиції UNEP та інших експертів, подає п'ять ключових принципів зеленого переходу:

1. **Добробут:** розвиток орієнтований на підвищення якості життя людей не лише через матеріальне зростання, а й через доступ до освіти та чистого довкілля.
2. **Справедливість та добре врядування:** потрібні прозорі, підзвітні та інклюзивні інституції; процеси мають ґрунтуватись на широкому діалозі та відсутності корупції.
3. **Боротьба з бідністю:** зелена економіка створює нові сектори та робочі місця, що сприяють подоланню бідності й зменшенню нерівності.
4. **Енергоефективність і циркулярність:** ефективне використання ресурсів та мінімізація відходів; перехід від моделі «взяти – зробити – викинути» до циклічного використання матеріалів.
5. **Низьковуглецевий розвиток:** заміна викопного палива на відновлювані джерела (сонячну, вітрову, гідроенергію, водень), електрифікація транспорту та промисловості для зменшення викидів CO₂.

Ці принципи відповідають трьом вимірам сталого розвитку – економічному (економічна ефективність та інновації), соціальному (покращення життя та справедливості) та екологічному (збереження природних систем).

«Зелена» економіка орієнтована на загальну стійкість, оскільки вона поєднує економічні ініціативи з охороною довкілля та соціальною справедливістю. *Циркулярна економіка* – це стратегія, спрямована на утворення замкнених циклів ресурсів. Її мета – мінімізувати відходи та максимізувати повторне використання матеріалів, перетворюючи відходи на ресурси. Європейська комісія зазначає, що *перехід до циркулярної економіки потрібен для зменшення тиску на природні ресурси, збереження біорізноманіття, досягнення кліматичної нейтральності до 2050 р. та підвищення конкурентоспроможності Європи*. Циркулярність є частиною зеленої економіки, адже забезпечує ефективне використання матеріалів та скорочення відходів.

2. Ресурсоефективність: поняття, цілі, переваги та екологічні аспекти

Ресурсоефективність означає використання менших обсягів природних ресурсів для отримання того самого або навіть більшого обсягу продукції. Доповідь Центру європейських політичних досліджень (CEPS) визначає ресурсоефективність як загальне поняття використання менших ресурсних входів для досягнення однакового або кращого результату. Це поняття застосовується на рівні підприємств, секторів чи економіки в цілому; його кінцева мета – роз'єднати економічне зростання та споживання ресурсів (тобто досягти «відносного або абсолютного декаплінгу»).*

У ширшому сенсі ресурсоефективність охоплює чотири виміри: *сировина, енергія, вода та відходи*. Для підприємств це означає оптимізацію використання матеріалів та енергії, мінімізацію утилізації відходів і викидів та максимальне повернення цінних компонентів у виробничий цикл.

Цілі ресурсоефективності включають:

– Економічні: зниження витрат на ресурси та енергію, зменшення залежності від імпорту сировини, підвищення конкурентоспроможності та стимулювання інновацій. Аналіз CEPS наголошує, що ресурсоефективність допомагає зменшити витрати компаній на входні ресурси, знижує залежність від імпорту, підтримує лідерство в екотехнологіях та сприяє створенню робочих місць і економічному зростанню.

– Екологічні: скорочення використання невідновлюваних ресурсів, зменшення викидів парникових газів і інших забруднювачів, захист біорізноманіття та екосистем.

– Соціальні: покращення умов праці та охорони здоров'я, створення «зелених» робочих місць та підвищення енергетичної безпеки.

– Переваги ресурсоефективності охоплюють підвищення продуктивності, конкурентоспроможності та стійкості підприємств. Підвищена ресурсоефективність знижує витрати на сировину, дає можливість підприємствам залишатися прибутковими навіть за зростання цін на ресурси, а також покращує екологічний імідж компанії та приваблює споживачів, які обирають продукцію з низьким впливом на довкілля.

***Декаплінг** (від англ. *decoupling* – роз'єднання, від'єднання) – це ефект розриву зв'язку між економічним зростанням та негативним впливом на навколишнє середовище або споживанням ресурсів. Це стратегічна основа "зеленої економіки", коли ВВП зростає, а використання ресурсів та шкідливі викиди зменшуються або залишаються стабільними.

Перехід до ресурсоефективної економіки допомагає скоротити тиск на навколишнє середовище. Європейська тематична довідка зазначає, що *перехід від лінійної моделі до циклічної може зберегти цінність продуктів, матеріалів і ресурсів у економіці та мінімізувати утворення відходів*. Це сприяє зменшенню видобутку природних ресурсів, охороні земель і водних ресурсів та зниженню обсягів відходів, що потрапляють на звалища чи у довкілля. Ресурсоефективність підтримує цілі ООН зі сталого розвитку, зокрема цілі 7 (чиста енергія), 9 (інновації та інфраструктура), 12 (відповідальне споживання і виробництво) та 13 (дії з питань клімату).

3. Індикатори ресурсоефективного виробництва

Для оцінювання прогресу у сфері ресурсоефективності використовують систему показників. Європейська комісія в рамках Resource Efficiency Scoreboard застосовує провідний індикатор – продуктивність ресурсів. Продуктивність ресурсів визначається як відношення валового внутрішнього продукту (ВВП) до внутрішнього споживання матеріалів (*Domestic Material Consumption, DMC*) і виражається в євро на кілограм. Якщо ВВП зростає швидше, ніж споживання матеріалів, продуктивність ресурсів збільшується, а економічна діяльність відокремлюється від використання матеріалів. У ЄС за 2007–2016 рр. продуктивність ресурсів зросла на 32,3 %.

Додаткові індикатори, запропоновані національними та міжнародними програмами наведені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Додаткові індикатори ресурсоефективного виробництва

| Показник | Стисла характеристика та джерело |
|--|--|
| Матеріальне споживання та матеріальна ефективність | У базовому дослідженні UNIDO для України визначено цілі до 2030 р. за показниками матеріального споживання (тонни/особу) та матеріальної ефективності (ВВП на кілограм матеріальних ввідних). Вони відображають економічний результат відносно витрачених матеріалів. |
| Коефіцієнт циркулярного використання матеріалів (CMU) | Відсоток вторинних матеріалів у загальному використанні ресурсів; дослідження UNIDO пропонує орієнтир, що відповідає глобальним цілям. |
| Частка відновлюваної енергії та енергетична інтенсивність ВВП | Частка відновлюваних джерел у енергоміксі та витрати енергії на одиницю ВВП характеризують ефективність енергоспоживання та прогрес у декарбонізації. |
| Ефективність CO ₂ та частка відходів, що потрапляють на звалище | Показник викидів CO ₂ на одиницю економічного виходу і частка відходів, що відправляються на захоронення, відображають результати в управлінні викидами та відходами. |
| Секторні індикатори | Для аграрного сектору – скорочення викидів парникових газів та збільшення частки органічного землеробства; для промислового виробництва – зменшення відходів, підвищення частки вторинного використання матеріалів та виконання вимог директив щодо упаковки та електронних відходів. |

Крім того, Resource Efficiency Scoreboard включає індекс екоінновацій (*Eco-Innovation Index*), який є комплексним показником рівня розвитку та впровадження екологічно орієнтованих інновацій у країні. Цей індекс охоплює такі складові, як обсяг інвестицій у дослідження та розробки у сфері екотехнологій, активність підприємств у впровадженні екологічних інновацій, кількість відповідних патентів, а також соціально-економічні результати, зокрема створення доданої вартості та робочих місць у «зеленому» секторі. Таким чином, він дозволяє оцінити не лише рівень фінансування екологічних рішень, але й їхню практичну реалізацію та вплив на економіку.

Окрім цього, система показників враховує індикатори енергетичної продуктивності, що визначається як співвідношення валового внутрішнього продукту до обсягу кінцевого енергоспоживання. Цей показник відображає ефективність використання енергетичних ресурсів та демонструє, наскільки економічне зростання країни відбувається без пропорційного збільшення споживання енергії. Висока енергетична продуктивність свідчить про впровадження енергоефективних технологій, модернізацію виробництва та структурні зміни в економіці.

Важливим компонентом є також частка відновлюваної енергії у загальному обсязі кінцевого енергоспоживання. Цей показник характеризує рівень переходу країни до сталих джерел енергії – сонячної, вітрової, гідроенергії, біоенергетики та інших відновлюваних ресурсів. Зростання частки відновлюваної енергії свідчить про скорочення залежності від викопного палива, зменшення викидів парникових газів та наближення до цілей кліматичної нейтральності. У сукупності ці індикатори формують цілісне уявлення про ефективність використання ресурсів і прогрес країн у напрямі зеленої трансформації економіки.

4. Найкращі доступні технології та методи керування

Найкращі доступні технології ВАР (*Best Available Techniques*) – це принцип екологічного регулювання, який вимагає від підприємств використовувати найефективніші та сучасні технологічні рішення, які забезпечують високий рівень захисту довкілля та здоров'я при економічній та технічній доцільності. ОЕСД (Організація економічного співробітництва та розвитку (*ОЕСР, англ. OECD*)) пояснює, що країни використовують ВАР для встановлення обґрунтованих вимог до викидів для промислових установок; ВАР представляють сучасні підходи, які забезпечують оптимальні результати з попередження та контролю забруднення (повітря, води й ґрунту) та одночасно покращують продуктивність процесів. Ці методи повинні бути технічно й економічно здійсненними, що дозволяє підприємствам досягати високих екологічних результатів без надмірних витрат.

ВАР є основою Європейської директиви про промислові викиди (*Industrial Emissions Directive, IED*). У 2024 р. ухвалено переглянуту директиву IED 2.0, яка інтегрує принципи циркулярної економіки та ресурсної ефективності у документи ВАР; її застосування розпочалося у серпні 2024 р. В Україні до європейського підходу з ВАР поступово адаптують національні вимоги у сфері промислового забруднення.

Для досягнення ресурсоефективності міжнародні організації розробили підхід «Ресурсоефективне та чисте виробництво» (*RECP*). В Україні його просувають UNIDO та програма Eco-Industrial Parks. За даними GEIPP Ukraine, RECP

– це парасольковий термін, що охоплює чисте виробництво, екологічну ефективність, управління відходами та запобігання забрудненню. RECP базується на трьох стовпах:

- Виробнича ефективність – оптимізація використання матеріалів, енергії й води.

- Екологічний менеджмент – мінімізація негативного впливу виробництва через зменшення відходів та викидів.

- Розвиток людського капіталу – зменшення ризиків для працівників та громад і створення умов для їхнього розвитку.

Впровадження RECP на підприємстві часто здійснюють через вісім категорій заходів: гарне господарювання, заміна вхідних ресурсів, кращий контроль процесу, модифікація обладнання, зміна технології, повторне використання та рециркуляція на місці, виробництво корисного побічного продукту та модифікація продукту. Ці методи сприяють зниженню енергетичних і матеріальних витрат, скорочують відходи та підвищують конкурентоспроможність.

Додаткові методи та стандарти

- Системи енергоменеджменту ISO 50001 – міжнародний стандарт, що допомагає підприємствам встановлювати, впроваджувати й поліпшувати системи управління енергією. Він спрямований на підвищення енергетичної ефективності, зменшення витрат і викидів та підтримує принцип «енергоефективність насамперед».

- Екологічний менеджмент ISO 14001 – стандарт для впровадження систем управління довкіллям, сприяє комплексному підходу до зменшення впливу на довкілля та підвищення ресурсоефективності.

- Еко-інновації – розвиток нових технологій та бізнес-моделей, що дозволяють зменшити матеріальний та енергетичний слід. EU Resource Efficiency Scoreboard використовує індекс екоінновацій, який оцінює показники інвестицій, діяльності та результатів в галузі екологічних інновацій.

5. Національне та міжнародне законодавче підґрунтя для реалізації ресурсоефективного виробництва

Міжнародні рамки та ініціативи

1. *Програма ООН з довкілля та Цілі сталого розвитку*. Визначення зеленої економіки UNEP та положення Агенди 2030 (Цілі 7, 9, 12, 13) створюють глобальні орієнтири для переходу до ресурсоефективної та низьковуглецевої економіки.

2. *Паризька угода (2015)*. Зобов'язує країни скорочувати викиди парникових газів; ресурсоефективність та енергоефективність є ключовими стратегіями для досягнення національно визначених внесків.

3. *Європейський зелений курс та План дій з циркулярної економіки*. ЄС бачить перехід до циркулярної економіки як спосіб зробити економіку конкурентоспроможною, зменшити тиск на природні ресурси та досягти кліматичної нейтральності.

Європейський зелений курс та План дій з циркулярної економіки. ЄС бачить перехід до циркулярної економіки як спосіб зробити економіку конкурентоспроможною, зменшити тиск на природні ресурси та досягти кліматичної нейтральності. У 2024 р. набув чинності Регламент щодо екодизайну для сталих продуктів (ESPR), що встановлює вимоги до екологічності та довговічності товарів;

у 2024 р. також набули чинності Директива про право на ремонт та Директива про надання споживачам інформації про міцність і ремонтпридатність товарів.

4. *Директива про промислові та фермерські викиди (IED 2.0)*. Переглянута директива інтегрує практики циркулярної економіки та ресурсної ефективності в документи ВАТ і діє з серпня 2024 р., забезпечуючи обов'язкове використання найкращих доступних технологій для зменшення викидів.

5. Регулювання відходів та упаковки. Новий Регламент ЄС щодо упаковки та упаковочних відходів (PPWR), що вступив у силу в лютому 2025 р., гармонізує національні заходи для збільшення використання вторинних матеріалів і посилює внутрішній ринок вторинної сировини. ЄС також посилює вимоги до обігу електронних відходів, батарей, мікропластику тощо.

6. *OECD Recommendation on Integrated Pollution Prevention and Control (IPPC)* – міжнародний інструмент, що закріплює принцип ВАТ та узгоджує підходи до запобігання забрудненню.

Національне законодавство України

Україна інтегрує європейські принципи у власну нормативну базу. Серед ключових документів:

1. Закон України «Про енергоефективність» (2022). Вважається своєрідною «конституцією» державної політики в галузі енергоефективності; закон імплементує ключові директиви ЄС, формує систему управління енергоефективністю, визначає ролі та повноваження органів влади та вводить принцип «енергоефективність перш за все». Закон встановлює механізми планування й фінансування, регулює енергетичний аудит, енергоменеджмент, маркування та інформування споживачів.

2. Закон «Про енергоефективність будівель» (2017). Визначає вимоги до енергетичної ефективності будівель, передбачає обов'язкову сертифікацію та енергоаудит, систематичну тепло модернізацію та впровадження стандартів будівництва майже нуль-енергетичних будівель (NZEB).

3. Закон «Про управління відходами» (2022). Як зазначає базове дослідження UNIDO, ухвалення Закону «Про управління відходами» у червні 2022 р. стало важливим кроком до узгодження з європейською політикою; однак національна стратегія циркулярної економіки ще відсутня, а низький рівень переробки та нестача фінансування залишаються викликами. Закон регулює поводження з усіма видами відходів, встановлює ієрархію поводження (пріоритет запобігання та підготовці до повторного використання) та запроваджує розширену відповідальність виробника.

4. Інші закони та програми: закон про Енергетичний фонд (2017), закон про енергосервісні договори (ESCO) (2015), оновлений закон про когенерацію та використання тепла вторинних відходів (2005) – вони створюють фінансові та правові механізми для модернізації обладнання та залучення інвестицій. Крім того, ухвалена Енергетична стратегія України до 2050 р., Національний енергетичний та кліматичний план до 2030 р. та Національний план дій з енергоефективності утворюють стратегічний каркас для досягнення кліматичних та енергетичних цілей.



Рисунок 2.1 – Загальна схема ресурсоефективного виробництва

Синергія міжнародних та національних ініціатив

Українська політика енерго- та ресурсоефективності тісно пов'язана з міжнародними зобов'язаннями – Паризькою угодою, Угодою про асоціацію з ЄС, договором про Енергетичне співтовариство та Цілями сталого розвитку. Завдяки цьому Україна адаптує європейські директиви (IED, EED, EPBD), впроваджує BAT та розвиває енергосервісні механізми. Законодавство визначає роль державних та місцевих органів, встановлює цільові програми теплової модернізації, модернізації водопостачання та тепlopостачання, а також забезпечує інформування споживачів про енергоспоживання.

Контрольні питання.

1. Дайте визначення «зеленої» економіки і поясніть її основні принципи.
2. Як зелена економіка поєднується зі сталим розвитком та циркулярною економікою?
3. Що таке ресурсоефективність та які її цілі й переваги для підприємств і довкілля?
4. Які індикатори використовують для оцінки ресурсоефективного виробництва?
5. Поясніть поняття найкращих доступних технологій (BAT). Які методи керування сприяють ресурсоефективності?
6. Назвіть основні національні та міжнародні нормативні акти, що регулюють ресурсоефективне виробництво в Україні.
7. Чим відрізняється традиційна модель економіки «брати–виробляти–викидати» від зеленої та циркулярної моделей?
8. Яку роль відіграє Європейський «зелений» курс у забезпеченні переходу до ресурсоефективної економіки?
9. Наведіть приклади показників, за допомогою яких підприємства відстежують прогрес у сфері ресурсоефективності.

ТЕМА 3. ПОКАЗНИКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА НОРМУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ

1. Основні критерії та показники оцінки енергоефективності обладнання.
2. Енергетичний баланс підприємства та методи його побудови.
3. Нормування витрат енергії для технологічних процесів.
4. Методики порівняння різних варіантів технологічних схем.
5. Вплив енергоефективності на собівартість продукції.

1 Основні критерії та показники оцінки енергоефективності обладнання

Енергоефективність обладнання – це співвідношення між корисним виходом енергії та первинним енергоспоживанням. Найпростішим критерієм для промислових і комунальних установок є *специфічне споживання енергії* (кВт·год/кг, МДж/тону продукції тощо) – кількість енергії, що витрачається на виробництво одиниці продукції. Основним завданням є мінімізувати це значення без шкоди для якості.

Для нагрівальних та охолоджувальних установок використовуються спеціальні коефіцієнти ефективності.

Наприклад, **SEER** (*Seasonal Energy Efficiency Ratio*) виражає сумарну холодопродуктивність кондиціонера в BTU (Абревіатура BTU розшифровується як British Thermal Unit – британська термічна одиниця – і позначає одиницю вимірювання теплової енергії в англійській системі заходів) за сезон, поділену на потребу електроенергії у ват-годинах. Вищий SEER означає, що пристрій ефективніше перетворює електрику у холод, а збільшення SEER з 10 до 13 дає орієнтовно 23 % економії енергії.

HSPF (*Heating Seasonal Performance Factor*) аналогічно визначає ефективність теплових насосів у режимі обігріву: загальний тепловий вихід за опалювальний сезон ділять на електроспоживання; чим вищий показник, тим менша вартість опалення.

EER (*Energy Efficiency Ratio*) – це відношення холоду в BTU до електричної потужності у ватах при фіксованій температурі, а **COP** (*Coefficient of Performance*) показує співвідношення між отриманим теплом/холодом і витраченою енергією: високий COP свідчить про ефективну роботу обладнання.

У промисловому обладнанні використовують **ККД** (коефіцієнт корисної дії), який оцінює частку корисної енергії від її загального надходження. Для електродвигунів застосовують **індекс ефективності ІЕ** (ІЕС 60034-30), який класифікує двигуни за рівнем втрат; в обладнанні з частотним регулюванням важливими є співвідношення регульованого і номінального навантаження та робочі характеристики за часткових навантажень. Для парових котлів критеріями є питомі витрати палива, теплова ефективність, коефіцієнт надлишку повітря, а для печей і технологічних сушарок – втрати тепла через огорожувальні конструкції та рівень рекуператії.

Допоміжні показники:

- Енергетична інтенсивність – відношення енергії до вартісної (гривні) або фізичної (кг, м³) характеристики продукції.
- Енергетична продуктивність – обсяг продукції на одиницю витраченої енергії.

– Індекс енергоефективності обладнання – порівняння фактичних параметрів із найкращими доступними технологіями (BAT) або стандартом «Енергія Star».

Вибір показника залежить від функції та режиму роботи обладнання. Для всіх показників важливо враховувати поточну технічну справність (чисті теплообмінники, відрегульовані горілки, правильна ізоляція), оскільки неправильний монтаж або деградація обладнання може суттєво зменшити фактичну ефективність (наприклад, кондиціонер з номінальним SEER 14 через неякісне повітропровідне господарство може мати реальний SEER 5).

2 Енергетичний баланс підприємства та методи його побудови

Енергетичний баланс підприємства відображає повний кількісний зв'язок між надходженням енергії та її використанням. На веб-порталі «Patriot-NRG» енергетичний баланс визначають як «відповідність між кількістю поставленої енергії (прибутковою частиною) та сумою корисної енергії і втрат (видатковою частиною)». Цей баланс дає змогу оцінити фактичний стан та ефективність використання енергії, знайти втрати, визначити резерви економії, оптимізувати режими роботи обладнання й розробити програми підвищення енергоефективності.

Баланси можуть бути *проектними, плановими та звітними*. Проектні баланси складають при проектуванні нового об'єкта або реконструкції; планові – на основі норм і прогнозів споживання, а звітні – за результатами вимірювання реальних витрат. Баланси можуть охоплювати різні об'єкти – окремі агрегати, цехи, підприємство в цілому.

Типовий баланс складають в одиницях умовного палива (у.п.) або енергії (МДж, кВт·год). В прибуткову частину входить:

- первинне паливо (газ, вугілля, мазут),
- електроенергія і тепло з зовнішньої мережі,
- власна генерація (котельні, турбіни),
- вторинні енергоресурси (утилізація теплових викидів, перероблення біомаси тощо).

Видаткова частина включає корисне використання енергії на технологічні процеси, власні потреби (вентилятори, насоси), втрати при перетворенні, передачі та розподіленні.

Консолідований баланс підприємства – це сукупність взаємопов'язаних часткових балансів за видами енергії або підрозділами; він відображає структуру енергоресурсів та дозволяє оцінити рівень енергоефективності.

Побудова балансу передбачає наступні операції:

1. Збір даних від засобів обліку (лічильники електроенергії та газу), вимірювань теплових потоків, паспортних даних обладнання. Деякі дані (наприклад, втрати тепла через огорожі) потребують експериментальних вимірювань.

2. Конвертацію до єдиних одиниць. Всі енергоресурси переводять в один формат (наприклад, ум. паливо або кВт·год), враховуючи теплоти згорання, ефективність перетворення тощо.

3. Розподілення споживання за підрозділами та процесами. Для цього визначають, які процеси споживають найбільше енергії, виконують Pareto-аналіз для визначення пріоритетності (80/20).

4. Визначення втрат. Далі визначають втрати на трансформацію (котельні, турбогенератори), розподілення (тепломережі, електричні кабелі), нерегульовані режими (дроселювання, обмежувачі).

5. Аналіз та візуалізація. Для цього використовують діаграми Санкі для візуалізації потоків, що допомагає виявити найбільші резерви економії.

Енергоаудитори рекомендують комбінувати експериментальні вимірювання, аналітичні розрахунки та експертні оцінки, оскільки інформації від систем обліку часто недостатньо. Баланси складають не лише для річного періоду, а й для окремих місяців чи добових максимумів – це допомагає визначити пікові навантаження та потенціал згладжування графіка споживання.

3 Нормування витрат енергії для технологічних процесів

Нормування – це встановлення раціональних показників енергоспоживання на певний технологічний процес або продукцію. В результаті створюються норми енерговитрат (кВт·год/од., м³ газу/т тощо), які є основою для планування, контролю та мотивації персоналу. У документі Програми ООН з навколишнього середовища (UNDP) зазначено, що в країнах, які підвищують енергоефективність, необхідно встановити норми споживання енергії для кожного виду промисловості та застосовувати штрафи й заохочення залежно від результатів.

Процес нормування включає:

1. Аналіз технологічного процесу. Визначають межі процесу, енергетичні входи та виходи, розподіл споживання між основним і допоміжним обладнанням. При цьому розподіляють споживання між основним обладнанням (наприклад, котли, пресувальні машини) і допоміжним (насоси, системи освітлення, вентиляція). Для коректності обліку окремо фіксують енергію, що приходить із зовнішніх джерел, і ту, що підприємство виробляє або рекуперує самостійно.

2. Вимірювання та збирання даних. Проводять енергетичні заміри при різних режимах роботи: номінальному, мінімальному та максимальному. Враховують якість сировини (вологість зерна, жирність молока), продуктивність та стан обладнання – бо старі або засмічені агрегати можуть споживати більше енергії. Важливими є й зовнішні умови: температура, вологість, тривалість робочої зміни. Це допомагає сформувати базову лінію для порівняння показників у наступні періоди.

3. Розрахунок питомих витрат. Енерговитрати ділять на кількість продукції чи послуг. Для стабільних процесів застосовують метод регресійного аналізу, коли будують модель споживання залежно від продуктивності та експлуатаційних параметрів. Для складних процесів використовують тепловий та математичний баланс.

4. Встановлення норми. Після аналізу даних визначають середній рівень енергоспоживання та потенціал економії. Розрізняють базову норму (середній фактичний рівень за певний період), прогресивну (досяжний рівень після впровадження енергоощадних заходів) та планову (бажаний рівень у майбутньому). Підприємствам, що мають сезонні коливання продукції або високий вплив погодних умов, варто встановлювати окремі норми для різних сезонів.

5. Контроль та перегляд. Регулярно порівнюють фактичне споживання з нормою, аналізують відхилення, оновлюють нормативи при зміні технології або

модернізації обладнання. Штрафно-заохочувальна система стимулює підтримку нормативів.

Норми енерговитрат впроваджують також на рівні державних стандартів (наприклад, в Україні ДСТУ «Ресурсозбереження. Норми питомих витрат палива і енергії», стандарти ISO 50001 з систем енергоменеджменту). В країнах ЄС показники енергоефективності виробів регулюють директиви *Ecodesign та енергетичного маркування*, а виробники повинні декларувати клас енергоспоживання своєї продукції.

4 Методики порівняння різних варіантів технологічних схем

Для системного порівняння технологічних схем простого переліку «енергоспоживання менше – краще» замало. Потрібно враховувати різні аспекти: економіку, енергетику, екологію, гнучкість, надійність, ризики і навіть прийнятність для персоналу. Наведемо пояснення основних методів і критеріїв, що використовуються при обґрунтуванні вибору технологічних рішень.

1. Аналіз життєвого циклу (LCA/LCC)

Life-cycle cost analysis (LCCA) визначає загальну вартість володіння – вона охоплює всі витрати на придбання, володіння та утилізацію обладнання чи технологічної лінії. Метод дозволяє порівняти альтернативи, які забезпечують однакову продуктивність, але мають різні капітальні та експлуатаційні витрати.

Він передбачає:

– *Категорії витрат.* Усі витрати поділяють на початкові (капітальні інвестиції, придбання обладнання), паливні (купівля енергоресурсів), операційні та ремонтні, витрати на заміну, залишкову вартість (відновлювальна або утилізаційна), фінансові (відсотки за кредитами) та нефінансові вигоди/затрати. Враховуються лише ті витрати, які суттєво відрізняються між варіантами.

– *Дисконтована оцінка.* Усі платежі перераховуються у базові роки шляхом індексації на майбутню дату та дисконтування назад у базову дату. Це дозволяє співставити альтернативи з різним строком служби та окупності.

– *Показники ефективності.* Крім найнижчої сумарної вартості (LCC), використовують чисті заощадження, коефіцієнт «заощадження-до-інвестицій» (*Savings-to-Investment Ratio*), внутрішню норму прибутковості (IRR) й період окупності. Ці показники дають змогу врахувати і ризики, і вартість капіталу. Зокрема, короткий термін окупності є важливим для інвестора, хоча він не враховує зміну вартості грошей у часі та нерівномірні грошові потоки, тому часто використовується разом із NPV та IRR.

Екологічна складова (LCA). Аналіз життєвого циклу враховує вплив процесу на довкілля – від видобування сировини до утилізації. Він описує викиди парникових газів, використання води та матеріалів, забруднення. Поєднання LCC і LCA дозволяє оцінити варіанти одночасно за економікою й за впливом на екологію.

2. Питомі енергетичні показники

Порівнюючи технологічні схеми, аналізують питомі витрати енергії (кВт·год/т, МДж/кг продукції) та питомі викиди CO₂ (кг CO₂-екв./т). Важливо враховувати повну енергетичну картину, а не лише теоретичну теплоту випаровування чи нагрівання. У сушарках та випарниках значну частину енергії витрачають на нагрівання матеріалу, сушильного агента та втрати у розподільних

системах, тому фактичне споживання може удвічі перевищувати латентну теплоту випаровування. Порівняльний аналіз має враховувати:

1. Відновлення енергії. Схеми з рекуперацією та комбінованим виробництвом (когенерація) дозволяють використовувати вторинну пару або відхідне тепло. Наприклад, багатокорпусні випарники використовують вторинну пару з одного ефекту для нагрівання наступного, зменшуючи потребу у свіжій парі на 50 % і більше. Механічна компресія пари (MVR) ще ефективніша – вона стискає вторинну пару і повертає її як теплоносії, що дозволяє скоротити енергоспоживання на 70-90 %.

2. Врахування виробництва електроенергії і тепла. При порівнянні слід оцінювати кумулятивну енергію (тепло + електрика). Когенераційні установки часто мають вищий ККД, ніж окремі котли і генератори, знижуючи сумарні викиди.

3. Ексергетичний аналіз

Традиційні енергетичні баланси враховують лише кількість енергії. Ексергетичний аналіз оцінює також її якість – здатність виконувати корисну роботу. Він визначає «корисну» або «доступну» енергію, що може бути перетворена у працю, коли система приходить до рівноваги з довкіллям. Ключові положення:

- Енергія vs. ексергія. Енергія зберігається (перший закон термодинаміки), а ексергія завжди зменшується у реальних процесах через незворотності (тертя, теплопередача при кінцевому перепаді температур, змішування). Наприклад, електрична енергія має 100 % ексергії, а низькопотенційне тепло (~40 °C) – лише близько 5 %.

- Виявлення втрат. Ексергетичний аналіз показує, де відбуваються найбільші незворотні втрати і які процеси варто оптимізувати. Висока ексергетична ефективність означає, що обладнання мінімізує втрати, а енергія використовується там, де її потенціал найвищий.

Таким чином, застосування ексергетичного аналізу у порівнянні технологічних схем дозволяє оцінити не лише кількість енергії, а і її цінність, визначити точки для рекуперації чи підвищення температурного рівня (наприклад, за допомогою теплових насосів).

4. Мультикритеріальний аналіз (MCDA)

При модернізації технологій підприємства стикаються з ситуацією, коли критерії вибору альтернатив є взаємно суперечливими: мінімізація енергоспоживання може вимагати значних капітальних вкладень; підвищення автоматизації – зменшувати гнучкість виробництва; екологічна безпечність – супроводжуватися зростанням експлуатаційних витрат. У таких умовах традиційний підхід, заснований лише на одному показнику (наприклад, строк окупності або рівень енерговитрат), не дає об'єктивного результату. Саме тому застосовується *мультикритеріальний аналіз (Multi-Criteria Decision Analysis, MCDA)* – системний підхід до прийняття рішень, який дозволяє одночасно враховувати кілька кількісних і якісних критеріїв.

MCDA передбачає формування переліку релевантних критеріїв (економічних, технічних, енергетичних, екологічних, соціальних), їх структуризацію, визначення вагових коефіцієнтів відповідно до стратегічних пріоритетів підприємства та подальше ранжування альтернатив. Наприклад, при виборі нового обладнання можуть оцінюватися: капітальні витрати, експлуатаційні витрати, рівень енергоефективності, надійність, строк служби, екологічні викиди, адаптивність до змін обсягів виробництва. Якщо критерії є конфліктними (низькі енергетичні витрати

vs. висока гнучкість; мінімальні інвестиції vs. довгострокова економія), застосовують методи визначення ваг і пріоритетів, зокрема АНР (Analytic Hierarchy Process), ANP (Analytic Network Process) та інші методи багатокритеріального ранжування.

Ключовим етапом є визначення вагових коефіцієнтів, які відображають відносну важливість кожного критерію. Неправильне встановлення ваг може призвести до викривлення результатів, тому процес має бути прозорим і обґрунтованим.

Ефективність MCDA значною мірою залежить від залучення експертів із різних підрозділів підприємства – технологів, енергетиків, фінансистів, екологів, фахівців із логістики та управління ризиками. Такий міждисциплінарний підхід забезпечує врахування різних точок зору, зменшує суб'єктивність оцінювання та сприяє узгодженню стратегічних і операційних цілей. У результаті мультикритеріальний аналіз дозволяє приймати більш зважені, прозорі та стратегічно обґрунтовані рішення щодо модернізації технологій і впровадження енергоефективних рішень.⁵ *Техніко-економічний порівняльний аналіз*

Додатково до LCC/LCA та MCDA, використовують *класичні фінансові показники*:

Період окупності (Payback Period) – показує, скільки часу потрібно для повернення початкових інвестицій. Чим він коротший, тим менший ризик, однак цей показник не враховує вартість грошей у часі та нерівномірність грошових потоків.

Рівень ризиків. Окрім фінансових показників, оцінюють надійність постачання енергії, можливість зупинок, складність експлуатації. Наприклад, у дистиляційних колонах енергоспоживання визначають дві основні змінні – потужність парогенератора та коефіцієнт зрощення. Збільшення зворотного потоку поліпшує розділення, але потребує більше тепла; оптимальна точка знаходиться між капітальними витратами на більший апарат і експлуатаційними витратами на пару. Подібні компроміси треба враховувати і для випарників, сушарок або ректифікаційних апаратів.

5 Вплив енергоефективності на собівартість продукції

Енергоефективність безпосередньо впливає на собівартість, оскільки енергетичні витрати становлять значну частку змінних витрат у багатьох галузях. Зменшення споживання енергії скорочує витрати на паливо та електроенергію, знижує навантаження на обладнання і зменшує потребу у технічному обслуговуванні, що покращує надійність і якість продукції.

У випадку підприємства Hollingsworth & Vose (виробника фільтраційних матеріалів) впровадження програми стратегічного енергоменеджменту привело до економії 15,5% електроенергії та 13,3 % газу. Такі програми не тільки зменшують викиди, а й безпосередньо покращують фінансовий результат, адже менші енергетичні витрати «проходять прямо в прибуток».

Варто зазначити, що зниження споживання енергії зазвичай потребує суттєвих початкових інвестицій – модернізації технологічного обладнання, впровадження автоматизованих систем управління енергоспоживанням, утеплення будівель, заміни освітлення на LED-технології, встановлення частотних перетворювачів, теплових насосів або систем рекуперації тепла. Проте оцінювати доцільність таких заходів необхідно не лише за критерієм початкової ціни, а з

урахуванням повної вартості володіння (Total Cost of Ownership, TCO), яка включає витрати на експлуатацію, технічне обслуговування, ремонт, споживання енергоресурсів та утилізацію. Часто дешевше на етапі закупівлі обладнання з низьким коефіцієнтом корисної дії виявляється дорожчим у довгостроковій перспективі через підвищені витрати на електроенергію та обслуговування.

Показовим прикладом є кондиціонери з вищим коефіцієнтом сезонної енергоефективності (SEER): хоча їхня ринкова ціна може бути більшою, вони споживають менше електроенергії при однаковій холодопродуктивності, що забезпечує швидшу окупність інвестицій завдяки щомісячній економії. Аналогічна ситуація спостерігається із сучасними електродвигунами класу енергоефективності IE3–IE4, які дозволяють скоротити енергоспоживання на 5–15 % порівняно зі стандартними моделями. Крім того, зростання тарифів на енергоносії та запровадження державних стимулів — пільгових кредитів, грантових програм, механізмів енергосервісу (ESCO), податкових пільг — додатково скорочують строк окупності таких проєктів і підвищують їхню інвестиційну привабливість.

Окрім прямих фінансових вигод, підвищення енергоефективності має стратегічне значення. Воно зменшує залежність підприємств і країни загалом від імпортних енергоресурсів, підвищує енергетичну безпеку, сприяє стабільності виробничих процесів та покращує екологічні показники діяльності. Зниження енергоємності продукції позитивно впливає на її собівартість і конкурентоспроможність як на внутрішньому, так і на зовнішніх ринках, особливо з огляду на посилення вимог щодо декарбонізації та вуглецевого регулювання (зокрема механізмів прикордонного вуглецевого коригування).

У період енергетичної кризи під час війни в Україні (2022–2024 рр.) підприємства, які завчасно модернізували енергетичні системи, встановили резервні джерела живлення, впровадили системи енергоменеджменту та оптимізували споживання, продемонстрували значно меншу чутливість до тарифних шоків і перебоїв у постачанні електроенергії. Це підтверджує, що інвестиції в енергоефективність є не лише економічно виправданими, але й важливим елементом антикризової стратегії та довгострокової стійкості бізнесу.

Контрольні питання.

1. Дайте визначення енергоефективності обладнання і назвіть основні показники (специфічне споживання енергії, SEER, HSPF, EER, COP).
2. Що таке специфічне споживання енергії і чому його важливо мінімізувати?
3. Як визначається і застосовується коефіцієнт сезонної енергоефективності (SEER) та коефіцієнт сезонної продуктивності обігріву (HSPF)?
4. Які критерії енергоефективності застосовують для парових котлів, печей, сушарок та електродвигунів?
5. Поясніть, що таке енергетичний баланс підприємства та у чому різниця між проєктним, плановим і звітним балансами.
6. Які складові входять до прибуткової та видаткової частини енергетичного балансу?
7. Чому нормування енергоспоживання важливе для технологічних процесів та як воно здійснюється?
8. Які методики використовують для порівняння різних технологічних схем щодо енергоспоживання й ефективності?
9. Як енергоефективність впливає на собівартість продукції та які приклади ілюструють цю залежність?

ТЕМА 4. ЗАГАЛЬНІ ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

1. Використання вторинних енергетичних ресурсів і рециркуляції.
2. Пасивні методи зменшення тепловтрат (теплоізоляція, герметизація).
3. Оптимізування графіків роботи обладнання для зниження енерговитрат.
4. Приклади використання відпрацьованого тепла на харчових підприємствах.
5. Вплив організаційних заходів на ефективність енергоспоживання.

Енергозбереження в харчовій промисловості – це комплексна стратегія, яка охоплює технічні, технологічні та організаційні рішення для зниження споживання енергоресурсів, підвищення ефективності виробництва та зменшення впливу на довкілля. Харчова галузь споживає значні обсяги електро- й теплової енергії на пастеризування, стерилізування, сушіння, охолодження й транспортування продукції. При цьому значна частина енергії втрачається у вигляді невикористаного тепла або через нераціональну роботу обладнання.

1. Використання вторинних енергетичних ресурсів і рециркуляція

У технологічних процесах значна частка енергії не трансформується на корисну продукцію, а виводиться у вигляді відпрацьованих газів, гарячої води, конденсату, пару або нагрітих матеріалів. Ці потоки називають *вторинними енергетичними ресурсами* (ВЕР) і поділяють за температурою (рівнем якості) та носієм тепла.

Високотемпературне відпрацьоване тепло ($>400\text{ }^{\circ}\text{C}$) характерне для цементної, скляної та металургійної промисловості; середнє ($100\text{--}400\text{ }^{\circ}\text{C}$) – для газових котлів та сушильних установок; *низькотемпературне* ($<100\text{ }^{\circ}\text{C}$) переважає у харчовій промисловості і може використовуватись для опалення, нагрівання води або як джерело для теплових насосів. Дослідження в ЄС показують, що потенційний обсяг промислового відпрацьованого тепла становить близько $305\text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{рік}$, з яких $25\text{ кВт}\cdot\text{год}$ припадає на тепло з температурою нижче $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ – саме цей сегмент є найбільш поширеним у харчовій галузі.

Виділяють також різні носії тепла: гази (димові гази, пари), рідини (конденсат, охолоджувальна вода, стічні води) та тверді матеріали (гарячі продукти). Для кожного типу потрібні відповідні теплообмінні апарати та системи зберігання.

Потенціал і технології використання відпрацьованого тепла

За оцінками різних науковців, $20\text{--}50\%$ тепла, що виробляється для опалення або отримання електроенергії, губиться як відпрацьоване тепло. У харчовій промисловості щороку втрачається близько 8 МДж тепла, а загальносвітові втрати через димові гази й витяжне повітря сягають 15% від усього споживання енергії. Відновлення навіть частини цього тепла може зменшити енергоспоживання підприємства на $20\text{--}30\%$ і швидко окупитися.

Сучасні системи рекуперації тепла в харчовій промисловості включають:

– **Пластинчасті та трубчасті теплообмінники.** У пастеризаційних апаратах ГЕА пластинчасті теплообмінники дозволяють відбирати до 95% теплоти, яку віддає пастеризоване молоко, для підігрівання сирової сировини; зі встановленням теплового насоса цей показник може сягати 100% , що фактично ліквідує потребу в парових котлах. Схожі принципи застосовують для соків, пива чи консервів.

– Теплові насоси. Вони «піднімають» температуру низькопотенційного тепла до рівня, придатного для технологічних потреб. Дослідження показали, що теплові насоси можуть бути у вісім разів ефективніші за електричні котли, зменшуючи споживання енергії з 9 МВт до 2 МВт і знижуючи експлуатаційні витрати на 75 %.

– Технології Heat-to-Power (H2P) – системи, що перетворюють теплову енергію на електричну. Вони використовують органічні цикли Ренкіна або термоелектричні елементи й працюють при температурах від 40 °С. За підрахунками, такі установки дозволяють економити до 25 % енергії з терміном окупності 3–5 років.

– Мікроканальні теплообмінники. Науковці розробляють мікроканальні полімерні теплообмінники, що витягують тепло з корозійних газових потоків та мають низьку вартість. Вони потенційно підвищують ефективність пастеризації та сушіння, уникаючи корозії, і підходять для агресивних середовищ.

Джерела та приклади вторинної енергії в харчовій галузі

Виробничі процеси у харчовій промисловості мають численні точки для відбору тепла. Деякі з них:

– Пастеризування та стерилізування. Гаряча вода чи продукт після пастеризування охолоджується, і при цьому виділяється низькоентальпійне тепло, яке може передаватися сирому продукту чи використовуватися для підігрівання технологічної води. Пластинчасті теплообмінники забезпечують до 95 % рекуперації тепла.

– Кип'ятіння суслу в пивоварінні. Сусло варять, а потім охолоджують; цей процес споживає 25–40 % загальної пари підприємства. Відпрацьоване тепло від варильних котлів або димових газів можна використовувати для підігрівання води чи повітря.

– Сушіння макаронів чи фруктів. Гаряче повітря і пара, що виходять з сушильних камер, можна використовувати для підігрівання свіжого повітря або води.

– Конденсат від теплових процесів. Високотемпературний конденсат після стерилізування чи варіння містить значну кількість енергії. Його повернення в систему парогенерації зменшує витрати палива і води.

– Охолоджувальні машини й компресори. Тепло, що виділяється холодильними установками, може бути використане для підігрівання технологічної води.

– Відпрацьовані гази. Близько 15 % енергії втрачається через димові гази або вихлопне повітря. Технології газ/газ та газ/рідина дозволяють нагріти свіже повітря чи воду для виробничих потреб, навіть коли димові гази містять корозійні компоненти.

– Низькоякісні потоки від двигунів. Наприклад, у дизельних чи газових двигунах тепло в сорочці водяного охолодження (80–90 °С) може бути використане для нагрівання повітря або виробництва холодоагенту через адсорбційні чилери.

Такі джерела тепла можна комбінувати із тепловими насосами чи термобатареями для підвищення ефективності.

Рециркуляція та замкнені цикли

Рециркуляція – це повернення енергетичних потоків або робочих середовищ у технологічний цикл для повторного використання. У харчовій промисловості вона застосовується таким чином:

– Рециркуляція гарячої води після миття обладнання – вода температурою 60–80 °С може використовуватись для попереднього нагрівання наступних порцій води чи продукту, що зменшує потребу в свіжому парі.

– Замкнені системи охолодження. Замість витратних систем, які споживають воду одноразово, використовують закриті контури з технічною водою та теплообмінниками. Це знижує споживання води й дозволяє відбирати тепло для інших потреб.

– Рециркуляція повітря у сушильних камерах. Частина вологого повітря після сушіння може бути повернена для повторного нагрівання, що зменшує потребу у подачі свіжого холодного повітря.

– Циркуляція конденсату. Повернення конденсату із стерилізаційних чи варильних апаратів до котлів знижує витрати палива та хімічних реагентів.

Системи рециркуляції дозволяють скоротити споживання енергії на 10–20 % залежно від виду процесу.

2. Пасивні методи зменшення тепловтрат

Ізоляція – один із найпростіших і найдешевших способів скоротити непродуктивні втрати енергії. Науковці рекомендують ізолювати всі поверхні з температурою понад 49 °С, оскільки теплоізоляція може знизити втрати тепла до 90 %. Деякі літературні джерела вказують, що механічна ізоляція за 11 років дозволила заощадити 85,9 трлн ВТУ та уникнути 7,5 млрд тонн викидів CO₂.

Для досягнення такого ефекту важливо правильно вибрати матеріал та товщину ізоляції. Залежно від температури й середовища використовують кальцієвий силікат, мінеральну вату, скловолокно, пінополіуретан, полістирол, мінераловатні плити чи поліізоціанурат. ДСТУ рекомендують товщину 25–100 мм для парових труб різних діаметрів; це дозволяє підтримувати потрібний тиск пари, запобігати корозії й мінімізувати втрати тепла. Вибір матеріалу також враховує агресивність середовища та можливість намокання: наприклад, кальцієвий силікат застосовують для високотемпературних парових труб, а поліуретанові або полістирольні ізоляції – для холодних ліній.

На практиці на підприємствах, як правило, ізолюють:

– Трубопроводи пари та гарячої води. Відсутність ізоляції спричиняє втрати тепла, збільшує навантаження на котли та перегріває робочі зони. Ізоляція з мінеральної вати, пінополіуретану чи скловолокна знижує тепловіддачу, запобігає опікам персоналу та забезпечує стабільний тиск у системі.

– Резервуари, апарати й теплообмінники. Втрати тепла через стінки варильних котлів, кип'ятильників чи пастеризаторів можуть становити 5–15 % загального балансу. Утеплення стінок і кришок, а також ізоляція кришок люків і фланцевих з'єднань зменшує ці втрати.

– Будівлі й покрівлі. Сучасні утеплювачі на основі мінеральної вати або пінополіуретану у вигляді сендвіч-панелей мають високий коефіцієнт термічного опору та зменшують тепловтрати через огорожувальні конструкції. Вони також захищають від перегрівання влітку, зменшуючи навантаження на кондиціонери.

Всі ізоляційні заходи швидко окуповуються. Їх строки окупності становлять 1–2 роки, оскільки вартість матеріалів порівняно невелика, а монтаж часто виконують

без зупинки виробництва. Крім економії енергії, ізоляція підвищує безпеку обслуговуючого персоналу, зменшує шум та захищає обладнання від корозії.

Неправильне проектування дверей, воріт чи інших прорізів у будівлі може «анулювати» ефект від утеплення. *Plant Engineering* зазначає, що в добре ізольованій будівлі нещільні двері можуть ліквідувати значну частину економії; тепловідбір через інфільтрацію може становити більше половини холодильного навантаження складів. Тому важливо, щоб всі елементи оболонки (стіни, вікна, двері, ворота) були герметичними.

Для виробничих і складських приміщень використовують швидкісні секційні чи рулонні ворота, що відкриваються і закриваються зі швидкістю до 2,5 м/с та мають високоякісні ущільнювачі. Швидке закривання мінімізує проникнення тепла чи холоду. У дослідженні деякі науковців [3, 6] описано, що впровадження високошвидкісних дверей на великому харчовому підприємстві зменшило енергоспоживання на 40 %, оскільки швидке закриття та термоізоляційні панелі скорочують час відкритого прорізу. Для зон з активним рухом матеріалів встановлюють автоматичні таймери, що закривають двері відразу після проходу, а також датчики руху для уникнення зупинок.

Повітряні завіси створюють вертикальний струмінь повітря, який розділяє середовища різних температур, правильно підібрана завіса забезпечує до 90 % герметичності навіть при швидкості вітру 15 км/год, що різко зменшує навантаження на холодильні й опалювальні системи та запобігає утворенню конденсату. У холодильних камерах додатково застосовують прозорі ПВХ-штори.

Інфільтрація виникає через щілини в стиках панелей, отвори для труб і кабелів, дефекти ущільнювачів. Герметизація стиків і використання ущільнювальних стрічок, піноутворювачів та герметиків усуває небажаний обмін повітря. Регулярні обстеження та термографічна діагностика допомагають виявити приховані витоки.

Додатково необхідно контролювати час відкривання дверей. Інструктаж персоналу та встановлення автоматичних закривань дозволяють зменшити час, коли двері залишаються відчиненими, що є особливо важливим для холодильних складів і цехів з кондиціонованою атмосферою. У поєднанні з якісним утепленням це забезпечує суттєве зниження теплових втрат.

Пасивні заходи охоплюють не лише утеплення, а й зменшення внутрішніх тепловиділень та оптимізацію повітрообміну. Зокрема, до цих заходів можна віднести: енергоефективне освітлення, вентиляцію та рекуперацію тепла, контроль вентиляції та автоматизацію.

Розглянемо кожен із цих заходів.

Енергоефективне освітлення. Перехід від ламп розжарювання та люмінесцентних ламп до світлодіодного (LED) освітлення дає змогу зменшити витрати електроенергії до 75 % та збільшити ресурс роботи у 25 разів. LED-лампи виділяють менше тепла, що зменшує навантаження на системи кондиціонування. Додатковий ефект дають датчики руху та датчики денного світла, адже вони автоматично вимикають освітлення в порожніх приміщеннях або регулюють яскравість залежно від рівня природного освітлення, скорочуючи енергоспоживання без зниження комфорту. В системах з автоматичним керуванням освітленням використовують бездротові датчики й таймери, що дозволяють централізовано управляти режимами освітлення у цехах, складах і офісних приміщеннях.

Вентиляція та рекуперація тепла. Зовнішнє повітря необхідне для підтримання санітарних умов, але воно є джерелом теплових втрат чи надмірного охолодження. Системи вентиляції з рекуперацією тепла (*heat-recovery ventilation, HRV*) відбирають тепло з витяжного повітря і передають його припливному. У промислових кухнях і харчових цехах температура витяжного повітря часто перевищує 32 °С, тому відпрацьоване тепло є готовим джерелом енергії. При цьому heat-recovery-системи не змішують повітряні потоки, так як теплообмін відбувається через теплообмінник. У харчових виробництвах для вентиляції часто застосовують систему, де поєднується теплообмінник у витяжному каналі з другим теплообмінником у припливній системі; при правильному розміщенні та фільтрації така система відбирає значну частину тепла без ризику контамінації повітря.

Контроль вентиляції та автоматизація. Підтримання мінімально необхідної кількості обмінів повітря допомагає економити енергію. Сучасні системи керування вентиляцією використовують датчики вуглекислого газу, вологості та летких органічних сполук, щоб регулювати витрату повітря у режимі реального часу. Коли продуктивність виробництва знижується (наприклад, у нічні зміни), система автоматично зменшує витяжку та приплив, зберігаючи нормативну якість повітря. Інтеграція вентиляції з інтелектуальними системами управління будівлею забезпечує узгоджене керування: наприклад, вимкнення або зменшення витяжних вентиляторів у нічний час, коли виробництво зупинено, та автоматичний запуск припливної системи при виявленні підвищеного рівня забруднень.

На харчових підприємствах, де важлива стерильність, застосовують комбіновані фільтри (HEPA, активоване вугілля) та рекуператори, що забезпечують якісне очищення й відбір тепла без змішування потоків. Такі системи скорочують втрати на вентиляцію без шкоди для санітарії, одночасно підтримуючи нормативні умови щодо температури, вологості та чистоти повітря.

Енергоощадність залежить не лише від технічних рішень – велике значення має поведінка персоналу та організація виробничих процесів.

Підвищення компетентності працівників дозволяє реалізувати потенціал технічних заходів, програми навчання повинні поєднувати енергоефективні практики із вимогами безпеки та гігієни: регулярні інструктажі, перевірки та використання автоматизованих систем моніторингу сприяють безпечному й економному використанню енергоресурсів.

Оптимізація логістики всередині підприємства зменшує потребу в частому відкриванні дверей: розміщення складів ближче до виробничих ліній скорочує маршрути транспортування та час перебування дверей у відкритому стані. Впровадження культури «закрий за собою двері» та чіткі процедури користування холодильними камерами дозволяють уникнути надмірних втрат тепла. Крім того, планування робіт таким чином, щоб уникнути простоїв між операціями, зменшує час холостого ходу обладнання.

Енергозбереження має стати частиною корпоративної культури. Успіх досягається, коли керівництво визначає відповідальних за енергоменеджмент, встановлює цілі та регулярно інформує про досягнуті результати.

Навіть дрібні дії – вимкання електрообладнання після роботи, закривання дверей, корегування температурних режимів відповідно до виробничих потреб – можуть забезпечити додаткову економію до 5–10 %. Формування звички вимикати

світло й вентиляцію у приміщеннях, що не використовуються, оперативне усунення витоків пари чи стисненого повітря та своєчасний ремонт ущільнювачів є прикладами простих, але ефективних дій. Важливо поєднувати ці кроки з системами автоматичного контролю, щоб уникнути залежності від людського чинника.

3. Оптимізація графіків роботи обладнання для зниження енерговитрат.

Багато енергоємних процесів у харчовій промисловості можна перенести на періоди, коли тариф на електроенергію нижчий (нічні або вихідні години). Концепція *оптимального розподілу навантаження* передбачає планування роботи обладнання з врахуванням тарифного графіка та пікових навантажень, зокрема:

1. *Нічні зміни.* У регіонах із багатотарифною оплатою доцільно організувати нічні або додаткові зміни для теплових і холодильних процесів.

2. *Планування санітарної обробки.* Виконання СІР-мийок та стерилізування у «позапіковий» час зменшує навантаження на котли та компресори.

3. *Акумуляування енергії.* Використання акумуляторів чи термальних батарей дозволяє накопичувати дешеву нічну енергію та віддавати її вдень. Правильна організація графіків дозволяє знизити пікове навантаження, що не лише економить кошти, а й збільшує надійність енергопостачання.

4. *Теплові насоси й системи з водяними контурами.* Для процесів, що потребують температур до 50 °С, рекомендують використовувати гідравлічні системи замість пари. Це знижує втрати, підвищує безпеку та дозволяє використовувати тепло з низьких температурних рівнів.

5. *Холодильне обладнання на аміаку.* Аміачні холодильні системи мають вищий коефіцієнт ефективності та менший вплив на довкілля порівняно з фреоновими системами.

6. *Цифровізація* дозволяє точно контролювати споживання енергії та прогнозувати потреби. За допомогою сенсорів та аналізу даних підприємства можуть:

- відстежувати споживання по кожній лінії чи обладнанню;
- автоматично запускати чи вимикати установки відповідно до графіка й навантаження;
- інтегрувати прогнози погоди для планування роботи холодильних систем;
- використовувати алгоритми машинного навчання для оптимізації роботи бойлерів та холодильних установок.

5. Приклади використання відпрацьованого тепла на харчових підприємствах

Розглянемо найбільш енергоємні процеси різних технологій виробництва харчових продуктів.

Пастеризування молока є енергоємним процесом, де цільне молоко нагрівають від 5 °С до 72–95 °С із витриманням, а потім швидко охолоджують. За допомогою пластинчастих пастеризаторів із регенерацією тепла можна передавати тепло від гарячого пастеризованого молока до холодного сировинного, що дозволяє відбирати до 90 % енергії. Встановлення теплових насосів дає змогу практично повністю рекуперувати тепло (до 100 %), що майже усуває потребу в додатковій парі. Конденсат та гаряча вода після пастеризування часто повертаються для миття

обладнання або попереднього підігрівання, додатково знижуючи витрати енергії (згідно з ДСТУ 2661:2010).

На харчових підприємствах велика кількість тепла (у вигляді пари та гарячої води) виробляється в котельнях для різних технологічних процесів. Пивоварні та виноробні особливо інтенсивно споживають пару під час кип'ятіння сусла, а при охолодженні сусла віддають значну частину тепла. Відпрацьоване тепло димових газів газових чи біогазових котлів можна спрямувати на нагрівання води чи припливного повітря. У сучасних проектах тепло від бродильних резервуарів використовують для підігрівання технічної води для миття, опалення приміщень або підтримування температури в бродильних камерах. Іноді до систем включають органічні цикли Ренкіна (ORC)* для генерування електроенергії з низькопотенційного тепла.

У м'ясопереробній промисловості значну частину енергії витрачають на охолодження напівфабрикатів та миття обладнання. Тепло, яке виділяють холодильні компресори, може бути використане для підігрівання технічної води чи опалення цехів. Це дозволяє знизити навантаження на окремі бойлери та зменшити потребу холодоагенту, підвищуючи енергоефективність виробництва (згідно з ДСТУ 8379:2015).

Хлібопекарські та кондитерські печі випускають великі обсяги гарячого повітря (200–250 °C). Таке відпрацьоване тепло можна відбирати через газові теплообмінники та використовувати для попереднього підігрівання припливного повітря чи сушіння зерна та інших допоміжних матеріалів. Крім того, гаряче повітря від печей може підтримувати оптимальну температуру у ферментаційних камерах чи на виробничих складах. Завдяки цьому знижується витрата палива на опалення та забезпечується стабільніший температурний режим згідно з ДСТУ ISO 50001:2018.

У цукровій промисловості процеси випарювання бурякового (цукрового) соку, сушіння жому та кристалізування цукру потребують великої кількості пари й тепла. Рекуперація тепла димових газів котлів, пари з випарювальних апаратів та конденсату знижує споживання палива для цих процесів.

У консервному виробництві продукт у стерилізаційних автоклавах нагрівають до високої температури, а потім швидко охолоджують. Під час типового циклу близько 50–60 % енергії втрачається разом з гарячою водою при зливанні. Сучасні енергетичні відновлювачі з багатотанковими системами дозволяють використати тепло фази охолодження та підігріти ним наступний цикл. Це може зменшити витрати пари приблизно на 20–30 %, води – на 45 % та електроенергії – на 25 % у порівнянні зі звичайною схемою, що відповідає вимогам санітарних норм (ДСТУ EN 15961:2013).

Низькопотенційне тепло (70–90 °C) також використовується для генерації холоду через адсорбційні (силікагель/вода) чи абсорбційні чилери. В таких установках теплову енергію (напр., від печей 200–250 °C чи котлів 150–200 °C, від джерела тепла двигуна 80–90 °C) перетворюють на холод з мінімальним споживанням електроенергії. Як зазначає виробник Вру-Air, адсорбційні чилери, що живляться відпрацьованим теплом, майже не споживають електроенергії, працюють безшумно та дають охолодження без фреонів, суттєво знижуючи парникові викиди.

* Органічні цикли Ренкіна (ORC) — це технологія перетворення низькопотенційного тепла (90–300 °C) в електроенергію, що використовує органічні рідини з низькою температурою кипіння замість води.

5. Вплив організаційних заходів на ефективність енергоспоживання

Системний підхід до зниження енергоспоживання на підприємстві передбачає впровадження системи енергетичного менеджменту (EnMS) за стандартом ISO 50001. У 2020 році в Україні прийнято національний стандарт ДСТУ ISO 50001:2020 (ідентичний до ISO 50001:2018) “Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанова щодо використання”, який формалізує цілісний цикл «Plan-Do-Check-Act» (Плануй–Впроваджуй–Перевіряй–Корегуй) для постійного покращення енергоефективності. Сертифікація за ISO 50001 сприяє організації та пріоритетності впровадження енергоефективних технологій та кращому використанню енергоресурсів. Впровадження EnMS допомагає підприємствам оцінити та впровадити нові енергоощадні технології, зробити енергоспоживання більш прозорим і контрольованим, а також поліпшити загальну енергоефективність. У результаті це не лише знижує витрати на енергію, але й зменшує викиди парникових газів – адже покращення енергопродуктивності прямо пов’язане з екологічними вигодами, знижуючи вплив на довкілля. Відтак наявність системи енергоменеджменту згуртовує технічні та управлінські зусилля, розробляється енергетична політика, встановлюються планові показники, ведеться облік і звітування за споживанням. В Україні також діють інші стандарти, що стосуються енергоаудитів і управління енергоспоживанням. Наприклад, прийнято серію ДСТУ EN 16247 (енергетичні аудити) для формалізації проведення енергоаудитів, що містить вимоги та процедури оцінки енерговитрат на підприємствах.

Регулярне проведення енергоаудитів відіграє ключову роль у виявленні основних напрямів втрат і потенціалу економії. Згідно з класифікацією ASHRAE та українських стандартів, за глибиною дослідження розрізняють три рівні енергоаудиту. Рівень I – попередній (побіжний) аудит – швидке обстеження для виявлення найбільш очевидних можливостей заощадження (візуальний огляд обладнання, аналіз архівних даних споживання тощо). Рівень II – докладний енергетичний аудит – всебічний аналіз використання енергії на об’єкті з детальним дослідженням технологічного процесу, розбиттям споживання по енергоспоживачам та попереднім кількісним оцінюванням заходів з енергоощадності (часто з використанням розширених вимірювань на місці та моделей). Рівень III – інвестиційний аудит – вимагає глибокого техніко-економічного обґрунтування капіталовкладень у реконструкцію чи модернізацію енергоємних систем. Енергоаудит включає збір та аналіз технічних даних, перевірку стану обладнання, фіксацію показників витрат енергії і розрахунок рентабельності майбутніх заходів, що дозволяє сформулювати конкретні рекомендації з економії.

Важливим елементом організаційних заходів є постійний моніторинг і контроль споживання. Сучасні системи енергомоніторингу збирають дані в режимі реального часу та часто інтегруються із системами автоматизації підприємства (SCADA, BMS, IoT-платформи). Це дозволяє оперативно виявляти відхилення від запланованих показників і своєчасно реагувати: наприклад, автоматично відключати надлишкові навантаження чи коригувати режими роботи. При побудові системи моніторингу особлива увага приділяється організації регулярних потоків інформації про енергоспоживання по окремих ділянках і технологіях. За вимогами українського стандарту, моніторинг має охоплювати всі підприємство, його основні та допоміжні

виробництва, окремі енергоємні споживачі, енергосистеми, будівлі тощо. Таким чином, поєднання енергоаудитів і реального часу моніторингу створює основу для точного аналізу енергоспоживання та виявлення майбутніх потенційних втрат.

Результатом впровадження організаційних заходів є також зміна корпоративної культури та поведінки персоналу. Навчання співробітників принципам енергоефективності та мотивація заощаджувати енергоресурси формують відповідальне ставлення до витрат енергії. Наприклад, впровадження регулярного інструктажу з користування енергомоніторинговими системами та запровадження стимулів за енергозбереження допомагають виявити додаткові резерви економії без значних капіталовкладень. Експерти з енергоефективності зазначають, що навіть прості організаційні заходи, спрямовані на поведінкові зміни, можуть дати додаткові 5–10 % зекономленої енергії. У широкому розумінні, згуртоване «енергетичне» мислення всього колективу стає невід'ємною частиною роботи. Також важливо відзначити необхідність навчання фахівців-енергоменеджерів, оскільки на місцях звіти про досягнення енергоефективності часто готують саме такі менеджери на основі ДСТУ ISO 50001 та інших стандартів.

Фінансування та управлінські інструменти доповнюють технічні й організаційні заходи. Для реалізації проєктів з енергоефективності українські підприємства можуть залучати різноманітні ресурси: механізми енергосервісних контрактів (ЕСКО), «зелені» кредити, субсидії та державні програми. Наприклад, програма «Доступні кредити 5–7–9%» від держави надає пільгові кредити під мінімальні відсотки (0–7% річних) на придбання енергообладнання з відшкодуванням частини вартості проєкту. Уряд також запроваджує цільові програми кредитування ОСББ та підприємств на заходи з автономного опалення та генерації за рахунок сонця, зі значною частковою компенсацією вартості обладнання. Прозора звітність про досягнуті енерговитрати й заощадження сприяє залученню інвестицій: екологічно відповідальні підприємства стають більш привабливими для партнерів і клієнтів.

Контрольні питання.

1. Які джерела вторинних енергетичних ресурсів (ВЕР) існують і як вони класифікуються за температурою та носієм тепла?
2. Чому низькотемпературне відпрацьоване тепло (<100 °C) є найпоширенішим у харчовій промисловості та як його можна використати?
3. Назвіть найпоширеніші типи теплообмінників, що застосовуються для рекуперації тепла.
4. Які пасивні заходи дозволяють зменшити тепловтрати?
5. Як оптимізація графіків роботи обладнання та технологічних процесів сприяє зниженню енергоспоживання?
6. Наведіть приклади використання відпрацьованого тепла на харчових підприємствах.
7. Які економічні й екологічні вигоди забезпечує використання ВЕР та їх рециркуляція?
8. Чому організаційні заходи (енергоменеджмент, навчання персоналу) є важливими для підвищення ефективності енергоспоживання?
9. Які сучасні технології дозволяють максимально використовувати вторинне тепло?

ТЕМА 5. ВІДНОВЛЮВАНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

1. Огляд видів відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та їх потенціал.
2. Технічні особливості використання сонячної, вітрової та геотермальної енергії.
3. Біоенергетика як складова ВДЕ: біогаз, біодизель, біоетанол.
4. Економічні та правові стимули впровадження ВДЕ в Україні.
5. Приклади застосування ВДЕ на підприємствах харчової галузі.

1. Огляд видів ВДЕ та їх потенціал

Відновлювані джерела енергії (ВДЕ) – це невичерпні або швидко відновлювані ресурси, які забезпечують виробництво енергії без значного викиду парникових газів. До них належать сонячна, вітрова, геотермальна енергія, енергія біомаси та гідроенергія. Для харчової промисловості найбільш актуальні сонячні, вітрові, геотермальні та біоенергетичні ресурси, а також у деяких випадках гідроенергетика або системи «повітря–вода» теплових насосів.

Україна має значний невикористаний потенціал відновлюваної енергетики. За національним енергопланом, частка ВДЕ у кінцевому енергоспоживанні повинна сягти 27% до 2030 року. Наприклад, Німецько-українське енергетичне партнерство оцінило технічний потенціал сонячної енергії в Україні у понад 80 ГВт, що порівняно з потужністю близько 80 ядерних реакторів. Аналогічно, Східноукраїнський дослідницький центр Університету Сіднея показав, що Україна може задовольнити близько 91% своїх енергопотреб за рахунок відновлюваних джерел – переважно сонця і вітру – використавши лише 1% території.

За 2024 рік вітрова енергетика також розвивалася: додано 20,6 МВт нових потужностей, тож загальна встановлена потужність вітроелектростанцій досягла 1 921,4 МВт (включно з окупованими територіями, без урахування Криму). Для досягнення цільових 27% ВДЕ до 2030 року необхідно збільшити потужності вітру щонайменше на 4 ГВт. Офшорний вітровий потенціал Чорного та Азовського морів оцінюють приблизно в 50 ГВт (з них 20 ГВт – плавучі платформи і 30 ГВт – вітроустановки на дні).

Геотермальні ресурси в Україні поки слабо розвинуті, проте їхня енергетична місткість значна. За оцінками Держенергоефективності, економічно доцільний ресурс термальних вод країни становить до 8,4 млн т умовного палива на рік. У більшості регіонів доступні низькопотенційні ресурси (тепло ґрунту або підземних вод), які можна ефективно використовувати за допомогою теплових насосів «земля–вода» або «вода–вода». Натомість високотемпературні геотермальні води локалізовані переважно у Закарпатській та Херсонській областях.

Біоенергетика спирається на біомасу – живі чи нещодавно живі органічні матеріали. В Україні значні обсяги біомаси утворюються в аграрному секторі, зокрема (сільськогосподарські побічні продукти, наприклад солома зернових культур), вторинна (відходи перероблення: жом цукрових буряків, макуха насіння, лушпиння, деревообробні відходи) та органічні рештки тваринництва (гній). Існують також швидкорослі енергетичні культури (верба, тополя, міскантус) і агрокультури для біопалив (ріпак, соняшник – для біодизелю; кукурудза, цукровий буряк – для біоетанолу). Відтак, технічно відпрацьовані проекти дозволяють використовувати

біомасу у твердій (дрова, щепи, пелети), рідкій (біодизель, етанол) або газоподібній (біогаз) формах. Україні під силу не лише задовольняти внутрішні потреби, але й експортувати. Зокрема, оцінено, що теоретичний ресурс біометану країни міг би покрити до 30% річного імпорту газу ЄС.

Щодо гідроенергетики, перспективи малих гідроелектричних станцій (МГЕС) в Україні обмежені географією: великий потенціал зосереджений у Карпатах (200–500 МВт). У харчовій промисловості МГЕС можливі на підприємствах біля річок, але застосовуються рідше.

Класифікація ВДЕ

1. Сонячна енергетика використовує сонячне випромінювання для виробництва електроенергії (фотоелектричні системи (ФЕС)) та тепла (сонячні колектори (СК)). Фотовольтаїчні панелі (на основі кристалічного кремнію або тонкоплівкових матеріалів) перетворюють світло безпосередньо в електрику. СК за допомогою сонячного тепла нагрівають воду до 60–70 °С. Сонячні станції бувають наземними (грунтовими) та даховими/фасадними. Недоліком наземних ФЕС є велика займана площа (приблизно 1,5 га на 1 МВт потужності), а продукція енергії – залежна від сонячного радіаційного потоку. Водночас перевага цього виду енергії – це безшумність, екологічність та відсутність викидів. На харчових підприємствах дахові чи наземні ФЕС можуть покривати суттєву частину електропотреб, особливо в сонячні дні. Системи часто доповнюють акумуляторами, що дозволяють накопичувати надлишки вдень та видавати їх у вечірні години.

2. Вітрова енергетика базується на генерації електроенергії вітротурбінами, які використовують кінетичну енергію повітряних мас. Потужність турбіни залежить від середньої швидкості вітру, діаметра ротора та висоти вежі. Для малих підприємств та фермерських господарств підходять турбіни від десятків кВт до кількох сотень кВт. Головна перевага цього виду енергії – генерація може тривати цілодобово, якщо є вітер, мінуси – необхідність значної території (із гарним обтіканням і достатніми середніми швидкостями, зазвичай >5–6 м/с) та регулярного техобслуговування. Зазвичай вітрові ферми розташовують у степових або прибережних зонах. Комбінація з сонячними ФЕС і батареями дозволяє вирівняти загальну генерацію. Великі агрохолдинги можуть орендувати землю для встановлення кількох турбін і продавати надлишок електроенергії за довгостроковими контрактами.

3. Геотермальна енергетика використовує тепло землі для опалення та охолодження (через теплові насоси «грунт–вода», «вода–вода»). Температура ґрунту на глибині 80–100 м у помірному кліматі стабільно коливається в межах +10...+14 °С. Системи геотермальних насосів є екологічними, оскільки знижують CO₂ майже на 95% у порівнянні зі старими котельнями та енергоефективними, так як на 1 кВт·год електроенергії вони дають 3–5 кВт·год тепла (коефіцієнт перетворення 3–5). Недоліком цього виду енергії є висока капітальна вартість монтажу, оскільки потребує буріння свердловин чи прокладення полів трубопроводів та потреба в електриці для роботи насосів. Проте в харчовій промисловості геотермальні теплові насоси можна використовувати для опалення/охолодження приміщень і технологічних процесів, особливо у великих складах холодильної техніки для підтримання стабільної температури або у складських приміщеннях для систем кондиціонування.

4. Біоенергетика об'єднує технології перероблення біомаси у тверде, рідке та газоподібне паливо. Наприклад, біомаса у твердому вигляді (дрова, деревні тріски, пелети з соломи тощо) може спалюватись в котлах чи печах., біодизель виготовляють із рослинних олій (соняшникової, ріпакової) або тваринних жирів та використовують як заміник дизпалива в двигунах, біоетанол – це спиртове паливо, яке одержують з цукровмісних та крохмалевмісних культур (кукурудза, цукровий буряк, цукрова тростина), біогаз утворюється при анаеробному бродінні органічних відходів (гній, відходи тваринництва, стічні води, харчові відходи), він складається з метану 60–70% та CO₂. Очищений (збагачений) біометан може транспортуватися трубопроводами та замінити природний газ.

До основних видів біомаси можна віднести: сільськогосподарські рештки (солома, кукурудзяні стебла), відходи перероблення (жом цукрового виробництва, макуха при виробництві олій), гній, енергетичні дерева (верба, тополя).

5. Гідроенергетика та інші. Великі ГЕС переважно не використовуються у харчовій галузі через розташування, оскільки їх не будують спеціально для підприємств. Натомість малі гідроелектростанції (МГЕС) на невеликих річках або греблях можуть бути встановлені, якщо завод розташований поруч із водним потоком.

Також розглядають інноваційні рішення: теплові насоси «повітря–вода» для тепла, біоводень (паливо з біомаси) та інші майбутні технології.

2. Технічні особливості використання сонячної, вітрової та геотермальної енергії

Сонячні електростанції (СЕС) застосовують фотоелектричні модулі та інвертори для перетворення сонячного світла в електрику. На підприємствах харчової промисловості СЕС часто встановлюють на дахах виробничих та складських будівель, адже це не потребує додаткової земельної ділянки. СЕС забезпечують суттєву економію, оскільки витрати на електроенергію можуть знижуватись на 40–70%, а термін окупності систем складає зазвичай 4–6 років (з урахуванням державної підтримки). Після погашення інвестицій СЕС здатні генерувати «дешеvu» електроенергію щонайменше 25–30 років.

Ключові переваги сонячних електростанцій для харчового виробництва – це їх енергетична автономність та стабільність. Наприклад, СЕС потужністю 100–500 кВт, встановлена на молокозаводі чи пекарні, може покривати 40–80% добового споживання такої електроенергії. У сонячний день підприємство здатне працювати майже на власній генерації, особливо якщо надлишок накопичується в батареях. Це дає впевненість у роботі під час аварійних відключень, навіть при постійних відключеннях з пусками резервних дизель-генераторів, СЕС забезпечують базову напругу та продовжують забезпечувати енергією основні лінії виробництва.

Для харчових підприємств з високим споживанням електрики (наприклад, холодильні комплекси м'ясопереробних заводів, пекарні, комбикормові заводи) СЕС особливо корисні, так як вони зменшують навантаження на мережу і суттєво скорочують витрати на енергію. У комбінації з накопичувачами (батареями) СЕС перетворюються на енергетичні хаби, які вдень акумулюють надлишок, а вночі або у пікові години віддають його підприємству. Сучасний ринок відзначає значне здешевлення таких накопичувачів, так як ціни з 2019 до 2025 року впали майже в 8–

10 разів, що забезпечує окупність «сонячно-акумуляторних» комплексів за 3–5 років. Внаслідок цього підприємства можуть знижувати енергозатрати додатково на 20–40% завдяки гнучкому розподілу генерації.

Вітрові турбіни перетворюють кінетичну енергію вітру на електричну. Вітрова система складається з ротора із лопатями, що обертаються, та генератора на башті. Найкраще вітрові СЕС працюють у регіонах із середньорічною швидкістю вітру понад 5–6 м/с (зазвичай це морське узбережжя чи відкриті степи). Потужність однієї турбіни зазвичай становить від кількох сотень кВт (для невеликих систем) до декількох МВт (для великих ферм).

Для харчових підприємств застосовують локальні вітропарки на площадках підвищеної висоти, наприклад, фермерські господарства з земельними ділянками можуть встановлювати вітроагрегати 100–500 кВт. На великомасштабних агрокомплексах, наприклад елеватори, зернопереробні заводи, олійноекстракційні комбінати, можливе розміщення декількох турбін та продаж електроенергії за «зеленими» аукціонами або РРА-контрактами.

Важливим технічним аспектом є те, що вітрові СЕС потребують достатньої площі між турбінами (через ефект затінення потоку) та надійної опори. Крім того, за відсутності вітру генерація зупиняється, тому часто рекомендують комбінувати вітропарки з іншими джерелами (сонцем або дизель-генераторами) для покриття періодів шттилю. Зараз в Україні ведеться розвиток офшорних вітропарків у Чорному морі, потенціал яких, за різними оцінками, сягатиме десятків гігават. Проте реалізація цих проєктів залежить від стабілізації безпекової ситуації.

Геотермальні теплові насоси забезпечують опалення та охолодження за рахунок тепла землі. Установка системи «грунт–вода» або «вода–вода» передбачає буріння свердловин (60–100 м) або прокладання горизонтальних контурів у ґрунті. Тепловий насос витягує тепло з ґрунту/ґрунтових вод та перетворює його на теплу воду для опалення, а влітку може працювати у зворотному режимі (охолодження).

До переваг геотермальних систем можна віднести їх стабільність, так як температура землі на глибині становить в межах 10–14 °С й майже не змінюється (впродовж року) та високу ефективність. Навіть при вуличній температурі –20...–30 °С геотермальний насос може забезпечувати обігрівання будівель, бо джерелом є глибинне тепло. Коефіцієнт перетворення сучасних насосів становить близько 3–5:1, тобто з 1 кВт·год електроенергії вони дають 3–5 кВт·год тепла. Це дозволяє зменшити собівартість тепла на 50–80% порівняно з газом чи електродкотлами.

У харчовій галузі геотермальні теплові насоси застосовують здебільшого для опалення складських приміщень та виробничих цехів, найбільше це стосується холодильних комплексів і сховищ заморожених продуктів. Хоча капітальні витрати на встановлення теплового насоса досить високі (приблизно 900–1500 євро за 1 кВт теплової потужності), довгострокова економія при підвищених тарифах на газ та електроенергію робить такі проєкти вигідними. Крім того, геотермальна система безшумна і надійна (працює понад 25–30 років), що забезпечує безперебійну підтримку заданої температури.

3. Біоенергетика як складова ВДЕ: біогаз, біодизель, біоетанол

Біоенергетика базується на використанні *біомаси* – органічної маси рослинного або тваринного походження.

Існують три основні групи аграрної біомаси:

– Первинна біомаса – це побічні продукти вирощених культур, такі як солома зернових, кукурудзяні стебла, деревина та тріска.

– Вторинна або промислова біомаса – це відходи сільськогосподарського виробництва та перероблення. Сюди можна віднести пульпу цукрових буряків, макуху олійних культур, лушпиння насіння, торф, дров'яні відходи, а також відходи харчових підприємств.

– Гній та гноєзбірні суміші – це відходи тваринництва (великої та дрібної рогатої худоби, свинарства, птахівництва), що використовуються в якості сировини для біогазових установок.

Є також спеціальні *енергетичні культури* – це швидкорослі дерева, такі як верба, тополя, міскантус та культури для біопаливних заводів, до яких можна віднести сільськогосподарські культури з високим вмістом олії або цукрів (ріпак, соняшник для біодизелю; цукровий буряк, кукурудза для етанолу).

Біомасу можна використовувати непереробленою (спалюючи як паливо) або перетворювати на біопродукти. Так, *біодизель* – це очищена рослинна олія, зазвичай з ріпаку або соняшнику, яка модифікована для використання у двигунах; *біоетанол* – спирт, отриманий з ферментації цукрів з кукурудзи чи буряку.

Біогазові установки або анаеробні реактори зброджують органічні рештки, утворюючи при цьому суміш метану та CO₂. Біогаз може використовуватись на місці у когенераційних установках для генерації електроенергії і тепла або очищуватись до стану біометану та продаватися як газ.

У світі та Україні дедалі частіше впроваджують великі промислові біогазові комплекси (БГК) на базі харчових підприємств. Наприклад, на Теофіпольському цукровому заводі (Хмельницька область) в 2017–2018 рр. почала працювати перша черга БГК із потужністю 5,109 МВт, де перетворювався цукровий жом. У червні 2018 р. увімкнено другу чергу потужністю 10,5 МВт, яка використовує кукурудзяний силос. Сумарна потужність після запуску двох черг склала 15,6 МВт. Даний проект передбачає подальший розвиток: третя і четверта черги (6 МВт та 4,5 МВт), які використовуватимуть солому і нові високонавантажені технології, доводячи загальну потужність комплексу до 26,1 МВт – це робить його одним із найбільших у світі. Важливо, що зведення комплексу частково профінансоване ЄБРР (встановлено реактори Jenbacher і інше обладнання світових брендів). Цей кейс демонструє, як харчовий завод, в даному випадку цукровий, може стати енергетичним хабом, перетворюючи відходи виробництва на електрику й тепло.

Інший приклад – Глобинський біоенергетичний комплекс (Полтавська область) компанії «Астарта-Київ». У 2014 році тут запрацював один з найбільших в Україні БГК з виробничою потужністю понад 60 млн м³ біогазу на рік. Основна сировина – це сирий цукровий жом та органічні відходи сільського господарства. БГК згенерований біометан заміщує природний газ на виробництві соєпереробного та цукрового заводів агрохолдингу. Проект обладнаний установками німецьких та швейцарських виробників, зведений за підтримки ЄБРР.

Крім великих агрегованих комплексів, на рівні підприємств харчової галузі спостерігається активне поширення невеликих біогазових установок потужністю 200–500 кВт, які встановлюються безпосередньо на фермах, тваринницьких комплексах і переробних підприємствах. Такий формат є особливо привабливим для

середніх і великих господарств, оскільки дозволяє ефективно утилізувати органічні відходи без необхідності транспортування їх на сторонні об'єкти. Зокрема, молокозаводи, м'ясокомбінати, птахофабрики та сиробні підприємства впроваджують локальні біореактори, що переробляють відвітки, сироваткові стоки, кров, жировмісні залишки, гній або послід у біогаз шляхом анаеробного зброджування.

Отриманий біогаз використовується як паливо для котлів або газопоршневих когенераційних установок, що дозволяє одночасно виробляти електроенергію та теплову енергію. Тепло спрямовується на забезпечення технологічних процесів – сушіння продукції, пастеризування, стерилізування, миття обладнання, підігрівання води та обігрів виробничих приміщень. Електроенергія може використовуватися для власних потреб підприємства або частково передаватися в мережу. Наприклад, на птахофабриках біогаз із курячого посліду використовується для підтримання стабільного температурного режиму в інкубаторах, брудерах і зерносушарках, що забезпечує автономність виробництва та знижує витрати на природний газ. Додатково перевагою є отримання дигестату – органічного добрива, яке може використовуватися на полях господарства, формуючи замкнений цикл ресурсокористування.

Окрім виробництва біогазу, біоенергетичні рішення застосовуються і для виготовлення рідких видів біопалива. На спиртових заводах частину етилового спирту спрямовують на виробництво біоетанолу, який може використовуватися для заправки власного автотранспорту, роботи генераторів або змішування з традиційними моторними паливами. Олійно-жирові комбінати, у свою чергу, мають можливість переробляти частину власної продукції – соняшникової, ріпакової чи пальмової олії — у біодизель, який використовується для потреб автопарку, навантажувачів, сільськогосподарської техніки та стаціонарних двигунів.

Інтеграція біопалива у внутрішню логістику харчових підприємств — доставку сировини, перевезення готової продукції, обслуговування складів — сприяє зниженню залежності від традиційних нафтопродуктів, зменшенню витрат на пальне та скороченню викидів парникових газів. У довгостроковій перспективі такі рішення підвищують енергетичну автономність підприємств, зміцнюють їхню екологічну репутацію та відповідають принципам циркулярної економіки, коли відходи одного процесу стають ресурсом для іншого.

Таким чином, біоенергетика не лише сприяє енергетичній незалежності, заміщаючи імпортований газ, а й вирішує екологічну задачу – утилізацію відходів. Наприклад, значні обсяги цукрового жому та меляси, відходи з тваринницьких ферм спрямовують на утворення біогазу замість скидання у довкілля. В результаті застосування біоенергетичних технологій зменшуються викиди шкідливих речовин та попит на викопні енергоносії.

4. Економічні та правові стимули впровадження ВДЕ в Україні

В 2023–2024 роках енергетична політика в Україні зазнала важливих реформ під впливом війни та євроінтеграції. Закон № 3220-IX («про відновлення та зелену трансформацію енергосистеми») реформував систему підтримки ВДЕ. Він поступово замінив старий «зелений тариф» (фіксовану ціну покупки ВДЕ) новими ринковими інструментами:

– Замість фіксованих тарифів вводяться конкурси на будівництво нових об'єктів, де переможці отримують право на підтримку. Перемога на аукціоні дає право на «ринкову премію» – доплату до ринкової ціни електроенергії, що розраховується як різниця між старим зеленим тарифом (або очікуваною ринковою ціною) та актуальною ринковою ціною електроенергії. Таким чином стимулюється конкуренція і залучаються проекти з реальною рентабельністю.

– Відмова від обов'язкової купівлі у «гарантованого покупця». Раніше державне «Гарантоване підприємство» мало обов'язок купувати всю вироблену «зелену» електрику за фіксованою ціною. Закон дозволив виробникам виходити з цієї системи і продавати енергію на ринку за конкурентною ціною, збільшуючи гнучкість продажу. За бажанням компанія може й далі залишатися у системі «Гарантованого покупця» за умовами зеленого тарифу, але має право вибору.

– Запроваджено електронну систему сертифікатів, що підтверджують «зелений» характер виробленої електроенергії. Виробник ВДЕ отримує ГПо за кожну МВт·год та може продавати його окремо від електрики. Це – новий інструмент, що приваблює компанії з ESG-стандартами та інвесторів, адже вони можуть декларувати екологічність спожитої енергії.

– Механізми «нет-білінгу» та самоспоживання. Для домогосподарств та малого бізнесу закон впровадив статус «активного споживача» з чистим обліком (net billing). Це означає, що власник СЕС (на даху чи прибудові) може віддавати надлишки в мережу і сплачувати лише за різницю між спожитою та переданою енергією. Такий механізм робить інвестиції в сонячні панелі привабливими навіть для малих виробництв, дозволяючи їм зменшити рахунки за електрику. Крім того, створено законодавче підґрунтя для контрактів на різницю та розширено можливості для експорту «зеленого» струму з України. У сукупності реформи створюють конкурентний ринок ВДЕ і прямі стимули до інвестицій у нові проекти.

У сфері податкової політики запроваджені пільги для зменшення витрат на закупівлю обладнання для ВДЕ. Зокрема, у грудні 2025 р. Верховна Рада продовжила звільнення від ПДВ імпорту обладнання для будівництва вітрових та сонячних електростанцій, систем накопичення енергії, газопоршневої та газотурбінної генерації на період 2026–2028 рр.. Це стосується як нових вітро- і сонячних турбін, так і накопичувачів та генераторних установок. Така пільга значно знижує капітальні витрати на запуск об'єктів ВДЕ.

Також є низка програм підтримки: ЄБРР, ЄС та USAID надають пільгові кредити і гранти підприємствам на енергоефективність та встановлення ВДЕ. Наприклад, ЄБРР долучився до будівництва великих СЕС і БГК (Теофіполь, Глобине) частково через свої кредитні лінії.

Важливим чинником є стрімке здешевлення технологій. За оцінками, в останні роки вартість акумуляторів для зберігання енергії впала в 8–10 разів (з 2019 до 2025 р.), що робить сонячно-акумуляторні системи економічно привабливими. Завдяки цьому деякі компанії вже отримують зниження енергетичних витрат на 20–40% щорічно при застосуванні батарей разом із СЕС (за рахунок оптимізації пікових навантажень та енергетичного арбітражу).

У відповідь на енергетичні шоки та вимоги до енергонезалежності бізнес стає активним інвестором у ВДЕ. За даними опитування, у 2024 р. близько 20% українських промислових підприємств уже інвестували у власну генерацію з ВДЕ, тоді як рік тому таких було лише 6% (за даними VoxUkraine). І

майже 40% планують реалізувати проекти з власної генерації у найближчі роки, переважно вибираючи сонячні (51%) та вітрові (25%) станції.

Для харчової галузі ці інвестиції є критично важливими, оскільки встановлення власної СЕС на підприємстві дозволяє заощаджувати десятки відсотків на електроенергії (реальні кейси говорять про 40–70% економії) й забезпечити виробництво від перебоїв. Біогазові установки, у свою чергу, перетворюють дороговартісні відходи на безкоштовні енергоносії. Комбінація сонця, вітру, геотермальної та біоенергії дає змогу створювати локальні енергетичні хаби на території підприємств, роблячи їх гнучкішими та менш чутливими до дефіциту енергії під час надзвичайних ситуацій.

5. Приклади застосування ВДЕ на підприємствах харчової галузі

Дохів та земельні СЕС все ширше впроваджуються на підприємствах харчової галузі. Наприклад, виробник молочних продуктів «Молокія» (Тернопільський молокозавод) буде сонячну електростанцію, що покриватиме близько 10% річного енергоспоживання заводу. СЕС вже встановлюють середні молокозаводи (потужністю 300–500 кВт), які заощаджують 40–60% електрики; хлібокомбінати і пекарні (станції по 200–400 кВт) можуть покрити до 70% свого денного споживання.

Під час військових відключень багато підприємств змонтували мобільні ФЕС із батареями, що дозволяють підтримувати мінімальну роботу ліній навіть без зовнішньої мережі. Деякі компанії укладають РРА-контракти* або використовують механізм чистого обліку, де вони продають надлишок сонячної електрики у мережу за пільговим тарифом і купують за потреби назад, мінімізуючи фінансові ризики.

Вітрові турбіни в харчовій галузі впроваджуються поки що рідше, ніж сонячні електростанції чи біогазові комплекси, однак інтерес до цього напрямку поступово зростає, особливо з боку великих агрохолдингів і зернотрейдерів. Це пов'язано з тим, що підприємства аграрного сектору часто мають у своєму розпорядженні значні земельні ресурси з придатними вітровими умовами, а також розгалужену інфраструктуру електроспоживання (елеватори, зерносушарки, комбикормові заводи, млини), яка потребує стабільного енергозабезпечення.

Зокрема, окремі елеватори та зернопереробні підприємства орендують або виділяють власні земельні ділянки для встановлення кількох вітротурбін потужністю 2–5 МВт кожна. Вироблену електроенергію вони можуть частково використовувати для покриття власних потреб (самоспоживання), а надлишок – реалізовувати через ринкові механізми, зокрема на аукціонах або за двосторонніми договорами купівлі-продажу електроенергії (РРА*). Такий підхід дозволяє диверсифікувати джерела доходу та зменшити залежність від коливань тарифів на електроенергію.

Для підприємств із сезонним характером навантаження (наприклад, інтенсивна робота зерносушарок у період жнив) вітрова генерація може стати ефективним інструментом часткового покриття пікових потреб. Крім того, вітрові електростанції мають вищий коефіцієнт використання встановленої потужності порівняно із сонячними в регіонах із достатнім вітровим потенціалом, що підвищує економічну доцільність інвестицій у довгостроковій перспективі.

Особливо перспективним є поєднання сонячних панелей і вітротурбін на одному майданчику в межах гібридних енергетичних систем. Така комбінація дозволяє вирівнювати профіль генерації: вітер, як правило, є інтенсивнішим у нічний час та в осінньо-зимовий період, тоді як сонячна генерація досягає максимуму вдень і влітку. Завдяки цьому сумарне виробництво електроенергії стає більш стабільним і

прогнозованим, що зменшує потребу в резервних джерелах або дорогій електроенергії з мережі. У поєднанні з системами накопичення енергії (акумуляторними батареями) або гнучким управлінням навантаженням підприємства можуть досягати високого рівня енергетичної автономності.

Деякі великі комбінати зберігання та замороження продуктів інвестують у *геотермальні теплові насоси* для опалення або охолодження. Наприклад, складські термохолодильні комплекси (м'ясокомплекси, великі фруктосховища) використовують системи «грунт–вода» та «вода–вода» для підтримки сталої температури. Хоча такі системи потребують великих капіталовкладень, вони окупаються завдяки економії: тепло від ґрунту є практично безкоштовним, а додаткові витрати – це лише електрика на перекачування. В регіонах з помірною зимою (де тарифи на газ високі) геотермальні насоси можуть обігрівати приміщення за собівартістю на 60–80% нижчою за газові котли.

Біогазові комплекси дозволяють підприємствам харчової галузі перетворювати органічні відходи на енергію. Як було зазначено вище, приклади Теофіпольського та Глобинського БГК демонструють практичне вирішення проблеми утилізації відходів і одночасний вихід на «дешеву» електроенергію. Окрім великих проєктів, існують менші фермерські БГК (200–500 кВт) на молокозаводах і свинокомплексах: вони збирають гній, відвійки та сироваточні стоки, генерують біогаз і живлять свої теплові котельні та електростанції.

Завдяки поєднанню різних джерел – сонця, вітру, геотермії і біомаси – харчова промисловість може створити гнучкі енергетичні «острівці» з відновлюваною генерацією. У період війни та економічних викликів створення власних енергетичних хабів стає не лише економічно вигідним, а й стратегічним кроком для збереження робочих місць і задоволення потреб споживачів.

*PPA-контракти (Power Purchase Agreement) — це довгострокові договори (зазвичай 5–20 років) про купівлю-продаж електроенергії між виробником (часто з відновлюваних джерел, ВДЕ) та покупцем. Вони фіксують ціну, обсяги та умови постачання, забезпечуючи бізнесу стабільні тарифи, а виробникам — гарантований збут, що сприяє інвестиціям у "зелену" енергетику.

Контрольні питання.

1. Перелічіть основні види відновлюваних джерел енергії та оцініть їхній потенціал для харчової галузі.
2. Як працюють фотовольтаїчні панелі та сонячні колектори? Які переваги й недоліки цих систем у промисловому застосуванні?
3. У чому полягають особливості розвитку вітрової енергетики в Україні та які існують перспективи офшорних вітроустановок?
4. Які види геотермальних ресурсів існують і як їх використовують у харчовій промисловості?
5. Які сільськогосподарські та промислові відходи можуть слугувати сировиною для біоенергетичних технологій (біогазу, біодизелю, біоетанолу)?
6. Які законодавчі та економічні стимули підтримують впровадження відновлюваних джерел енергії в Україні?
7. Як перехід на ВДЕ впливає на енергетичну незалежність та зменшує викиди парникових газів?
8. Які основні бар'єри та проблеми виникають при впровадженні ВДЕ у харчовій промисловості?

ТЕМА 6. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ТЕПЛОМАСООБМІННИХ ПРОЦЕСАХ

1. Види тепломасообмінного обладнання в харчовій промисловості.
2. Фактори, що визначають енергоспоживання сушарок, випарників, ректифікаційних апаратів.
3. Застосування багатокорпусних випарників і пульсаційних сушарок.
4. Використання механічної пари та теплових насосів для зменшення витрат енергії.
5. Приклади підвищення ефективності сушильних і випарних установок.

1. Види тепломасообмінного обладнання в харчовій промисловості

У харчовій галузі відбувається величезна кількість теплових та масообмінних операцій. До них належать сушіння, випарювання, концентрування соків та сиропів, дистиляція та ректифікація, пастеризування, охолодження та заморожування продукції. Відповідно, використовують різні види теплообмінного й масообмінного обладнання, а саме:

– *Сушарки* – це апарати для видалення вологи з продуктів. За принципом дії вони поділяються на конвективні, контактні (барабанні), розпилювальні, вакуумні, пульсаційні тощо. У харчовій промисловості поширені стрічкові й барабанні сушарки для крохмалю та макаронів, шахтні для овочів, розпилювальні для молока і кави, плівкові для дріжджів. Сушіння є одним з найбільш енергоємних процесів. За оцінками дослідження різних науковців, промислове сушіння становить 10–20 % від загального споживання енергії в промисловості, при чому велика частина енергії витрачається на забезпечення латентної теплоти випаровування води та на інші втрати;

– *Випарники та концентратори* – це апарати, що призначені для згущення розчинів, сиропів і соків шляхом випаровування води. У харчовій галузі використовують одно-, дво- та багатокорпусні випарники, а також установки з примусовим циркулюванням повітря. Багатокорпусні системи застосовують, щоб багаторазово використати теплоту конденсації випарів, зменшуючи потребу у свіжій парі;

– *Ректифікаційні колони та дистиляційні апарати* – використовуються для розділення сумішей, наприклад під час виробництва спирту чи оцту. Ці колони споживають значні обсяги енергії. Оптимізування роботи ректифікаційних колон (підбирання співвідношення теплової та масової подачі, вибір оптимального тиску, утилізація тепла продуктів) має вирішальне значення для зменшення енерговитрат;

– *Теплообмінники різних типів* – пластинчасті, трубчасті, кожухотрубні, зі скребковими елементами для пастеризування, стерилізування та охолодження. Вони забезпечують ефективне передавання теплоти між різними середовищами;

– *Теплові насоси та рекуператори* – це апарати для використання низькоякісного тепла від вихідних потоків. Теплові насоси перекачують теплоту від холодніших потоків до більш гарячих, підвищуючи температуру до корисного рівня. Використання теплонасосних технологій у харчовій промисловості дозволяє скоротити енергоспоживання до 70 % порівняно з традиційними системами.

2. Фактори, що визначають енергоспоживання сушарок, випарників і ректифікаційних апаратів

Це ключове питання для всієї теми енергозбереження в тепломасообмінних процесах, тому що у більшості харчових виробництв (молочна галузь, виробництво соків, концентратів, сушених продуктів, спирту, цукру тощо) саме сушіння, випарювання і ректифікація “з’їдають” до 60–70 % усієї теплової енергії підприємства. Тому розуміння того, що саме формує ці витрати, — це вже половина оптимізування.

Енергетичні витрати на тепломасообмінні процеси обумовлені фізико-хімічними властивостями продукту, параметрами обладнання та умовами експлуатації. До основних факторів, що впливають на енергоспоживання можна віднести:

1. Вміст вологи та властивості матеріалу.

Найважливішим фактором є початкова вологість продукту, що піддається сушінню або концентруванню. Чим більша масова частка води у сировині, тим більша кількість теплоти необхідна для її випаровування.

Однак у харчових матеріалах вода знаходиться у різних формах:

- вільна волога, яка легко видаляється;
- капілярна волога, що утримується порами матеріалу;
- адсорбційно зв’язана волога, пов’язана з колоїдними структурами білків, пектинів або крохмалю;
- хімічно зв’язана волога, що практично не видаляється без руйнування структури продукту.

Для видалення зв’язаної вологи необхідна значно більша кількість енергії, ніж для випаровування вільної води. Саме тому на випаровування води припадає лише близько 40–55 % загальних енерговитрат у сушильних установках. Решта енергії витрачається на нагрівання самого продукту; нагрівання повітря або пари; втрати тепла через стінки апарата; відведення відпрацьованого теплоносія.

Наприклад, у виробництві сухого молока значна частина енергії витрачається саме на руйнування зв’язків води з білками казеїну.

2. Температура та режим сушіння/випарювання.

Температура є основним рушійним фактором тепломасообміну. Підвищення температури теплоносія збільшує швидкість випаровування; скорочує тривалість процесу; зменшує габарити обладнання.

Високі температури прискорюють процес, але можуть погіршувати якість продукту. Надмірно високі температури можуть викликати недоліки готового продукту, зокрема денатурування білків; карамелізування цукрів; втрату ароматичних речовин; зміну кольору продукту.

Зниження тиску (вакуумне сушіння або випарювання) дозволяє проводити процес при нижчих температурах кипіння. Наприклад, при атмосферному тиску вода кипить при 100 °С; а при тиску 20 кПа – вже при 60 °С.

Це надзвичайно важливо для термочутливих продуктів (соки, молочні концентрати). Однак створення вакууму потребує роботи насосів, що збільшує витрати електроенергії. Таким чином, оптимальний режим визначається компромісом між швидкістю процесу, якістю продукції та сумарними енерговитратами.

3. Теплова ізоляція та конструкція апарату.

Конструктивні особливості сушарок та випарників істотно впливають на енергоефективність. У однокорпусних випарниках вторинна пара після конденсації не використовується повторно, що призводить до великих втрат теплоти.

У багатокорпусних випарниках пара з першого корпусу використовується як теплоносії у наступному; тиск у кожному наступному корпусі зменшується; температура кипіння знижується.

Це, в свою чергу, дозволяє зменшити витрати свіжої пари у 1,5–3 рази та знизити питомі енерговитрати до 50–70 %.

Такі системи широко застосовуються у виробництві згущеного молока, томатної пасти, фруктових концентратів та цукрового сиропу.

Недостатня теплоізоляція корпусу випарного апарату може спричинити втрати до 10–15 % теплової енергії, що еквівалентно значним фінансовим витратам на масштабах підприємства.

У сушарках важливе значення має швидкість і напрямок руху теплоносія, турбулізація потоку, а також наявність контактних поверхонь. Неефективне змішування призводить до нерівномірного прогрівання та збільшення енерговитрат.

У багатьох процесах після випаровування та конденсації залишаються теплові потоки низької температури. Якщо їх не використовувати, енергія втрачається. Встановлення рекуперативних теплообмінників чи теплових насосів дозволяє використати цю теплоту для підігрівання вихідних потоків та зменшити загальні витрати енергії.

3. Застосування багатокорпусних випарників і пульсаційних сушарок

Традиційні однокорпусні випарні установки мають низьку ефективність – на кожен кілограм вологи, що випаровується потрібно близько 1 кг свіжої пари. Багатокорпусні випарники вирішують цю проблему, використовуючи пару з попереднього етапу як теплоносії для наступного. У двокорпусних системах можна заощадити до 50 % пари, а застосування трьох та більше етапів дає ще більшу економію. Принцип дії багатокорпусних випарників такий: в першому корпусі продукт нагрівається та випарюється під високим тиском, пара, що утворюється, конденсується у теплообміннику наступного корпусу, де тиск нижчий. Цей цикл повторюється в декількох корпусах, що дозволяє повторно використовувати теплоту конденсації.

Переваги багатокорпусних випарників:

1. Високий рівень утилізації тепла. Завдяки тому, що використовується вторинна пара, потреба у свіжій парі значно менша й тепло від конденсації використовується багаторазово.

2. Низький тиск та низькі температури в кінцевих етапах, що є важливим для термолабільних продуктів (соки, сиропи), які можуть руйнуватися при високих температурах.

3. Можливість поєднання з іншими технологіями. Сучасні системи часто доповнюють тепловими насосами або механічною компресією пари, що ще більше зменшує потребу у свіжій парі.

Недоліком багатокорпусних систем є необхідність збільшення теплообмінної площі та капіталовкладень, оскільки з кожним додатковим етапом економія пари зменшується, а вартість обладнання зростає. Оптимальне число корпусів визначається техніко-економічними розрахунками.

Окрім традиційних сушарок, у харчовій промисловості розробляють інноваційні технології, що дозволяють скоротити витрати енергії. Однією з таких є *пульсаційна сушарка*. Вона застосовується для сушіння рідких та пастоподібних продуктів (соки, концентрати, молоко, олії). Принцип її роботи полягає у використанні коротких теплових імпульсів (пульсів), що утворюються внаслідок швидких циклів горіння. Ці імпульси миттєво розпилюють та нагрівають краплини рідини, що забезпечує надзвичайно короткий час контакту із гарячим середовищем, завдяки чому пульсаційна сушарка споживає на 20–30 % менше енергії, ніж традиційні розпилювальні сушарки, та дозволяє працювати з більш в'язкими рідинами і високими концентраціями сухих речовин.

Порівняно зі звичайними розпилювальними сушарками, імпульсні системи мають вищу теплову ефективність і можуть скоротити час сушіння. Водночас вони складніші у конструкції та вимагають точного регулювання параметрів

Інші енергоощадні технології сушіння включають сушарки з використанням мікрохвильових та радіочастотних полів, інфрачервоного нагрівання, а також пульсуючу барботажну сушарку, де вихрові потоки забезпечують інтенсивне перемішування та покращують тепломасоперенесення.

4. Використання механічної пари та теплових насосів для зменшення витрат енергії

Механічна компресія пари (Mechanical Vapor Recompression – MVR) – це технологія, що набуває поширення у випарних установках та сушарках. Суть процесу полягає в тому, що пару, утворену під час випаровування, не відводять в атмосферу, а спрямовують у компресор, де вона стискається. Внаслідок стиснення температура та тиск пари підвищуються, і вона використовується як теплоносіє для того ж процесу. Таким чином замість постійної подачі свіжої пари відбувається замкнений циркуляційний цикл. За даними технічного опису компанії Vasculex (Китай), використання MVR дає змогу скоротити споживання енергії на 70–90 % порівняно з традиційними системами випарювання.

Основні переваги цієї технології:

1. Суттєве зменшення споживання пари й палива. Оскільки вторинна пара повторно використовується як теплоносіє, потреба у свіжій парі знижується до мінімуму.

2. Комерційна ефективність. Хоча обладнання (компресори) дороге, економія палива швидко окупує інвестиції. MVR-системи можуть досягати до 70 % енергозбереження за рахунок вискоелективних компресорів та теплообмінників.

3. Висока якість продукту та гнучкість. Технологія дозволяє проводити випаровування та сушіння при нижчих температурах, що корисно для термолабільних речовин. Стиснута пара стерильна та не містить забруднень, тому може безпосередньо контактувати з харчовими продуктами.

4. Масштабованість. MVR може застосовуватися як для малих (кілька сотень кілограм на годину), так і для великих заводських потужностей (до десятків тонн на

годину), розміри компресора та теплообмінника підбирають відповідно до продуктивності.

Застосування MVR особливо ефективно у виробництві згущеного молока, фруктових концентратів, при випаровуванні відходів після перероблення крохмалю чи сироватки, а також у виробництві біостанолу та біодизелю.

Теплові насоси (ТН) – це пристрої, що переносять теплоту від більш холодного джерела до теплого, використовуючи для цього механічну енергію. У харчовій промисловості вони можуть працювати як компресійні теплові насоси (електричні) або адсорбційні/абсорбційні (теплогазові). При обігріві та нагріванні води ТН забезпечують коефіцієнт перетворення (COP) 4–6, тобто з 1 кВт·год електроенергії генерується 4–6 кВт·год тепла. Це дає можливість до 70 % знизити енерговитрати порівняно з традиційними котлами.

Особливо ефективно ТН працюють у комбінації з випарниками та сушарками, оскільки відбувається підтягування низькоякісного тепла. Випари після конденсації або тепле повітря з сушарки мають температуру 30–50 °С і не можуть бути використані безпосередньо. ТН підвищують їх до 60–80 °С, що дозволяє застосовувати це тепло для попереднього нагрівання продукту чи теплоносія.

Теплові насоси мають певні обмеження, це висока ціна, ефективність падає при температурах понад 80–100 °С, потреба в джерелі низькоякісного тепла. Однак для температурного діапазону, який характерний для харчових підприємств (40–80 °С), вони вважаються одними з найбільш економічних технологій енергозаощадження.

5. Приклади підвищення ефективності сушильних і випарних установок

На практиці для зниження енерговитрат у сушарках застосовують комплекс заходів:

1. Зменшення навантаження на сушарку. Перед сушінням проводять механічне зневоднення (пресування, центрифугування) або попереднє випарювання, щоб видалити частину вологи. Це зменшує кількість енергії, необхідної для випаровування. Оптимізація вимог до кінцевої вологості продукту (уникнення надмірного пересушування) також знижує енерговитрати.

2. Покращення теплоізоляції та герметизації апаратів. Якісна ізоляція корпусів та трубопроводів, відсутність підсмоктування холодного повітря зменшують теплові втрати.

3. Використання регенерації та рекуперації тепла. У багатьох сушильних установках встановлюють теплообмінники для підігрівання свіжого повітря за рахунок вихідного. Сучасні системи включають пластинчасті або роторні регенератори, де теплота переноситься між потоками.

4. Оптимізація операційних параметрів, зокрема регулювання швидкості подачі повітря та його температури, підтримання оптимальної швидкості конвекції та турбулентності. Наприклад, підвищення швидкості повітря прискорює випаровування, але занадто високі швидкості збільшують гідравлічний опір і витрати енергії на вентилятори.

5. Використання систем теплових насосів. Як зазначалося, теплові насоси у сушарках забезпечують циркуляцію і повторне використання тепла вихідного

повітря, що може забезпечити суттєву економію енергії. Вони також зменшують викиди вологи та запахів в атмосферу, що важливо для екології.

6. Нові технології сушіння. Запровадження пульсацийних сушарок дозволяє досягати 20–30 % економії енергії порівняно з традиційними розпилювальними сушарками. Використання мікрохвильових та інфрачервоних сушарок забезпечує швидкий нагрів без нагрівання всього об'єму повітря.

Для забезпечення енергозбереження у випарниках і ректифікаційних апаратах застосовують комплекс заходів:

1. Підвищення ступеня теплоутилізації. Найефективніший спосіб – перехід на багатокорпусні випарники або інтеграцію теплових насосів. У харчовій промисловості виробники згущеного молока, фруктових концентратів та пивоварні активно впроваджують такі системи. Наприклад, використання трьохефектного випарника із тепловим насосом дозволяє досягти тієї ж ефективності, що й чотири-ефектні системи, але зі значно нижчим енергоспоживанням.

2. Оптимізація режимів дистиляції. Дистиляційні колони мають багато ступенів (тарілок) і працюють з великою кількістю теплоносія, тому оптимальна подача пари до ректифікаційної колони і регулювання знижують енерговитрати, зберігаючи високу чистоту продукту. Використання технології теплового інтегрування дозволяє використати теплоту конденсату для підігрівання вихідного потоку.

3. Утилізація вторинних потоків. Відпрацьований теплий конденсат та дренаж можна використовувати для попереднього нагрівання сировини, для підігрівання води на мийття або у системі тепlopостачання підприємства. Таким чином створюється єдина система енергоменеджменту.

4. Приведення технологічних операцій до мінімальних енерговитрат. Наприклад, у виробництві спирту зневоднення сировини до підвищених концентрацій перед ректифікацією знижує навантаження на колону. Використання високоактивних ферментів та ферментація при оптимальних температурах зменшує кількість побічних продуктів і, відповідно, енергетичні витрати на їх видалення.

Контрольні питання.

1. Назвіть основні види тепломасообмінного обладнання та їхнє призначення у харчовій промисловості.

2. Чому сушіння вважається одним із найбільш енергоємних процесів і які види сушарок використовують для різних продуктів?

3. Поясніть принцип роботи багатокорпусних випарників і їхнє значення для економії пари.

4. Які фізико-хімічні фактори та параметри обладнання визначають енергоспоживання сушарок, випарників та ректифікаційних колон?

5. Що таке пульсацийна сушарка і які її переваги у порівнянні з традиційними сушарками?

6. Опишіть механічну компресію пари (MVR) та її переваги для випарних установок.

7. Як теплові насоси та рекуператори використовують низькоякісне тепло для зниження енерговитрат?

8. Наведіть приклади удосконалення теплових схем, що дозволяють підвищити ефективність сушіння і випарювання.

9. Як різні форми води в матеріалах (вільна, капілярна, адсорбційно зв'язана, хімічно зв'язана) впливають на енергетичні витрати сушіння?

ТЕМА 7. ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ У ХОЛОДИЛЬНИХ СИСТЕМАХ

1. Типи холодильних машин і холодоагентів для харчової промисловості.
2. Методика проведення енергоаудиту холодильних систем.
3. Заходи з підвищення ефективності: вибір холодоагенту, теплоізоляція, регулювання температури.
4. Використання відпрацьованої теплоти конденсаторів для технологічних потреб.
5. Вплив режимів роботи на довговічність і енергоспоживання холодильників.

Холодильні системи в харчовій промисловості відіграють ключову роль у збереженні якості та безпеки продуктів, але при цьому є значним споживачем енергії. Ефективне енергозбереження в таких системах дозволяє знизити витрати виробництва та скоротити негативний вплив на довкілля. Наступні розділи розкривають основні аспекти, пов'язані з класифікацією обладнання та холодоагентів, проведенням енергоаудиту, заходами підвищення ефективності, використанням відпрацьованої теплоти та впливом режимів роботи на ресурси та енергоспоживання холодильних установок.

1. Типи холодильних машин і холодоагентів для харчової промисловості

Холодильна машина – це комплекс обладнання, призначений для відведення теплоти від об'єктів, що охолоджуються. У більшості промислових холодильних системах застосовується парокомпресійний цикл, при якому холодоагент випаровується у випарнику (забираючи тепло у продуктів або охолоджувальної рідини), потім його пара стискується компресором, конденсується у конденсаторі з віддачею теплоти навколишньому середовищу, а через дросельний (розширювальний) пристрій знижується тиск і температура для нового циклу. Окрім компресійних систем, у харчовій промисловості також іноді застосовують абсорбційні холодильні установки (де енергія затрачується у вигляді тепла, наприклад, від парової мережі чи відходів виробництва) та кріогенні методи охолодження (рідким азотом або CO₂) для швидкого заморожування продукції. У малопотужних приладах іноді використовуються термоелектричні модулі, але їхнє застосування обмежене низьким ККД.

Основні типи холодильних машин можна згрупувати наступним чином. *Компресійні холодильні установки* найбільш поширені в харчовій галузі. Вони містять один або кілька компресорів (поршневих, гвинтових, спіральних, рідше – відцентрових).

- Поршневі компресори застосовуються в середніх холодильних установках; мають змінну продуктивність і досить прості в обслуговуванні.
- Гвинтові компресори використовуються для холодильників великої потужності; забезпечують плавне регулювання продуктивності та надійну безперервну роботу.
- Спіральні компресори компактні, з малою кількістю рухомих частин, часто встановлюються в комерційному торговельному холодильному обладнанні.
- Відцентрові компресори характерні для дуже великих систем (чиллерів на середніх температурах) – рідко зустрічаються в стандартних харчових цехах, але використовуються у великих промислових комплексах.

Компресори можуть бути герметичними, напівгерметичними або відкритими (з приводом від електродвигуна); вибір типу залежить від масштабу системи та технологічних вимог. Часто в харчовому виробництві великі установки будуються з відокремлених компресорно-конденсаторних агрегатів (на відкритій конструкції) для забезпечення безпеки (наприклад, при використанні токсичних холодоагентів).

Абсорбційні холодильні установки працюють на тепловому циклі (переважно використовуються розчини аміаку в воді або літій-бромід). Замість компресора вони мають абсорбер, де холодоагент поглинається у розчині, а потім відділяється за рахунок подачі тепла від зовнішнього джерела (котла, теплового насоса тощо). Такі системи споживають тепло, а не електроенергію для приводу компресора. Абсорбційні установки менш поширені в харчовій сфері, але можуть бути виправданими там, де є надлишок «безкоштовного» тепла (наприклад, у комплексах з когенерацією або відходами тепла з технологічних процесів).

Кріогенні системи застосовують охолодження дуже низькотемпературними рідинами або газами. Зокрема, рідкий азот (N_2) або рідкий діоксид вуглецю (CO_2) використовують для миттєвого (шокового) заморожування харчової продукції. Такі методи забезпечують дуже швидке зниження температури, але вимагають спеціального обладнання та безпеки. Кріогенні технології часто використовують для інноваційних чи невеликих цехів глибокого заморожування.

Вибір типу холодильної машини (компресорної, абсорбційної, каскадної тощо) залежить від температурних вимог технології (наприклад, заморожування до $-40^{\circ}C$ чи охолодження до $+3^{\circ}C$) та наявних енергоресурсів.

Холодоагенти (рефрижеранти). Сучасні холодильні системи використовують як природні, так і синтетичні холодоагенти. Природні холодоагенти мають близькі до нуля ООН-потенціал (ODP) і часто невеликий потенціал глобального потепління (GWP). У харчовій промисловості найбільш поширеним є *аміак* (NH_3 , R717), він має високий тепловиділяючий потенціал, низький GWP (майже 0), і за своєю термодинамікою є дуже ефективним. Проте аміак отруйний та горючий, тому компресорно-конденсаторні агрегати зазвичай розміщують поза виробничими приміщеннями, з додатковими системами контролю й безпеки.

Інший природний холодоагент – *вуглекислий газ* (CO_2 , R744). Він нетоксичний, має GWP=1, але працює при дуже високих тисках. CO_2 часто використовується у каскадних системах (наприклад, вища ступінь: CO_2 , нижча – аміак або гліколь) або окремо для великих систем охолодження, особливо в супермаркетах і великих складах. Є ще група вуглеводнів: наприклад, *пропан* (R290) та *ізобутан* (R600a) – вони мають високий ККД і майже нульовий GWP, але надзвичайно легкозаймисті. Ці холодоагенти застосовують в основному у невеликих кількостях (малогабаритні морозильники, торгівельні вітрини) відповідно до галузевих правил, що враховують об'єм заправки та заходи безпеки.

Серед синтетичних найбільш відомі *гідрофторвуглеці (HFC)* – наприклад, R134a (видалений з деяких застосувань через високий GWP) чи суміші типу R404A/R507. Однак міжнародна практика (Парижський договір, «Фреонова угода» Кігалі, Регламент ЄС «F-Gas») стимулює поступове виведення старих HFC із високим GWP. Натомість розроблено альтернативи з нижчим GWP. Такі сучасні холодоагенти дозволяють зменшити вплив на клімат і водночас зазвичай підтримують порівняно високу ефективність системи.

Важливо, що згідно з міжнародними стандартами, всі холодоагенти класифіковані за групами безпеки: *A1, A2, A3, B1, B2, B3* – де А/В визначає токсичність, а цифри 1–3 – горючість. Так, «A1» (нетоксичні, негорючі) – наприклад, CO₂; «B2» – аміак (отруйний); «A3» – пропан (легкозаймистий). Ця класифікація впливає на вибір конструкції холодильних машин (зони встановлення, системи витяжки, датчики безпеки). Отже, при проектуванні та модернізуванні холодильних систем для харчових підприємств обирають холодоагенти з урахуванням балансу між енергоефективністю, екологічною безпекою та вимогами безпеки (наприклад, у відповідності до ДСТУ EN 378 та настанов виробника обладнання).

2. Методика проведення енергоаудиту холодильних систем

Енергоаудит холодильного устаткування – це комплексна діагностика системи з метою виявлення енерговитрат та потенціалів для економії. Він включає збір даних про споживання та умови роботи, технічний огляд обладнання та детальний аналіз показників ефективності.

Як правило, енергоаудит проводять в декілька етапів:

1. Первинний аналіз та підготовки. Аудитори збирають вихідну інформацію, до якої відноситься перелік холодильних машин і камер, їхньої потужності, періоди роботи, графіки навантажень, обсяги виробництва. Аналізуються попередні рахунки за електроенергію, а також технічні описи та плани обслуговування обладнання. На цьому етапі формується загальне уявлення про систему, а саме де і коли споживається найбільше енергії, які компоненти є слабкими місцями тощо.

2. Огляд на об'єкті. Фахівці оглядають холодильне обладнання в роботі, оцінюють стан компресорів, конденсаторів, випарників, регульованих клапанів, насосів та автоматики. Виконуються вимірювання, зокрема записуються значення температур і тисків на вході/виході компресора, напрями потоків, електрична потужність компресорів та вентиляторів (за допомогою вольтметрів/амперметрів), швидкості циркуляційних насосів; перевіряють герметичність систем (витоки холодоагенту) та стан теплоізоляції камер і трубопроводів; аналізуються цикли розморожування: які методи (електричний, паровий, гарячим газом) і з якою періодичністю застосовуються. Визначаються втрати холоду через відкриття дверей, неконтрольовані підпори, несправні ущільнювачі тощо.

3. Аналітичне оброблення даних. На основі зібраних вимірювань виконується розрахунок теплого балансу та показників ефективності. Для кожної холодильної машини оцінюють її коефіцієнт продуктивності (COP) чи питому витрату енергії на одиницю холоду (наприклад, кВт·год/т·добу); порівнюють фактичну продуктивність з паспортними даними та довідковими нормативами, виявляють відхилення. Далі аналізується вплив зовнішніх умов (температура навколишнього середовища, вологість) й визначають найбільш енерговитратні вузли та процеси: наприклад, пошкоджені теплообмінники, часті пуски/зупинки компресорів, тривалі та необґрунтовані цикли розморожування. Враховується також втрати енергії через непродуктивну роботу (наприклад, вентилятори конденсатора, що працюють на холостому ходу, чи недостатнє регулювання ємності холодильних камер).

4. Звіт і рекомендації. За підсумками аналізу готується технічний звіт, у якому наводяться висновки про енергоспоживання та його причини, а також пропонуються конкретні заходи з оптимізації. До можливих рекомендацій можуть входити: модернізація або заміна окремих компонентів (наприклад, компресора, конденсатора), встановлення додаткових вузлів (других вентиляторів, буферних резервуарів холодоносія), налаштування автоматики, посилення теплоізоляції, покращення графіків обслуговування та дефросту тощо. Часто в аудиті також розраховують економічний ефект, для чого оцінюють строки окупності інвестицій у модернізацію. Практика показує, що після впровадження рекомендацій енергоаудиту підприємства можуть досягти економії електроенергії холодильних систем у межах десятків відсотків.

Таким чином, енергоаудит холодильних систем – це системний інструмент для виявлення неефективностей, від технічних несправностей (витік холодоагенту, забруднені теплообмінники, пошкоджена ізоляція) до неправильних налаштувань і режимів роботи. Регулярне проведення енергоаудиту (згідно з вимогами системи енергоменеджменту ISO 50001 та національними положеннями) дозволяє підтримувати холодильні установки в оптимальному стані та контролювати енергоспоживання.

3. Заходи з підвищення ефективності

Після виявлення слабких місць системи холодильників практичною задачею є впровадження заходів, які скорочують втрати енергії та підвищують коефіцієнт корисної дії (COP). До основних таких заходів належать:

1. Вибір і заміна холодоагенту на більш енергоефективний. Як було зазначено, сучасні “екологічні” холодоагенти часто мають кращі термодинамічні характеристики. Нові холодоагенти можуть працювати при оптимальному тиску конденсації та випаровування, а їхні суміші краще адаптовані до контролю над температурою. Водночас при виборі потрібно враховувати безпеку (наприклад, обмежувати заправку вуглеводнями до допустимої кількості) і конструктивні вимоги обладнання.

2. Якісна теплоізоляція об’єктів і системи. Втрати тепла крізь стіни, двері та перекриття холодильної камери безпосередньо збільшують навантаження на холодильну установку. Тому критично важливо використовувати сучасні теплоізоляційні матеріали (наприклад, спінений поліуретан, мінеральну вату високої щільності, вакуумні панелі) у конструкціях стін, стелі та дверей камер. Захист теплоізоляції від механічних пошкоджень, пилу та вологи теж має бути забезпечений. Регулярно перевіряють цілісність усіх ущільнювачів і неметалевих панелей, адже щілини навіть у кілька міліметрів можуть призводити до значних тепловтрат. Удосконалення системи обігріву борту дверей (якщо такі є) та монтаж повітряних завіс або ПВХ-штор над відкритими дверима теж зменшує проникнення теплого зовнішнього повітря в камери. Усі ці заходи дозволяють мінімізувати теплоприплив ззовні і відповідно скоротити споживання енергії.

3. Точне регулювання температурних режимів та автоматизація. Правильне налаштування температур є ключовим, не слід охолоджувати сильніше, ніж це потрібно для технології. Наприклад, якщо умовне промислове морозильне приміщення налаштоване на -20°C , опускання до -25°C зазвичай не додає користі, а

лише витрачає зайву енергію. Для цього застосовують високоточні терморегулятори та контролери, що забезпечують мінімальні відхилення від заданого режиму. Необхідно налаштувати гистерезис термостатів таким чином, щоб уникати надто частих вмикань/вимикань компресора.

Автоматизовані системи управління дозволяють запускати компресори за потребою і змінювати їхню частоту обертання залежно від реального навантаження. Наприклад, на гвинтових агрегатах широко використовують частотні перетворювачі – це дає можливість поступово регулювати потужність холодильної машини без його вмикання, що суттєво підвищує ККД на часткових навантаженнях. Крім того, оптимізація циклів розморожування (наприклад, перехід з жорсткого графіка на режим «за запитом», коли розморожування вмикається тільки при фактичній наявності криги) дозволяє зекономити до 10–15% енергії, що витрачається на обігрів. Усі датчики (температури, тиску, рівня рідини) мають бути справними та відкаліброваними – адже навіть дрібні збої у зчитуванні призводять до неефективної роботи.

Крім цих основних напрямків, до інших заходів ефективності відносять: установку додаткових теплообмінників-економізаторів між високим і низьким контуром (передача тепла від нагнітання фреону на вході компресора до рідкого фреону після конденсатора для підсвічування), монтаж змінної швидкості циркуляційних насосів і вентиляторів, зв'язування холодильних агрегатів у каскадні або модульні схеми для більш рівномірного розподілу навантаження. Наприклад, у великих холодильних комплексах встановлюють два-три компресори меншої потужності замість одного великого. Це дозволяє запускати тільки необхідну кількість машин при зменшеному навантаженні без втрати ефективності. Практичні приклади показують, що поєднання зазначених заходів може призвести до зниження енергоспоживання систем холодопостачання на 20–30% або більше, залежно від вихідного стану обладнання.

4. Використання відпрацьованої теплоти конденсаторів для технологічних потреб

У роботі будь-якого компресійного холодильного агрегату тепло, що виділяється у конденсаторі, є «відпрацьованим» – воно не потрібне охолоджувальним задачам, але все одно є тепловою потужністю, яка зазвичай викидається в атмосферу. Проте ця теплова енергія має цінність і її можна утилізувати для інших цілей підприємства. Використання відпрацьованої теплоти дозволяє компенсувати частину паливних чи електроенергетичних витрат, необхідних для забезпечення технологічних або побутових потреб.

Далі наведемо типові приклади можливого застосування:

1. Підігрівання технологічної води (СІР, пастеризування тощо). Багато харчових виробництв вимагають гарячу воду для миття обладнання (процес СІР – «Clean-In-Place»), стерилізування ліній або пастеризування продукту. Тепло з конденсатора можна передавати через промислові теплообмінники у водяний контур теплоутилізації. Наприклад, якщо конденсатор холодильника може нагріти воду від 15°C до 40°C при витраті 1000 л/год, то це замінє роботу бойлера або теплої підлоги. Часто така рекуперация дозволяє повністю покривати потребу у воді з температурою

близько 40°C. При належному плануванні досягається економія палива чи електроенергії котельні.

2. Опалення та підігрівання приміщень. У холодну пору року утилізоване тепло може спрямовуватися у систему опалення виробничих чи допоміжних приміщень (через калорифери чи теплові насоси). Для простих рішень ставлять два конденсатори: один викидає тепло в атмосферу (для теплої пори року), інший приєднаний до гідросистеми опалення (для зими). Сучасні установки можуть працювати з одним конденсатором, оснащеним перемикачем чи автоматикою для направлення потоку теплоносія то у зовнішній теплообмінник, то у внутрішню мережу залежно від потреби. Використання теплоти конденсації для обігріву дозволяє у середньому на 30–50% знизити витрати на опалення в сезон, зберігаючи стабільну температуру у приміщеннях.

3. Технологічні потреби (сушіння, пастеризування, вентиляція). Певні виробничі операції вимагають теплоти середніх температур, наприклад, конвективне сушіння повітря, опалення сушильних камер, підігрівання повітря системами вентиляції чи теплові процеси. Теплова енергія конденсатора може доповнити або замінити інші джерела тепла в цих процесах. Навіть невелике підвищення температури технологічного повітря на кілька градусів (з 20° до 30–35°C) за рахунок відпрацьованої теплоти сприяє підвищенню продуктивності процесів сушіння або забезпечує більш сприятливий мікроклімат.

4. Попереднє підігрівання робочих середовищ. На ряді підприємств використовують систему попереднього підігрівання холодоносіїв чи інших рідин за рахунок конденсаційного тепла, зменшуючи навантаження на основні котельні установки. Наприклад, у морозильних комплексах інколи частину низькопотенційного тепла направляють на підігрів антивідморожувальних розчинів або невеликих теплоакумуляторів.

У термодинамічному плані існують два основні способи відбору теплоти з холодильного контуру – через зону перегріву (так званий «гарячий газ») та через рідку фазу холодоагенту після конденсатора. Обидва методи базуються на використанні теплоти, яка в стандартному холодильному циклі зазвичай відводиться в навколишнє середовище через конденсатор, але в системах рекуперації вона може бути корисно використана для технологічних або побутових потреб підприємства.

У першому випадку теплота відбирається від перегрітого пароподібного холодоагенту безпосередньо після компресора, коли його температура є максимальною. Частину потоку стиснутого гарячого газу спрямовують до спеціального теплообмінника (десупергітера), де теплота передається теплоносію – воді або іншій рідині. Оскільки температура холодоагенту на цьому етапі може досягати 90–120°C (залежно від типу холодоагенту та режиму роботи), такий метод дозволяє отримувати воду з температурою 80–90°C. Це актуально для процесів, що потребують підвищених температур: нагрівання мийних розчинів у харчовій промисловості, пастеризування, стерилізування, підігрівання технологічних контурів або навіть забезпечення окремих стадій дистиляції.

У другому випадку теплота відбирається з рідкої фази після конденсації холодоагенту, тобто з основного потоку тепла, що виділяється під час фазового переходу «пара–рідина». Тут доступна значно більша кількість теплоти, оскільки враховується прихована теплота конденсації. Проте температура теплоносія в цьому

разі є нижчою – зазвичай до 50–60°C, що відповідає температурі конденсації в стандартних умовах. Такий рівень температури є достатнім для систем опалення приміщень, підготовки гарячої води для санітарних потреб, підігріву технологічної води або роботи низькотемпературних сушильних процесів.

У складніших енергетичних системах обидва підходи комбінують: спочатку теплота перегріву використовується для високотемпературних потреб, а потім залишкова теплота конденсації – для низькотемпературних споживачів. Така каскадна схема дозволяє максимально повно утилізувати енергію холодильного циклу, підвищити загальний коефіцієнт енергоефективності системи (COP) та зменшити навантаження на традиційні джерела тепlopостачання.

5. Вплив режимів роботи на довговічність і енергоспоживання холодильників

Режим експлуатації холодильного обладнання має вирішальний вплив на його надійність і витрати енергії. Невірна організація роботи (надмірне навантаження, часті пуски) призводить до швидкого зношування компонентів та зростання споживання. Основні аспекти режимів і їхній вплив такі:

1. *Частота пусків і зупинок компресора.* Кожний старт компресора вимагає пускового струму і спричинює механічні поштовхи в системі. Якщо холодильник постійно пускається і вимикається через короткі цикли (наприклад, через занадто малий гистерезис регулятора чи нерівномірний вхід продуктів), це значно збільшує електроспоживання і навантаження на електродвигун. Більше того, часті стресові стрибки зменшують ресурс підшипників і ущільнень. Тому вкрай важливо забезпечити оптимальний час роботи між циклами (щоб компресор не вимикався після 1–2 хвилин роботи, що є недопустимо короткою), а також застосовувати буферні ємності чи модульоване керування, щоб зменшити надлишкову кількість стартів.

2. *Навантаження обладнання (перенавантаження та простій).* Якщо холодильна камера завантажена вище розрахункової маси або якщо цех має великі температурні втрати, компресор працює тривало і може не встигати охолодити обсяг. Це призводить до безперервного режиму роботи з високими тисками, перегрівання агрегатів та поганого змашування. При такому режимі ККД падає, а зношування системи зростає. З іншого боку, занадто рідкі цикли (тривалі простой) можуть призвести до обмерзання випарника чи утворення грибка в камері. Крім того, якщо обладнання регулярно включається при високій різниці температур, наприклад, коли після тривалої зупинки відразу завантажують велику партію теплового продукту, це збільшує споживання. Оптимально слід дотримуватися режиму поступового навантаження та забезпечувати стабільні умови перед кожним запуском.

3. *Цикли розморожування.* Неправильний режим розморожування (занадто частий або занадто тривалий) підвищує енерговитрати і може шкодити компресору, через занадто великий приплив теплового повітря. Перехід на адаптивні методи, коли розморожування відбувається лише при досягненні заданого рівня обмерзання, дозволяє економити електрику. Занадто жорсткі графіки розмороження, коли агрегат вручну зупиняють після фіксованого проміжку часу, також можуть бути неефективними. Тому для забезпечення енергозбереження рекомендується використовувати автоматичні програми з контролем стану випарника.

4. *Умови навколишнього середовища.* Висока температура та вологість у виробничих приміщеннях збільшують теплове навантаження на холодильну систему, змушуючи її працювати в більш напруженому режимі. Зокрема, перегрітий конденсатор не може ефективно відводити тепло, що знижує COP, а зайва вологість сприяє швидшому обмерзанню випарників і збільшує необхідність дефростування. Також не рекомендується розміщувати компресорно-конденсаторні агрегати в гарячих камерах, вентиляція та відділення у гарячих цехах є обов'язковими.

5. *Технічне обслуговування та моніторинг.* Хоча це не чисто «режим», проте від перевірок залежить, чи вчасно виявлені збої режиму. Рекомендовано здійснювати регулярне інспектування не менше 1 разу на квартал, перевіряючи при цьому показники тиску та температур за даними датчиків, стан та герметичність фреонового контуру, чистоту теплообмінників. Навіть незначне відхилення, наприклад, забруднений фільтр-осушувач, впливає на ефективність роботи обладнання та може сигналізувати про потребу коректування режиму. Як зазначають фахівці, виконання базових інструкцій з експлуатації, а це регулярне розморожування, очищення датчиків, запобігання перевантаженню камери тощо, може подовжити строк служби обладнання в 1,5–2 рази, у той час як ігнорування режимних вимог прискорює старіння агрегатів і призводить до різкого зростання енергоспоживання. Наприклад, постійне перебування компресора в режимі “без вимикання” у побутовому холодильнику часто вказує на витік холодоагенту або перевантаження – аналогічні ризики існують і в промислових системах.

Підсумовуючи вищенаведене, збалансований режим роботи холодильників забезпечує довгу та економічну експлуатацію. Поєднання адаптивного управління, зокрема частотних перетворювачів, плавного завантаження камер, своєчасного обслуговування та автоматизованих програм дефростування разом дозволяють мінімізувати витрати енергії і продовжити ресурс обладнання. Натомість постійні стресові режими, такі як часті цикли, надмірне навантаження, порушення температурних значень, призводять до падіння ефективності та неефективного використання ресурсів систем, підвищуючи при цьому операційні витрати.

Контрольні питання.

1. Порівняйте основні типи холодильних машин – компресійні, абсорбційні та криогенні. У яких випадках доцільне використання кожного виду?
2. Поясніть принцип роботи пароконпресійного холодильного циклу (випарник, компресор, конденсатор, дросельний пристрій).
3. Які природні та синтетичні холодоагенти застосовуються в харчовій промисловості та які чинники враховують при їх виборі?
4. Що включає методика проведення енергетичного аудиту холодильних систем?
5. Які заходи забезпечують підвищення енергоефективності холодильних установок?
6. Як відпрацьовану теплоту конденсаторів можна використовувати для опалення чи підігрівання води на підприємстві?
7. Чому режими роботи (частота запусків, рівень навантаження) впливають на довговічність та енергоспоживання холодильників?
8. Які сучасні технології дозволяють зменшити споживання енергії при заморожуванні продукції?
9. Як регуляторні вимоги щодо використання холодоагентів (наприклад, відмова від фреонів) впливають на вибір обладнання?

ТЕМА 8. РЕСУРСОЗБЕРЕЖЕННЯ У ХАРЧОВІЙ ПРОМИСЛОВОСТІ

1. Поняття вторинних матеріальних ресурсів та їх класифікація.
2. Економічні та екологічні мотиви впровадження ресурсозбереження.
3. Методи оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій.
4. Приклади комплексного використання побутових продуктів і відходів.
5. Вплив ресурсозбереження на конкурентоспроможність та екологічну безпеку.

Початок ХХІ століття позначився гострою необхідністю раціонального використання природних ресурсів. Харчова промисловість відіграє ключову роль у задоволенні потреб населення, але водночас її виробничі процеси супроводжуються інтенсивним споживанням сировини, енергії й води. За оцінками дослідників, близько 30 % операційних витрат у харчовому виробництві припадає на енергоресурси, а частина сировини перетворюється на відходи. Через зростання цін на енергоносії, обмеженість природних ресурсів та посилення вимог до екологічної безпеки підприємства повинні впроваджувати ресурсозберігаючі технології.

Ресурсозбереження в харчовій промисловості варто сприймати як відповідь на три взаємопов'язані виклики: (1) обмеженість та подорожчання ресурсів (сировина, вода, енергія), (2) екологічні вимоги і відповідальність за утворені відходи, (3) конкуренція, де виграє той, хто перетворює втрати на додану вартість. У сучасній українській навчальній і науковій літературі акцент робиться на тому, що багатокомпонентність агропродовольчої сировини і промислових процесів природно породжує побічні продукти й відходи, але значна частина цих потоків може бути перетворена на корисні продукти або енергію за допомогою механічної, термічної чи хімічної обробки.

Отже, ресурсозбереження у харчовій промисловості охоплює зменшення споживання первинної сировини, повторне використання побічних продуктів та енергії, а також мінімізацію втрат на всіх етапах життєвого циклу продукції.

1. Поняття вторинних матеріальних ресурсів та їх класифікація

Вторинні матеріальні ресурси – це матеріали, що утворюються як побічні продукти або відходи первинного виробництва і можуть бути повернуті в економічний обіг. Агентство із захисту довкілля США (EPA) визначає вторинні матеріали як не основні продукти промислових секторів; це можуть бути відходи, залишки чи брухт, які здатні замінити первинні матеріали, зменшуючи витрати, зберігаючи природні ресурси та скорочуючи забруднення. Європейська платформа Circular Economy Stakeholder Forum підкреслює, що вторинна сировина отримується з відходів або продукції, що завершила свій життєвий цикл; вона замінює первинну сировину і має переваги (зменшення залежності від обмежених природних ресурсів, скорочення відходів та негативного впливу на довкілля) та недоліки (невідомо якість або склад).

Щоб ресурсоощадна політика була керованою, потрібна державна та корпоративна система класифікації відходів. У національній системі таким інструментом є Державний класифікатор України “Класифікатор відходів” ДК 005-96. У самому документі наведено визначення відходів як речовин і предметів, що утворюються у процесі виробництва та життєдіяльності людини, не мають подальшого призначення за місцем утворення і підлягають видаленню чи переробці

для захисту довкілля і здоров'я або для повторного залучення як матеріально-сировинних і енергетичних ресурсів.

Класифікацію вторинних матеріалів можна здійснювати за декількома ознаками. *За походженням відходи поділяють на:*

1. Побутові відходи – відходи домогосподарств; їх характер залежить від рівня життя та структури споживання.

2. Комерційні відходи – утворюються на підприємствах торгівлі, ресторанного господарства тощо.

3. Промислові відходи – залишки сировини, енергії й матеріалів, що залишаються після виробництва продукції. Їх обсяг та склад залежать від профілю підприємства; зокрема, харчова промисловість утворює органічні відходи та побічні продукти.

4. Медичні та біологічні відходи – потребують спеціальної утилізації, оскільки містять біологічно активні чи небезпечні речовини.

5. Відходи гірничої, будівельної та сільськогосподарської діяльності – утворюються на шахтах, будівельних майданчиках, фермах та включають породу, будівельне сміття, рослинні рештки тощо.

Цей перелік не є вичерпним; він демонструє, що вторинні ресурси охоплюють різноманітні потоки матеріалів, які утворюються у різних секторах господарства.

В таблиці 8.1. наведено розподілення вторинних ресурсів за матеріальним складом .

Таблиця 8.1. – Розподілення вторинних ресурсів за матеріальним складом

| Категорія | Приклади та характеристика |
|----------------------------------|---|
| Папір і картон | Вироби з целюлози, що підлягають переробленню; широко використовуються для виробництва вторинного паперу. |
| Скло | Скляні пляшки та тара, листове скло; характеризується можливістю багаторазового перероблення без втрати якості. |
| Пластмаси | Пляшки ПЕТ, поліетилен, поліпропілен. Перероблення потребує сортування за видами пластику. |
| Органічні відходи | Рештки їжі, шкірки, кістки, відходи перероблення зерна. Використовуються для виробництва кормів, біогазу, компосту. |
| Небезпечні та електронні відходи | Елементи живлення, електроніка, фармацевтичні препарати; потребують спеціального поводження, можуть містити важкі метали й токсичні речовини. |

Таке групування дає змогу визначити оптимальні способи перероблення та подальшого використання. Варто також виділяти вторинні енергоресурси, до яких відносяться тепло від технологічних процесів, пари, гаряча вода та вторинні хімічні ресурси, це виведені з потоку речовини, які можуть бути повернуті у виробництво після очищення.

Залучення вторинних матеріалів до економіки розширює сировинну базу та зменшує потребу в добуванні первинних ресурсів. Дослідження відзначають, що такий підхід сприяє зниженню витрат, скороченню обсягів відходів і мінімізації негативного впливу на довкілля. В умовах обмеженості природних ресурсів і високих

цін на сировину використання побічних продуктів стає стратегічним напрямом розвитку харчової промисловості.

2. Економічні та екологічні мотиви впровадження ресурсозбереження.

Економічні та екологічні мотиви ресурсозбереження в харчовій промисловості тісно переплетені. Дослідження фахівців показують, що в науковій та практичній традиції ресурсозбереження часто трактують через раціональне використання ресурсів заради економічного результату – зменшення витрат виробництва й підвищення прибутковості, але сучасні умови вимагають і результуючої ознаки, зокрема досягнення *економічних, екологічних і соціальних ефектів*, причому найбільш стійким вважається синергетичний економіко-екологічний ефект.

Отже наведемо класифікацію основних економічних та екологічних мотивів впровадження ресурсозбереження.

Економічні фактори:

1. Скорочення витрат.

Зменшення споживання енергії, води та первинної сировини дає можливість підприємствам значно знизити операційні витрати. Статистика показує, що приблизно 30 % витрат у харчовому виробництві припадає на енергію; впровадження енергоощадних технологій зменшує ці витрати та підвищує конкурентоспроможність.

2. Зменшення вартості утилізації.

Перероблення відходів та їх повернення у виробництво (*upcycling*) дає змогу уникнути високих витрат на захоронення та утилізацію. Компанія Canon, застосувавши метод обліку витрат матеріальних потоків, за 2004–2012 рр. зекономила понад 30 млн євро за рахунок зменшення втрат матеріалів.

3. Розвиток нових ринків.

Побічні продукти можна перетворювати на нові товарні позиції (наприклад, борошно зі зброженого зерна або косметичні засоби з виноградних кісточок), що розширює асортимент і відкриває нові сегменти.

4. Зменшення ризиків.

Ресурсозберігаючі технології допомагають підприємствам відповідати вимогам екологічного законодавства, уникати штрафів і зменшувати залежність від зовнішніх постачальників сировини.

Екологічні мотиви:

1. Зменшення викидів парникових газів та забруднення.

Енергоефективні технології та перероблення відходів зменшують обсяги викидів CO₂ та інших забруднювачів у довкілля. У статті [4] наголошується, що енергоефективні практики не лише скорочують витрати, а й сприяють виконанню глобальних екологічних цілей та боротьбі зі зміною клімату.

2. Збереження природних ресурсів.

Повторне використання матеріалів зменшує потребу у видобутку первинної сировини, що допомагає зберігати земельні, водні й енергетичні ресурси для майбутніх поколінь.

3. Підвищення екологічної безпеки.

Зменшення токсичних і небезпечних відходів знижує ризики для здоров'я населення та екосистем. Впровадження системи ефективного поводження з відходами сприяє покращенню санітарного стану і відновленню природних середовищ.

4. Соціальна відповідальність та репутація.

Суспільство дедалі більше цінує екологічно відповідальну продукцію. Згідно з даними різних дослідників, підвищення енергоефективності не лише знижує викиди, але й покращує репутацію бренду та довіру споживачів

Існує корисне для практики розрізнення *маловитратного* ресурсозбереження (швидко окупається, спрямоване на ліквідацію непродуктивних втрат ресурсів і енергії) та *витратного* (потребує більших інвестицій), причому маловитратні дії формують фінансову базу для капіталоемних проєктів. Це дуже «харчова» логіка, адже у багатьох заводів ресурсозбереження починається з дисципліни обліку й втрат (сировина/вода/пара/електрика), а вже потім переходить у великі проєкти з перероблення побічних потоків.

На рівні державної політики мотиви ресурсозбереження посилюються євроінтеграційним вектором та реформою управління відходами. Міністерство захисту довкілля та природних ресурсів прямо зазначає, що реформа передбачає наближення законодавства України до законодавства ЄС, створення умов для інвестицій в інфраструктуру оброблення відходів, закриття несанкціонованих звалищ, а також запровадження *ієрархії управління відходами та розширеної відповідальності виробника*. На урядовому порталі також наголошено, що Національна стратегія управління відходами та її реалізація – це рух до моделі економіки замкнутого циклу, включно з п'ятиступеневою ієрархією поводження з відходами й принципами РВВ. Для харчового бізнесу це означає, що ресурсозбереження – це не добровільний «зелений проєкт», а дедалі більш економічно й регуляторно обумовлена необхідність.

3. Методи оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій.

Оцінка ефективності ресурсозберігаючих технологій – це завжди історія про «корисність у трьох вимірах»: економіка, екологія, надійність/соціальний аспект.

У навчальній літературі наведено підхід через *ресурсозберігаючий потенціал*: виділяють потенційне й фактичне ресурсозбереження, а потенціал підприємства може трактуватися як кількісно-якісна оцінка результатів, яких може досягти ресурсозберігаючий проєкт за оптимального поєднання засобів.

У практиці харчового підприємства це означає, що оцінка має включати: доступність технології (чи це «реальний» ВМР з ринком), стабільність якості побічного потоку (вологість, кислотність, мікробіологія), логістику (відстані, сезонність), капітальні й операційні витрати, і ризики (санітарні, репутаційні, екологічні).

Оцінка життєвого циклу (LCA)

Life Cycle Assessment (LCA) – це стандартизована методика аналізу екологічних аспектів та потенційних впливів продукту чи технології протягом усього життєвого циклу. Вона складається з кількох етапів:

1. Визначення мети та області дослідження – формулюються цілі аналізу, межі системи та функціональна одиниця.

2. Інвентаризаційний аналіз (*Life Cycle Inventory, LCI*) – збір даних про витрати матеріалів, енергії, води та викиди у довкілля.

3. Оцінка впливу (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*) – результати інвентаризації класифікуються, нормалізуються, характеризуються та оцінюються з точки зору впливу на глобальне потепління, токсичність, кислотність тощо.

4. Аналіз удосконалень – визначаються можливості зменшення негативного впливу шляхом оптимізації технологій чи заміни матеріалів.

LCA часто поєднують із витратним аналізом життєвого циклу (*Life Cycle Costing, LCC*) та соціальною LCA (*SLCA*), щоб додати економічний та соціальний виміри. Для виробництва оливкової олії дослідження показали, що використання побічних продуктів і введення відновлюваних процесів може зменшити загальні витрати приблизно на 25 %. Відповідно, LCA є важливим інструментом для виявлення вузьких місць і потенціалу підвищення ефективності.

Метод обліку витрат матеріальних потоків (MFCA)

Material Flow Cost Accounting (MFCA) – це метод, стандартизований ISO 14051, який аналізує потоки матеріалів і енергії, щоб виявити втрати й оптимізувати використання ресурсів. Основні принципи MFCA:

У традиційному обліку витрати на утилізацію відходів відносяться до собівартості продукції, що приховує реальну вартість втрат. MFCA, навпаки, розділяє витрати на матеріали, енергію, працю та інші ресурси, пов'язані зі створенням відходів.

Даний метод дозволяє врахувати всі витрати, що виникають до того, як матеріал стає відходом (транспортування, використання обладнання, енергії тощо).

Ключові категорії витрат у MFCA включають витрати на утилізацію, матеріальні витрати, логістику, працю, енергію та інвестиції; ці дані дозволяють знайти джерела неефективності та розрахувати потенційні заощадження.

Підприємства розробляють модель потоків матеріалів та енергії, порівнюють обсяги корисної продукції та втрат, після чого визначають, що потенційні заощадження дорівнюють вартості матеріальних втрат. Яскравим прикладом ефективності MFCA є Canon, яка завдяки застосуванню методу скоротила матеріальні втрати на понад 30 млн євро.

Вартісно-орієнтований аналіз і багатокритеріальна оцінка

Аналіз вигод і витрат (cost-benefit analysis, CBA) застосовується для оцінювання інвестиційних проєктів у сфері утилізації відходів та розробки ресурсозберігаючих технологій. Сучасні дослідження пропонують оцінювати проєкти за показниками чистої теперішньої вартості (NPV), коефіцієнта вигід і витрат (BCR) та внутрішньої норми рентабельності (IRR), а також проводити чутливий аналіз для врахування коливань ринкових цін. У сфері управління харчовими відходами CBA допомагає визначити, які сценарії переробки забезпечують найкращу економічну та екологічну віддачу.

Додаткові методи включають матеріально-потоковий аналіз (MFA) для оцінки обсягів ресурсів, що входять та виходять із системи; багатокритеріальну оцінку (MCDA) для порівняння альтернатив за кількома критеріями (економічними, екологічними та соціальними); оцінку водного та вуглецевого слідів; соціально-

економічні дослідження; аналіз політик та нормативних актів, які визначають правила впровадження ресурсозберігаючих технологій. Використання комплексних методів дає змогу приймати обґрунтовані рішення про доцільність впровадження тих чи інших інновацій.

4. Приклади комплексного використання побутових продуктів і відходів.

Найкраще ресурсозбереження видно через приклади комплексного використання продуктів та відходів, характерних саме для харчової галузі.

За останні роки виникло багато стартапів та проєктів, що перетворюють відходи харчової промисловості на нові продукти. Ось декілька прикладів.

Для молокопереробної галузі ключовим вторинним потоком є сироватка. В українській науковій періодиці описано використання концентратів сироваткових білків як інгредієнта у технологіях харчових продуктів. Це приклад «харчової» високої доданої вартості, але він вимагає технологічної дисципліни (стабільна якість сироватки, мембранні або сушильні процеси, безпечність).

У пивоварінні типовим побічним продуктом є пивна дробина. Українські матеріали на базі досліджень НУБіП описують практичну можливість використання пивної дробини як додаткової сировини для заготівлі силосу, що знімає проблему швидкого псування свіжої дробини та перетворює її на ресурс для тваринництва. Інший шлях – енергетичний, це отримання біогазу. Торгово-промислова палата України в експертній публікації прямо подає біогаз/біометан з відходів як приклад циркулярного господарства, підкреслюючи, що разом із біогазом утворюється дигестат, який може стати корисним органічно-мінеральним добривом, потенційно замінюючи синтетичні азотні добрива. Для харчового підприємства це відкриває стратегічну комбінацію «ресурсозбереження + енергонезалежність», що прямо фігурує серед пріоритетів активної ресурсозберігаючої політики у харчовій промисловості (виробництво альтернативних видів палива із вторинної сировини та відходів).

Для цукрової промисловості масовими побічними продуктами є жом та меляса. Українські еко-видання та тематичні матеріали наголошують, що саме цукрове виробництво формує дуже значні маси побічних потоків, і комплексне використання жому та меляси – один з найочевидніших шляхів підвищення ефективності галузі. У державній політиці це лягає в загальний пріоритет – зменшення захоронення біовідходів та розвиток рециклінгу, що відображено в Нацплані до 2033 року та програмах запобігання утворенню відходів і зменшення захоронення біовідходів.

Окремий вид ресурсозбереження – це перетворення відходів рослинної сировини на функціональні інгредієнти. Прикладом є яблучні вичавки як сировина для пектинових продуктів. Навіть якщо підприємство не виробляє пектин самостійно, стратегія може бути простішою, стабілізувати потік вичавок та продати його як вторинний матеріальний ресурс тим, у кого є переробні потужності й ринок.

Вторинне використання фруктової та овочевої м'якоти. Стартап Pulp Pantry переробляє овочеву та фруктову м'якоть після віджимання соків на гранолу; Varnana створює снеки з «кривих» бананів; Yappah від Tyson Foods виробляє курячі снеки, додаючи пюре з моркви та селери і залишки солоду.

Coffee Cherry Co. перетворює висушену м'якоть кавових ягід на борошно, багате на харчові волокна та мінерали. Renewal Mill отримує борошно з окари (жмиху соєвого молока), яке не містить глютену; Planetarians виробляє борошно й чипси із знежирених соняшникових насінин.

Компанія 29 Cosmetics виробляє олію із виноградних кісточок, що залишаються від виноробства. Компанія The White Moustache створює пробіотичні напої з сироватки після виробництва йогурту, а стартап NetZro переробляє яечну шкаралупу на кальцій та колаген для харчових добавок. За даними NETZRO, вилучення зернової дробини та ячної шкаралупи дозволяє скоротити відходи, зменшити викиди й повернути цінні нутрієнти у виробничий цикл.

Відходи м'ясопереробної галузі (кров, кістки, жир, субпродукти) використовують для виробництва кормів, технічних жирів, добрив, біопалива, желатину та біоактивних пептидів.

Відходи хлібопекарської галузі (черствий хліб, крихти) можна перетворити на біоетанол, органічні кислоти, кормові добавки, біогаз.

Відходи рибної та морської промисловості (кістки, панцирі, шкарлупи ракоподібних) використовують для отримання рибної муки, омега-3 жирних кислот та хітозану.

Ці приклади демонструють, що відходи харчової промисловості містять цінні речовини та можуть стати основою для нових продуктів із доданою вартістю. Вони допомагають зменшити навантаження на сміттєзвалища, скорочують викиди та сприяють створенню циклічної економіки.

5. Вплив ресурсозбереження на конкурентоспроможність та екологічну безпеку

Найважливіший підсумок ресурсозбереження – вплив на конкурентоспроможність та екологічну безпеку. Дослідження науковців підкреслюють, що ресурсозбереження виступає умовою результативної та ефективної діяльності підприємства з урахуванням екологічних вимог і стандартів виробництва; при цьому акцент переноситься з разових акцій на метод управління підприємством, заснований на впровадженні ресурсозберігаючих технологій та ефективних управлінських рішень.

В логіці державної політики конкурентоспроможність підсилюється через перехід до економіки замкнутого циклу, розширену відповідальність виробника та ієрархію поведінки з відходами – усе це зменшує системні екологічні ризики й формує стимули для бізнесу мінімізувати відходи та інвестувати в переробку.

Розглянемо основні чинники впливу ресурсозбереження на підвищення конкурентоспроможності.

1. Забезпечується зменшення витрат та збільшення прибутків, оскільки енергоефективні технології та повторне використання матеріалів безпосередньо зменшують операційні витрати й підвищують прибутковість. Адже скорочення енергоспоживання одразу позитивно позначається на фінансових результатах і конкурентоспроможності, оскільки енергія – одна з головних статей витрат у харчовому виробництві.

2. Покращується імідж та лояльність споживачів, оскільки підприємства, що впроваджують ресурсозберігаючі практики, підсилюють позитивний бренд та

залучають екологічно свідомих споживачів. Тому енергоефективність підвищує довіру клієнтів та створює конкурентну перевагу.

3. Інновації та доступ до нових ринків. Розвиток продукції з вторинних ресурсів (наприклад, функціональні добавки, перероблене борошно) відкриває нові сегменти ринку та сприяє крос-секторальній співпраці між харчовою, косметичною та фармацевтичною галузями.

4. Відповідність міжнародним стандартам та збільшення інвесторської привабливості. Компанії, що дотримуються принципів циркулярної економіки, легше залучають інвестиції, оскільки ESG-критерії (екологічні, соціальні та управлінські) стають ключовими для фінансових інститутів.

Охарактеризуємо основні чинники впливу ресурсозбереження на забезпечення екологічної безпеки

1. Зменшення навантаження на екосистеми. Зменшення кількості відходів та викидів забруднювачів сприяє поліпшенню якості води, ґрунту та повітря, що позитивно впливає на біорізноманіття та здоров'я людей. Тому енергоефективні технології допомагають боротися з виснаженням ресурсів та скорочувати викиди парникових газів.

2. Стійкість харчових систем. Використання вторинних ресурсів і впровадження циклічних процесів підвищують стійкість харчового ланцюга; підприємства стають менш залежними від постачання первинної сировини та менш вразливими до цінових коливань.

3. Розвиток екологічної культури. Навчання персоналу та споживачів важливості раціонального використання ресурсів та правильного поводження з відходами сприяє формуванню екологічно свідомого суспільства, залучення співробітників до енергоефективних ініціатив зміцнює корпоративну культуру та підвищує ефективність виробництва.

4. Відповідність міжнародним зобов'язанням. Через участь у міжнародних програмах (наприклад, національна мета європейської спільноти щодо зменшення харчових втрат і відходів на 50 % до 2030 року) компанії демонструють глобальну відповідальність, що позитивно впливає на їхню репутацію.

Контрольні питання.

1. Поясніть поняття вторинних матеріальних ресурсів і наведіть їхню класифікацію за походженням та матеріальним складом.

2. Які економічні та екологічні мотиви змушують підприємства впроваджувати ресурсозберігаючі технології?

3. Які методи використовують для оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій у харчовій галузі?

4. Наведіть приклади комплексного використання побічних продуктів і відходів харчового виробництва (макуха, сироватка, жом, лушпиння).

5. Як ресурсозбереження впливає на конкурентоспроможність підприємства та рівень екологічної безпеки?

6. Яку роль відіграє національний класифікатор відходів (ДК 005-96) у системі управління вторинними ресурсами?

7. Які види відходів розрізняють за походженням і що характерно для харчової промисловості?

8. Чому повторне використання побічних продуктів важливе для зменшення витрат і екологічного навантаження?

9. Які європейські та міжнародні підходи сприяють ефективному управлінню вторинними ресурсами?

ТЕМА 9. ТЕОРЕТИЧНІ ПІДХОДИ ДО КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВІДХОДІВ

1. Методологічні принципи оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій та визначення рівня безвідходності виробництва.

2. Первинні та вторинні енергетичні ресурси, їх класифікація та взаємозв'язок.

3. Світові тренди утилізації харчових відходів.

4. Соціально-економічні та правові аспекти поводження з відходами.

5. Методи збору, сортування та підготовки відходів до подальшого перероблення чи використання як енергетичної сировини.

6. Роль державних і приватних партнерств у реалізації проектів комплексного перероблення відходів та впровадження інноваційних технологій.

Комплексне використання відходів у сучасній інженерній та управлінській освіті означає перехід від знешкодження/захоронення до інтегрованого керування потоками матеріалів та енергії впродовж життєвого циклу продукції: запобігання утворенню відходів → підготовка до повторного використання → рециклінг/відновлення матеріалів → відновлення енергії → безпечне видалення залишків. Саме така ієрархія формалізована в законодавстві України і, за змістом, узгоджена з європейською моделлю.

Українська політика управління відходами останніх років еволюціонує від декларацій до системних рамок: Національна стратегія (до 2030 року) фіксувала домінування захоронення та низьку частку перероблення (за наведеними в документі даними за 2016 рік) і прямо пов'язувала проблему з ресурсоемними “багатовідхідними” технологіями. Новий Національний план управління відходами до 2033 року закріплює десятирічний горизонт планування (2024–2033), наголошує на переході до сучасного управління відходами як ресурсами та виокремлює напрями зменшення захоронення біовідходів і запобігання утворенню відходів.

Отже, комплексність у поводженні з відходами досягається не однією “супертехнологією”, а методологічною дисципліною (коректні визначення й межі системи “відхід/побічний продукт”), вимірюваністю (LCA/MFCA/еко-ефективність), правильним дизайном потоків (роздільний збір та підготовки), економічними стимулами (EPR, PAYT, депозитні схеми, екоподатки) та інституційними механізмами реалізації.

Впродовж останніх двох десятиліть у ЄС відходи дедалі більше трактуються як “вторинний ресурс”, а ціль політики формулюється як рух до циркулярної економіки; Єврокомісія підкреслює масштаб проблеми (приблизно 2,5 млрд т відходів на рік) і те, що запобігання має бути пріоритетом, а захоронення – “останнім варіантом”. В Україні аналогічний вектор підтримується реформою управління відходами, інструментами планування та оновленими вимогами до створення інфраструктури.

1. Методологічні принципи оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій та визначення рівня безвідходності виробництва

Ресурсозберігаюча технологія у контексті комплексного використання відходів – це таке техніко-організаційне рішення, що зменшує первинне ресурсоспоживання, скорочує утворення відходів і/або забезпечує повернення

матеріалів/енергії у господарський обіг у безпечний спосіб, узгоджений з ієрархією управління відходами. В українському законі “Про управління відходами” ієрархія прямо задає пріоритетність: запобігання → підготовлення до повторного використання → рециклінг → відновлення (у т.ч. енергія) → видалення.

Перший методологічний крок – юридично й технологічно коректно визначити статус потоку:

– якщо речовина/предмет відповідає умовам побічного продукту, він не є “відходом” (за наявності визначеного подальшого використання, можливості використання без оброблення, окрім нормальної практики, тощо);

– якщо відходи пройшли відновлення та відповідають умовам припинення статусу відходів (ринок/попит, безпека для здоров'я і довкілля, відповідність стандартам), вони можуть перейти у статус товару/ресурсу.

Ці правові визначення безпосередньо впливають на те, що ми рахуємо як “утворення відходів”, які витрати/ризики враховуємо і які показники ставимо як цільові.

Ключові принципи та інструменти оцінювання

Методологічно коректна оцінка ефективності ресурсозбереження зазвичай поєднує щонайменше три параметри: матеріальний, енергетичний, економічний (і часто – екологічний/соціальний).

1. Оцінювання за життєвим циклом (LCA) (Life Cycle Assessment)

ISO 14040 визначає рамку та принципи LCA (методика оцінки екологічного впливу продукту від видобутку сировини до утилізації («від колиски до могили»)) і підкреслює, що стандарт встановлює рамкові вимоги для LCA/LCI-досліджень.

ISO 14044 деталізує вимоги та настанови для проведення LCA/LCI.

Для теми комплексного використання відходів LCA застосовують, щоб:

– порівняти “перероблення vs енерговідновлення vs захоронення” для конкретного потоку;

– уникнути “перенесення впливів” (наприклад, зменшення відходів ціною значно більшого енергоспоживання чи токсичних викидів);

– обґрунтувати екодизайн та циркулярні стратегії.

2. Матеріально-потокове вартісне облікування (MFCA).

ISO 14051 пропонує загальну рамку MFCA, де матеріальні потоки й запаси відстежуються у фізичних одиницях (маса/обсяг), а також оцінюються витрати, пов'язані з цими потоками. Для ресурсозбереження MFCA особливо цінна тим, що “матеріальні втрати” (відходи, брак, втрати сировини) видно як витрати, а не як “неминучі побічні явища”.

3. Еко-ефективність.

ISO 14045 задає принципи й вимоги оцінки еко-ефективності систем продукту, включаючи цінність/користь для стейкхолдера, екологічну оцінку та кількісне визначення еко-ефективності. Для студентів важливо розуміти, що більш “зелена” технологія не завжди більш “ефективна” у відношенні екологічна користь / витрати; тому еко-ефективність – місток між екологією та економікою.

Визначення “рівня безвідходності” як системи показників

У практиці екологічного інжинірингу поняття “безвідходність” доцільно трактувати не як абсолют (“0 відходів”), а як ступінь замкненості

матеріально-енергетичних потоків при заданих технологічних і санітарно-екологічних обмеженнях.

Рекомендований підхід для студентів: оцінювати “рівень безвідходності” через комплект показників (а не один коефіцієнт):

Матеріальна інтенсивність відходоутворення:

$$W = m_{\text{відходів}}/Q_{\text{продукції}}, \text{ (кг/од. або кг/грн доданої вартості).}$$

Частка відновлення (матеріали + енергія) у загальному потоці відходів:

$$RR = (m_{\text{підготовка до повторного використання}} + m_{\text{рециклінг}} + m_{\text{інше відновлення}}) / m_{\text{утворені відходи}}$$

Ці індикатори природно поєднуються з вимогами планування у сфері відходів, оскільки закон передбачає, що у планах управління відходами (підприємств/організацій) мають бути прогностичні показники утворення відходів та заходи запобігання/зменшення та належного управління.

LCA дає найкращу екологічну обґрунтованість, але вимагає даних і коректного визначення меж системи (ризик “гарних цифр” при “поганих межах”). MFCA добре працює як управлінський інструмент підприємства, але може не бачити впливів поза межами підприємства без зв’язки з LCA/еко-ефективністю. Індикатори циркулярності (MCI) зручні, але спрощують реальність і мають застосовуватися як “навігаційні”, а не як єдині.

2. Первинні та вторинні енергетичні ресурси: класифікація та взаємозв’язок

У статистичній та політичній практиці первинні енергоресурси – це ті, що видобуваються або захоплюються з природних джерел (нафта, газ, вугілля, біомаса, гідро- та вітроенергія), тоді як вторинні енергоресурси – продукти перетворення первинних (або інших вторинних) енергоресурсів (електроенергія, тепло, моторне паливо тощо). Таке розмежування прямо пояснює Євростат: первинний продукт витягується з природних ресурсів, а вторинний – виробляється в результаті процесу перетворення.

Важливий акцент до теми відходів: у підходах до енергетичної статистики та класифікацій існує дискусія про роль відходів як “первинного” джерела енергії, але як мінімум на рівні аналітики первинно-вторинного поділу ключовий критерій – наявність процесу перетворення.

Комплексне використання відходів часто включає енергетичне відновлення: біогаз з органічних відходів, RDF/SRF з залишкових фракцій, спалювання з утилізацією тепла/електроенергії тощо. Ієрархія управління відходами в Україні прямо фіксує, що відновлення (у т.ч. виробництво енергії) є нижчим пріоритетом, ніж рециклінг, але вищим за видалення.

ЄС, своєю чергою, формалізує, за яких умов спалювання ТПВ вважається операцією відновлення (R1), прив’язуючи це до енергетичної ефективності (порогові значення та формула). Це є ключовим прикладом того, як “енергія з відходів” з погляду політики стає не просто фактом спалювання, а питанням ефективності та якості відновлення.

Отже, перевага енергетичного відновлення – зменшення обсягів відходів, що підлягають видаленню, та можливість заміщення частини первинних енергоносіїв. Обмеження – ризик “замикання” системи на спалювання (підрич стимулів до

запобігання і рециклінгу), потреба в стабільному складі палива (RDF/SRF), а також високі вимоги до екологічної безпеки та енергетичної ефективності.



Рисунок 9.1 – Схема перетворення енергії в контексті відходів

Пояснення до схеми: “відходи як ресурс” під’єднуються до енергосистеми через ланцюги перетворення (AD, термопроцеси), після чого енергія існує вже у вторинних формах (тепло/електрика/паливо). Логіка розділення первинного та вторинного важлива для розрахунку енергобалансів та оцінки ефективності перетворень.

3. Світові тренди утилізації харчових відходів

У глобальній практиці розрізняють food loss (втрати їжі в ланцюгу постачання до роздрібною торгівлі) і food waste (відходи їжі на рівні роздрібних закладів харчування/домогосподарств). Організація об’єднаних націй оприлюднила звіт Індексу харчових відходів (UNEP Food Waste Index Report 2024) в якому зазначено, що мета – відстежувати прогрес до скорочення харчових відходів удвічі до 2030 року (ЦСР 12.3).

Ключові оцінки UNEP (за 2022 рік):

- 1,05 млрд тонн їжі було втрачено як “food waste”, що становить 19% їжі, доступної споживачам на рівнях роздрібних закладів харчування/домогосподарств;
- найбільша частка припадає на домогосподарства (631 млн тонн, ~60%), далі – заклади харчування (290) та магазини (131);

– у середньому 79 кг на людину на рік, і це еквівалент щонайменше “одного мільярда прийомів їжі на день” у домогосподарствах (за консервативним припущенням про їстівну частку).

Український закон прямо включає зменшення обсягів утворення відходів харчових продуктів як один із напрямів запобігання утворенню відходів.

Отже основні тренди: від “утилізації” до запобігання, вимірювання й співпраці.

Поточний тренд у світі – зміщення фокусу від “як переробити” до Target-Measure-Act (ціль → вимірювання → дія). UNEP прямо наголошує, що країнам потрібні узгоджені вимірювання, національні базові лінії та моніторинг.

Другий (паралельний) тренд – окреме збирання біовідходів. У ЄС це формалізовано як обов’язок: до 31 грудня 2023 року біовідходи мають бути або відсортовані й перероблені, або збиратися окремо і не змішуватися з іншими відходами (ст. 22). Європейські настанови щодо роздільного збирання також стисло узагальнюють часові “віхи” (2015 — папір/метал/пластик/скло; 2023 – біовідходи; 2025 – текстиль та небезпечні фракції домогосподарств).

Третій тренд – правове стимулювання запобігання та перерозподілу. Французький закон 2016 року (“*lutte contre le gaspillage alimentaire*”) закріплює обов’язок дистриб’юторів забезпечувати реалізацію/валоризацію харчових продуктів відповідно до встановленої ієрархії. В Італії закон №166/2016 спрямований на спрощення та заохочення донорства/перерозподілу надлишків. У Японії діє спеціальний акт (2019) про просування скорочення food loss and waste як національної кампанії із залученням уряду, місцевої влади, бізнесу та споживачів.

Таблиця 9.1 – Порівняльна таблиця управління харчовими відходами

| Варіант | Основний продукт/ефект | Коли доцільно | Переваги | Основні обмеження / ризики |
|--|----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| Запобігання (менше списань / псування) | Відходи не виникають | Весь ланцюг; найвищий пріоритет | Максимальний ресурсний ефект; узгоджено з SDG 12.3 | Потребує поведінкових і бізнес-змін; потрібні дані/облік |
| Перерозподіл (донорство) | Їжа йде на споживання | Надлишки, що безпечні для споживання | Соціальний ефект; зменшення відходів | Логістика, відповідальність, санітарні вимоги; законодавчі рамки |
| AD (біогаз) | Енергія дигестат | + Окремо зібрані біовідходи | Відновлення енергії; потенціал заміщення викопного газу | Потребує чистої сировини (домішки); ринок/стандарты для дигестату |
| Компостування | Компост/ покращувач ґрунту | Окремий збір; локальні системи | Повернення органіки у ґрунт; технологічна простота | Контамінація пластиком; якість компосту; контроль запахів |
| Термічне відновлення (WtE) | Тепло електрика | / Залишки/ контаміновані потоки | Зменшення обсягу відходів, що йдуть на захоронення | Конфлікт з пріоритетом рециклінгу; вимоги енергоефективності й екобезпеки |

4. Соціально-економічні та правові аспекти поводження з відходами

Сучасне право про відходи в Україні побудоване навколо:

1. ієрархії управління відходами (5-крокова пріоритетність);

2. принципів “забруднювач платить”, територіальної наближеності, формування конкуренції тощо;

3. інструментів планування (національні / регіональні / місцеві плани; плани підприємств) і процедур оцінки ефективності реалізації планів.

Національний план до 2033 року прямо позиціонує управління відходами як умову зменшення негативного впливу на довкілля і здоров'я, підвищення ефективності використання ресурсів, створення ринків і робочих місць та розвитку циркулярної економіки.

У ЄС Рамкова директива про відходи – правовий каркас для запобігання та управління, включно з визначеннями і принципами.

Економічні інструменти

Право без економічних стимулів часто не працює, якщо захоронення дешевше за рециклінг, бізнес та громади раціонально обирають захоронення.

Український закон прямо перелічує економічні інструменти для дотримання ієрархії: екологічний податок за захоронення, РАУТ (“плата лише за фактичну вагу” непридатних до відновлення відходів), EPR, депозитні схеми, податкові пільги для повторного використання / донорства, стимули для ринку вторсировини та підтримку досліджень / інновацій.

На рівні ЄС подібна логіка реалізується через поєднання правових зобов'язань та економічних механізмів (податки, депозит-повернення, EPR у різних секторах).

EPR у законі України визначена як комплекс економічних і організаційних заходів, що забезпечують відповідальність виробника за стадію відходів у життєвому циклі продукції. На практиці це інституційний механізм “вбудовування” витрат на збір / сортування / перероблення у ціну продукту (і, відповідно, стимулювання екодизайну).

Для небезпечних відходів особливо важливий рівень міжнародної координації. Базельська конвенція (прийнята 1989 р., чинна з 1992 р.) встановлює рамку контролю трансграничних перевезень небезпечних відходів та їх видалення.

Успішність роздільного збирання, розміщення сортувальних / переробних потужностей, впровадження РАУТ чи тарифних реформ залежить від соціальних факторів: довіри, сприйняття ризиків, доступності сервісу, справедливості тарифів. Національний план до 2033 року підкреслює необхідність участі громадськості та формування конкурентного середовища, а також позиціонує план як інструмент для залучення інвестицій і створення робочих місць.

5. Методи збору, сортування та підготовки відходів до перероблення чи використання як енергетичної сировини

Розглянемо що саме розуміється під “збором / сортуванням / підготовленням”.

Українське законодавство дає точні опорні визначення:

– управління відходами – комплекс заходів зі збирання, перевезення, оброблення (відновлення, у т.ч. сортування, та видалення), включно з наглядом;

- роздільне збирання – збирання відходів окремо залежно від виду / характеристик у спосіб, що сприяє подальшому обробленню;
- сортування – механічний розподіл за властивостями / складом / енергетичною цінністю з метою підготовки до оброблення.

Базові моделі збирання (практична класифікація), що використовують у практиці муніципального сектору:

- door-to-door (контейнерні майданчики/індивідуальні баки),
- bring systems (пункти прийому),
- депозит-повернення (для тари) як окрема інфраструктура (в Україні закон передбачає депозитні схеми як економічний інструмент).

Вимоги до роздільного збирання в Україні вже описують мінімальний “кістяк” фракцій у населених пунктах: папір/картон, пластик, скло, метал, а також вимоги створювати умови для біовідходів, текстилю, небезпечних відходів у складі побутових тощо.

Європейські настанови систематизують аналогічний підхід як наслідок вимог Рамкової директиви (окремий збір ключових фракцій та біовідходів).

Технологічні ланцюги підготовки до перероблення / енергетичного використання

Підготовка – це міст між збиранням і кінцевими технологіями. В українському законі зазначено, що для оголошення припинення статусу відходів достатньою інколи може бути “найпростішою” операцією відновлення: демонтаж, сортування, дроблення, ущільнення, гранулювання, сушіння, подрібнення, кондиціонування.

Типовий ланцюг для змішаних ТПВ (концептуально):

- первинне вилучення небезпечних компонентів;
- механічне сортування (сита/балистичні сепаратори/магнітні та вихрострумові сепаратори/оптичні NIR-системи);
- формування потоків (вторсировина високої якості; органічна фракція для компосту/AD; висококалорійна фракція для RDF/SRF; залишок на видалення).

Таблиця 9.2 – Порівняльна таблиця технологій сортування/підготовки

| Технологія / метод | Що відділяє | Об'єкт | Переваги | Обмеження |
|---------------------------------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------|--|
| Магнітна сепарація | Чорні метали | ТПВ, промвідходи | Дешева, надійна | Не працює для Al/Cu |
| Вихроструменева | Кольорові метали (Al тощо) | Пакування, ТПВ | Підвищує вилучення Al | Чутлива до форми/розміру часток |
| Ситове фракціонування | За розміром | Органіка/інертні | Проста технологія | Не відділяє за матеріалом |
| Оптичне сортування (NIR) | Полімери за спектром | Пластики, пакування | Висока продуктивність | Потребує чистого/сухого потоку; капіталомістка |
| Дроблення / ущільнення / гранулювання | Підготовка / RDF/SRF | Висококалорійні фракції | Стабілізує паливо | Ризик домішок (Cl, метали), потрібні стандарти |
| Депакування (для органіки) | Вилучення упаковки | Харчові відходи з ритейлу | Робить органіку | Потрібен контроль мікропластику |

| Технологія / метод | Що відділяє | Об'єкт | Переваги | Обмеження |
|--------------------|-------------|--------|------------------|-----------|
| | | | придатною для AD | |

Роздільне збирання забезпечує кращу якість вторсировини й органіки, але потребує дисципліни населення / бізнесу та інфраструктури. Змішаний збір + сортування може підвищити вилучення матеріалів, але зазвичай дає гіршу якість та більшу частку “залишків”. У ЄС окремий збір є базовим принципом, а відступи мають бути обґрунтованими.



Рисунок 9.2 – Схема потоків відходів у системі комплексного використання

Ця схема відображає ключову думку ієрархії: “видалення” повинно стосуватися лише тих потоків, які технічно або економічно непридатні до відновлення.

6. Роль державно-приватних партнерств у реалізації проєктів комплексного перероблення відходів та впровадженні інновацій

Станом на 2025–2026 рр. Україна перейшла до рамки «публічно-приватного партнерства» (ППП) як базового поняття спеціального закону. Закон України «Про публічно-приватне партнерство» визначає правові засади PPP та фіксує, що відносини у зв'язку з PPP встановлюються цим законом; також зазначено, що на вибір приватного партнера та виконання договору PPP не поширюється законодавство про публічні закупівлі (у межах визначених умов).

Принципи PPP включають рівність сторін, недискримінацію, узгодження інтересів для взаємної вигоди, а також орієнтацію на вищу ефективність порівняно з реалізацією без залучення приватного партнера.

Ключовий для сфери відходів нюанс: закон «Про управління відходами» прямо передбачає механізм переходу права власності на відходи до приватного партнера на умовах договору PPP або концесійного договору (для відповідних об'єктів оброблення).

Комплексні проекти у сфері поводження з відходами – зокрема MBT-комплекси, біогазові установки, WtE-об'єкти (waste-to-energy), інфраструктура роздільного збирання та сортування, а також проекти рекультивациі полігонів – зазвичай характеризуються високою складністю реалізації та значними інвестиційними потребами. Їх економічна модель істотно відрізняється від традиційних інфраструктурних проектів через поєднання технологічних, екологічних і регуляторних чинників.

По-перше, такі об'єкти потребують великих капітальних витрат (CAPEX*), що включають не лише закупівлю та монтаж обладнання, а й проектування, підключення до інженерних мереж, створення систем екологічного моніторингу, очищення викидів, будівництво допоміжної інфраструктури та проходження дозвільних процедур. У випадку WtE-заводів або сучасних MBT-комплексів інвестиції можуть становити десятки або сотні мільйонів євро залежно від потужності та рівня технологічності.

По-друге, характерними є довгі строки окупності – часто 10–20 років і більше. Доходи формуються поступово за рахунок тарифів на оброблення відходів (gate fee), продажу вторинної сировини, електроенергії або тепла, а також можливих екологічних платежів чи «зелених» стимулів. Це підвищує вимоги до фінансової стійкості проекту та прогнозованості регуляторного середовища.

По-третє, суттєвим є так званий “ризик сировини” – невизначеність щодо обсягів, сезонності та морфологічного складу відходів. Зміни у структурі споживання, впровадження розширеної відповідальності виробника, розвиток сортування або демографічні чинники можуть впливати на фактичне завантаження об'єкта. Для біогазових установок додатковим чинником є варіабельність органічної фракції та її енергетичного потенціалу, що впливає на стабільність виробництва біогазу.

По-четверте, такі об'єкти потребують професійної експлуатації, висококваліфікованого персоналу та суворого дотримання екологічних стандартів. Порушення вимог щодо викидів, запахів, фільтрату чи поводження з залишковими фракціями може призвести до штрафів, соціального спротиву та репутаційних втрат. Тому система контролю якості, моніторингу викидів і прозорої звітності є критично важливою складовою функціонування.

У цьому контексті механізм державно-приватного партнерства (PPP) виступає інструментом «упакування» вищезазначених чинників у структурований контракт. PPP дозволяє розподілити ризики між публічним та приватним партнерами: будівельні та операційні ризики зазвичай покладаються на приватного оператора, тоді як ризик забезпечення гарантованого мінімального обсягу відходів або стабільності тарифної політики може частково брати на себе публічна сторона. Контрактна модель передбачає чітку систему платежів, визначені показники якості

сервісу (КРІ), механізми моніторингу та аудиту, а також процедури перегляду умов у разі зміни регуляторного чи економічного середовища.

Таким чином, PPP створює інституційну та фінансову рамку, яка робить реалізацію складних екологічних інфраструктурних проєктів більш керованою, прогнозованою та привабливою для інвесторів, водночас забезпечуючи публічний контроль і досягнення екологічних цілей.

Приклади (міжнародні та українські)

Познань (Польща): WtE + PPP + кошти ЄС. Європейський інвестиційний банк (ЕРЕС) описує проєкт WtE у м. Познань як один із найбільш розвинених кейсів поєднання фондів ЄС та PPP-структури для greenfield-об'єкта. Це показовий формат для України в частині “blended finance” (гранти / позики / плата за доступність тощо).

Львів (Україна): відновлення полігону та модернізація інфраструктури. ЄІВ надав 4,7 млн євро (другий транш) для рекультивациі Грибовицького полігону та поліпшення інфраструктури управління відходами. ЄБРР має окремий проєкт “Lviv Solid Waste” у межах Green Cities (реабілітація та модернізація інфраструктури). Це не завжди PPP у вузькому сенсі, але це приклади того, як інфраструктура відходів потребує комплексного фінансування та інституційної спроможності.

Київ (Україна): енергетичне використання ТПВ. Опис проєкту модернізації заводу «Енергія» вказує на роль об'єкта у прийманні близько 750 т ТПВ на добу та генерації теплової енергії для гарячого водопостачання району. Такі об'єкти особливо чутливі до питань енергоефективності, екологічних стандартів та суспільної легітимності, що робить якість контрактної моделі критично важливою.

UNEP прямо виокремлює PPP як спосіб масштабувати зменшення харчових відходів, об'єднуючи стейкхолдерів навколо підходу Target-Measure-Act і долаючи фрагментацію харчової системи. Це добра модель для освітніх кейсів, оскільки PPP не лише “будівництво заводу”, а й “партнерство даних, логістики та поведінкових змін”.

* Великі CAPEX (Capital Expenditures) – це значні одноразові інвестиції компанії у придбання, модернізацію або ремонт фізичних активів (нерухомість, обладнання, техніка) та нематеріальних активів (патенти, ПЗ), що служать понад рік.

Контрольні питання.

1. Чому комплексне використання відходів є важливим для сучасної інженерії та економіки?
2. Які методологічні принципи застосовують для оцінки ефективності ресурсозберігаючих технологій і визначення рівня безвідходності виробництва?
3. Як класифікують первинні та вторинні енергетичні ресурси, і який взаємозв'язок між ними?
4. Назвіть основні світові тренди та технології утилізації харчових відходів.
5. Які соціально-економічні та правові аспекти потрібно враховувати під час поводження з відходами?
6. Які методи використовують для збору, сортування та підготовки відходів до подальшого перероблення або використання як енергетичної сировини?
7. Яку роль відіграють державні та приватні партнерства у впровадженні проєктів комплексного перероблення відходів?
8. Поясніть ієрархію поводження з відходами (запобігання → повторне використання → рециклінг → відновлення енергії → видалення) та її значення для України.
9. Що таке оцінювання за життєвим циклом (LCA) і як цей метод допомагає визначати ефективність утилізації відходів?

ТЕМА 10. УПРАВЛІННЯ ВТОРИННИМИ РЕСУРСАМИ У РІЗНИХ ГАЛУЗЯХ ХАРЧОВОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

1. Особливості утворення вторинних ресурсів у цукровій, виноробній, пивоварній, олійно-жировій, зернопереробній та спиртовій галузях.

2. Аналіз споживання енергії та води в типових технологічних процесах та заходи для їх зменшення.

3. Заходи щодо зменшення утворення твердих відходів і підвищення ресурсобезпечності виробництва.

4. Менеджмент побічних продуктів, від класифікації до вибору шляхів утилізації та використання як сировини для інших виробництв.

5. Законодавче регулювання поводження з відходами та побічними продуктами.

6. Приклади успішного використання вторинних ресурсів у світовій практиці.

1. Особливості утворення вторинних ресурсів

У кожній галузі харчової промисловості є свої специфічні побічні продукти (відходи), які можуть стати цінною вторинною сировиною. Наприклад, у *цукровій промисловості* основними побічними продуктами є буряковий жом (клітковина), меляса та дефекат (вапняний осад). Ці відходи мають високу поживну цінність і часто використовуються як добрива або у кормових сумішах. За даними промислових досліджень, на кожну тонну буряків припадає близько 70–90% жому, 4–6% меляси та 8–12% дефекату, які повертаються в землеробство як збалансовані мінерально-органічні добрива.

Виноробна галузь. Головним вторинним ресурсом тут є виноградна лоза (обрізки), а також мезга (виноградна макуха) та дріжджовий осад. Обрізані лозини збирають під час обрізки лози – близько 1,5–2,0 т/га у плодоносних насадженнях. Наразі їх часто палять, втрачаючи при цьому азот, фосфор і калій (близько 10–16 кг/га кожного). Зате лоза містить багато лігноцелюлози – її можна компостувати чи переробляти у біопаливо (брикети чи гранули) або навіть екстрагувати з неї цінні біохімічні сполуки, зокрема феноли, поліфеноли тощо. Виноградна мезга та винні осад використовуються як добрива після компостування і як джерело пектинів, консервантів, аутентизаторів смаку або як субстрат для виробництва біоетанолу (ферментаційно-дистиляційні процеси). З-поміж вторинних продуктів виноробства особливо цінними є концентрати поліфенолів (ресвератролу, кверцетину), які використовують як харчові добавки чи природні консерванти.

Пивоварна галузь. Основними побічними продуктами пивоваріння є *пивна дробина* – залишки зернового екстракту після затору – та інші тверді фази, такі як дріжджі та осад після варіння хмелю. За оцінками, світове виробництво пивної дробини перевищує 40 млн т/рік. Пивна дробина багата на білок і клітковину, тому більшість її використовується для годівлі худоби або в біогазових установках. Наприклад, в Європі дробину часто передають фермерським господарствам як корм або компостують. Дріжджові осад також йдуть на корм (після дегідратації) або як компонент добрив.

Олійно-жирова галузь. При переробці насіння олійних культур (соняшник, ріпак, соя тощо) виникають макуха та шрот – рештки олійної фракції, а також лушпиння насіння, висівки. Також утворюються дезодоровані (жирові) погони та

соапсток (осад при омилюванні фосфоліпідів). Ці побічні продукти багаті на білок і жир, тому їх широко використовують у комбікормовій промисловості. Зокрема, макуха й шрот майже повністю переробляються у кормові добавки. Лушпиння соняшника та ріпаку часто використовують як наповнювачі для будматеріалів або пресують у паливні брикети: вміст лігніну дозволяє скріплювати їх без додаткових зв'язуючих. Біогаз та енергія з цієї біомаси – ще один перспективний напрям. На сайті BIOsmartex зазначено, що якісне пресування соняшникового лушпиння дозволяє отримати пальне паливо для котельень, яке забезпечує гарячу воду й пару для виробництва.

Зернопереробна галузь (млин, крупорушки). Тут вторинними ресурсами є висівки (лущені насіння та оболонки зерен), лузга, зародок та бойки. Наприклад, при перетиранні пшениці залишається борошняний зародок та висівки – до 10–15% від маси зерна. Ці продукти використовують у борошномельній галузі як кормові компоненти або для екстракції вітамінів / мікроелементів. Лузгу та солону в основному застосовують як біопаливо (паливні брикети, гранули).

Спиртова (етанолова) галузь. У виробництві спирту (особливо зернового) головним вторинним продуктом є післяспиртова барда – рідина зі значним вмістом розчинених залишків та дрібних частинок. На 1 л спирту випарюється 10–13 л барди вологістю 90–92%. Сухий залишок барди містить близько 5–10% клітковини та 40% білка. Такий поживний субстрат широко використовують як корм високої енергетичної цінності. Барда також може бути зброджена у біогаз чи висушена до кормових гранул.

2. Енергоспоживання і водокористування у типових процесах

Тепло- і енерговитрати у харчовій галузі значно залежать від технології, але в багатьох випадках залишаються високими. Наприклад, *в цукровій промисловості* найбільшу частку споживають випарні та кристалізаційні установки (об'єднаний процес одержання цукру (приймання, миття, дифузія, випарювання та сушіння жому) потребує приблизно 1200–2100 кВт·год електроенергії на 1 т виробленого цукру (бурякового)). У виробництві тростинного цукру використовується енергія «коротким циклом» – викиди печей і парових котлів спалюють очищений жом, що робить більшість заводів енергетично незалежними. Проте енергоспоживання можна знизити, впроваджуючи рекуперацію тепла (конденсація парів, рекуператори на димових газах), використовуючи альтернативні джерела (сонячні теплогенератори, біомасу) і високоефективні насоси.

Водокористування у цукроварінні також велике, так як вода йде на миття буряків, охолодження та транспортування пульпи. Бразильські фермери досягли 95% скорочення використання прісної води за кілька десятиліть за рахунок повторного циркуляційного очищення та зворотного осмосу. Тобто повторне використання технологічних вод та закриті цикли охолодження дозволили суттєво економити водні ресурси і зменшувати забруднення.

У *виноробстві* енергетичні витрати порівняно менші. Тут потрібні насамперед електроенергія для приводів насосів, помірне нагрівання для пастеризування чи стерилізування й система охолодження бродильних ємностей (ферментаторів). Усе ж охолодження вимагає чимало енергії, тому сучасні виноробні використовують теплові насоси або рекуператори холоду. Водокористування пов'язане з миттям бочок і обладнання (СІР-системи) та наповненням резервуарів:

застосовують економічні методи миття (тікер, ультразвук) та збір дощової / талої води для технічних потреб.

Пивоваріння відоме високим співвідношенням «води на пиво». У 2010-х роках світові пивоварні зменшили середнє споживання води з 4 л на 1 л пива до 3 л/л (ціль – 2 л/л до 2030-го). Енерговитрати знизили на 20% за рахунок модернізації обладнання. Головні витрати – електроенергія для дроблення зерна, нагрів затору й варіння суслу, а також енергія охолодження. Для економії води впроваджують рекуперацію охолоджуючої води, замкнуті цикли кип'ятіння, ультразвукове очищення фільтрів. Крім того, значну кількість води «витрачають» на миття обладнання і тари, сучасні СІР-системи в пивоварнях виконують миття і дезінфекцію за замкнутими контурами із повторним фільтруванням.

В олійно-жировому виробництві енергія йде на пресування олії, рафінацію (нейтралізація, відмивання, дезодорація) та генерацію пари. Наприклад, фізична рафінація потребує підігрівання олії до 85–90 °С з об'ємами мийної води 5–15% від обсягу олії. Енергію на нагрівання частково забезпечують відходи виробництва (лігнін із лушпиння, пелети з макухи тощо). Вода споживається на змив мила і фосфоліпідів (при хімічному рафінуванні) – її збирають і переробляють. Крім того, при сушінні макухи і гранулюванні лушпиння потрібні енергоресурси. Заходи економії – це регенератори тепла в дезодораційних колонах, використання розбавленого вихідного гідроксиду (щоб менше миючого розчину), та очищення стічних вод.

У зернопереробній галузі енергоспоживання зосереджено на подрібненні (електродвигуни млинів та крупорушок) та сепаруванні (вібраційні ситові та аеродинамічні пневмосепаратори). Води в цій галузі використовується порівняно мало, переважно використовують повітряні сепаратори, іноді знепилюють зерно водяним душем. Енергозберігаючі заходи, що використовуються у зернопереробній галузі, підбирання високоефективних двигунів, встановлення інверторів, оптимізування технологічних ліній (менша кількість послідовних подрібнювальних етапів).

Спиртові заводи споживають значну енергію на випаровування та ректифікацію спирту. Для зменшення витрат використовують парову адсорбцію, комбіновані теплообмінники та спільні теплоелектростанції. Оскільки ферментація виділяє тепло, може застосовуватись рециркуляція холодоагентів (фреонів, аміаку) для охолодження дріжджових танків. Вода у спиртовій галузі використовується на охолодження і миття; її повертають із конденсатів пари та використовують в технології повторно.

3. Заходи зменшення відходів і підвищення ресурсоефективності

Для зменшення обсягів відходів виробництва впроваджують комплекс заходів у дусі циркулярної економіки:

- по-перше, здійснюється оптимізування технології, для менших витрат сировини (точні дози, автоматичне управління процесами, постійне підтримування робочих параметрів);

- по-друге, застосовується повторне використання матеріалів – наприклад, вода та тепло повертаються в цикл; жом чи стружку використовують на місці;

- по-третє, здійснюється утилізація відходів у продукцію – організовують лінії для перероблення макухи, дробини, жому у комбікорм, добрива, будівельні матеріали чи паливо (біомаса) на території підприємства.

Конкретні заходи, що забезпечують підвищення ресурсоефективності це:

- встановлення систем комплексного очищення та сортування відходів;
- впровадження безвідходних технологій (наприклад, сушарка-охолоджувач, що переробляє сипучі побічні продукти в паливні гранули);
- використання відходів як сировини (робота спільних циклів з тваринницькими чи енергетичними господарствами);
- скорочення споживання пакувальних матеріалів.

Також важлива економічна мотивація – зменшення обсягу відходів прямо знижує вартість утилізації та покращує рентабельність виробництва. Нарешті, інновації (наприклад, розчинна обгортка для плодів, мембранне розділення, адитиви для раціонального зберігання) допомагають уникати псування та застосовувати побічні матеріали у використанні.

4. Менеджмент побічних продуктів і шляхи їх утилізації

Сучасний підхід до управління побічними продуктами – це ієрархія: насамперед запобігання утворенню), потім повторне використання та перероблення (recycle), і лише в останню чергу безпечна утилізація. З точки зору класифікації, відходи можна розглядати як вторинні ресурси, якщо вони відповідають критеріям використання, а не як сміття. В Україні (за новим Порядком КМУ) залишки виробництва, які придатні для використання як сировина або готова продукція, можуть вважатися побічними продуктами, а не відходами. Наприклад, відходи борошномельного і цукрового виробництв доцільно використовувати для кормів та добрив.

Класифікація. Залишки поділяють на органічні та неорганічні, небезпечні (гігієнічні) та небезпечні (токсичні, канцерогенні). Їхній статус (відходи чи побічні продукти) визначає виробник за встановленими критеріями та заносить дані до відомчої інформаційної системи. Виробник також повинен мати сертифіковану систему якості згідно з національними стандартами при використанні залишків як вторсировини.

Шляхи утилізації та використання.

1. Годівля тварин (комбікорми): екстракційний шрот, макуху, бродильні осадки, грибний чи пивний відстій тощо. (наприклад, барда пивоваріння та виноробства).

2. Компостування: міцелій дріжджів та мезгу перетворюють на компост для удобрення ґрунтів.

3. Спалювання / біоенергетика: більшість рослинних відходів (солома, лушпиння, частина дробини, лоза) підходять для котелень і біогазових установок. Наприклад, жом цукрових буряків направляють на виробництво біометану, а брикети з соняшникового лушпиння забезпечують тепло і пару для заводів.

4. Матеріалізація: з побічних продуктів отримують нову сировину – наприклад, з виноградного осаду виділяють поліфеноли чи пектини, з рисового висіву – масло виноградних кісточок. Іноді побічні продукти йдуть у суміжні галузі – технічна олія, кондитерська, фармацевція (з макухи соняшника чи ріпаку).

Прикладом успішного менеджменту є перероблення пивної дробини: багато пивоварень домовляються з фермерськими господарствами про регулярні поставки залишків для годівлі худоби або виробництва біогазу. Інший приклад – вирощування

комах (черв'яків або личинок чорної львинки) на відходах солодких фабрик, що дає корм для птахів чи риби.

5. Законодавче регулювання поводження з відходами і побічними продуктами

В Україні впроваджено низку нормативних актів, що стимулюють ресурсоефективне виробництво і регулюють поводження з побічними матеріалами. Серед ключових – Закон України «Про управління відходами» (№ 2320-IX від 20.06.2022), який закріпив загальні принципи (ієрархію відходів, відповідальність виробника, ліцензійний режим). Зауважимо, що одночасно уряд затвердив Порядок та Критерії віднесення речовин до побічних продуктів, імплементуючи Ст.5 Директиви 2008/98/ЄС. Згідно з цим, якщо залишки виробництва повністю підлягають використанню, не потребують додаткового оброблення (крім відокремлення від основного продукту), то вони не розглядаються як відходи. У постанові перелічено приклади: наприклад, рисова лузга або солома пшениці можуть бути класифіковані як побічні продукти, якщо використовуються як корм чи біопаливо. Виробник сам приймає рішення про такий статус, вносить дані у Єдину систему управління відходами й регулярно звітує про це.

Крім того, діють галузеві нормативи: наприклад, для сільськогосподарської біомаси і кормів існують санітарні та екологічні стандарти (групи АВМП-2, АВМП-3), а органічні відходи (гній, компост) регламентуються законами про захист довкілля. Євроінтеграційні директиви (особливо «відходова рамкова директива» 2008/98/ЄС) поступово імплементуються, вимагаючи від підприємств звітувати про викиди парникових газів і виконувати національні цілі з переробки. На міжнародному рівні Україна дотримується конвенцій (Базельська конвенція про транскордонний рух небезпечних відходів, Паризька угода за викидами), що стимулює розвиток зеленої економіки і ресурсозбереження.

6. Приклади успішного використання вторинних ресурсів у світовій практиці

У багатьох країнах побічні продукти харчових виробництв використовуються на повну потужність. Так, у Бразилії цукрові та етанолові заводи давно спалюють тростинний жом і солому у власних котельнях, виробляючи електроенергію та пару. На 1 т цукрової тростини припадає близько 250 кг волокнистого жому та 200 кг соломи, які згоряють, забезпечуючи енергію для заводу. У 2020 р. ця біомаса дала в межах 22,600 ГВт·год електрики (близько 9% енергії країни) – надлишок відпускали у мережу. Таким чином бразильські переробні підприємства стали енергонезалежними, і навіть експортують «зелену» електроенергію за рахунок вторинних ресурсів.

У пивоварінні багато компаній перетворили пивну дробину на продукцію. Наприклад, декілька крафтових броварень Європи й США співпрацюють з органічними фермерськими господарствами: свіжу пивну дробину передають у якості кормової добавки або закормового наповнювача. Також її висушують і перемелюють у кормові брикети для тварин. Нещодавно компанії почали робити на основі пивної дробини хлібобулочні вироби, печиво чи навіть безалкогольні напої (через гідроліз білка), розвиваючи замкнуті цикли. Всесвітнє використання цієї вторсировини – близько 40 млн т/рік, і значна частина її йде на комбікорми чи біогаз.

Приклади у виноробстві – це насамперед компостування вичавок та винного осаду. Наприклад, іспанські та італійські винороби активно виробляють органічні добрива (компост) із виноградних вичавок, що повертають у виноградники. Деякі компанії виділяють з вичавок поліфеноли (наприклад, ресвератрол) для фармацевтичних і харчових добавок. Обрізки лози часто перепилоють та складають у «тютюн» для біопалива або використовують у котельнях на власних винзаводах – так побічні ресурси забезпечують підприємство енергією.

Для олійно-жирових підприємств поширений приклад – виробництво пелет/брикетів із лушпиння олійних. Німецькі та українські заводи встановлюють екструдери для лушпиння соняшнику: пресовані брикети добре горять у котлах та у твердопаливних обігрівачах, замінюючи газ чи мазут. Наприклад, у промисловому масштабі одне підприємство в Україні забезпечило повну теплову самозабезпеченість, переробивши тисячі тонн лушпиння у паливо. Інший приклад – соняшникова макуха йде на виробництво протеїнових кормів для свиней та риби, а гліцерин (від побічної реакції) продають для косметики.

Нарешті, спиртові компанії теж демонструють приклади циркулярності: великі етанолові заводи штату Айова (США) використовують барду як корм для свиней на своїх же господарствах, а також переробляють її у біогаз для власних генераторів. Таким чином біомаса, що раніше вважалась відходом, стає джерелом прибутку та енергії.

Отже, використання вторинних ресурсів у харчовій промисловості не тільки знижує собівартість продукції, але й суттєво зменшує навантаження на довкілля та посилює енергетичну незалежність. Приклади зі світової практики показують, що інтеграція «відходів» у виробничі цикли – ключовий елемент «зеленої» економіки та сталого розвитку.

Контрольні питання.

1. Які побічні продукти утворюються у цукровій, виноробній, пивоварній, олійно-жировій, зернопереробній та спиртовій галузях?
2. Як можна використовувати буряковий жом, мелясу та дефекат, що залишаються після виробництва цукру?
3. Які корисні речовини містять виноградна лоза, мезга та дріжджовий осад, і як їх використовують?
4. Для чого застосовують пивну дробину, дріжджі та хмелевий осад, що залишаються після пивоваріння?
5. Які вторинні ресурси утворюються в олійно-жировій галузі і як їх можна переробляти?
6. Як використовують висівки, лузгу та зародок зерна, що залишаються після млинозернопереробних процесів?
7. Що таке післяспиртова барда у виробництві етанолу і які напрямки її використання?
8. Які заходи допомагають зменшити споживання енергії та води у різних галузях харчової промисловості?
9. Яким є законодавче регулювання поводження з відходами та побічними продуктами у харчовій промисловості України?
10. Наведіть приклади світових практик успішного використання вторинних ресурсів.

ТЕМА 11. БІОЕНЕРГЕТИКА ТА ВИКОРИСТАННЯ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ЕНЕРГІЇ

1. Види біопалива з відходів харчової промисловості: біогаз, біодизель, біоетанол, тверде біопаливо.
2. Технологічні схеми виробництва біогазу та біодизеля.
3. Вибір сировини для біоенергетичних технологій.
4. Поєднання виробництва харчових продуктів і енергії в одному циклі.
5. Перспективи біоенергетики в Україні та світі.

Біоенергетика розглядає отримання енергії з біомаси – органічних матеріалів рослинного або тваринного походження. За даними Міжнародного енергетичного агентства (IEA), біомаса включає відходи від лісового та сільськогосподарського виробництва, побічні продукти харчової промисловості й органічні відходи домогосподарств; із цієї біомаси отримують тверді, рідкі та газоподібні біопалива для отримання тепла, електроенергії та транспортних паливних матеріалів. В умовах кліматичних змін і зростання обсягів харчових відходів важливим є використання побічних продуктів харчової промисловості для виробництва енергії.

1. Види біопалива з відходів харчової промисловості

Біогаз – це газоподібне паливо, що утворюється під час анаеробного розкладання органічних матеріалів бактеріями. Системи анаеробного зброджування (AD) дозволяють переробляти органічні відходи – харчові відходи, відходи перероблення, жири та олії – у газовому середовищі без кисню. У реакторі ферментують сировину, виділяючи біогаз та залишок (дігестат). Біогаз містить 50–75 % метану, 30–40 % діоксиду вуглецю та невеликі кількості водяної пари й сірководню. Після очищення біогаз можна подавати в газопроводи або використовувати як моторне паливо.

Сировиною з харчової промисловості для виробництва біогазу можуть бути:

– Відходи перероблення овочів та фруктів: макуха, шкірка, насіння, фруктова м'якоть. Високий вміст вуглеводів та клітковини забезпечує достатню кількість субстрату для метаногенезу.

– Відходи молочної промисловості (сироватка, відпрацьована сировина). Вміст лактози та білків робить їх перспективним субстратом для біогазових установок; існують промислові проекти, де відходи від виробництва сиру постачаються на біогазові станції.

– Харчові жири, масла та фритюрні олії. Додавання жирів підвищує вихід біогазу; практика еко-зброджування із відходами тваринництва та харчовими відходами дозволяє підвищити виробництво метану.

– Побутові харчові відходи та кухонні відходи підприємств громадського харчування. Вони характеризуються високою вологістю та біорозкладаністю; під час анаеробного зброджування утворюється метан, а залишок застосовують як добриво.

Розглядаючи переваги та недоліки виробництва біогазу можна до переваг віднести те, що біогаз дозволяє переробити велику кількість органічних відходів і зменшити викиди метану з полігонів. Продукти зброджування – газ і дігестат – можуть продаватися, забезпечуючи додатковий дохід. Недоліком ж є необхідність

сортуння сировини, висока вологість відходів та ризик утворення сірководню; економічна ефективність залежить від стабільного постачання сировини.

Біодизель – це рідке паливо, що складається з метилових або етилових ефірів жирних кислот. Основною технологією є реакція трансестерифікації: тригліцериди в оліях або жирах реагують з метанолом або етанолом за участі каталізатора, утворюючи алкіл ефіри (біодизель) та гліцерол. Виробництво може здійснюватися у періодичних чи безперервних реакторах. Ключові етапи включають підготовлення сировини, передоброблення (для зменшення вмісту вільних жирних кислот), трансестерифікацію, відокремлення фаз та очищення.

Сировиною з харчової промисловості для виробництва біодизелю можуть бути:

- Використана кулінарна олія та жир. Відпрацьовані фритюрні жири та олії з ресторанного сектора містять тригліцериди, що служать дешевим джерелом жирних кислот. Високий вміст вільних жирних кислот потребує кислотного естерифікаційного етапу перед основною реакцією, однак ці відходи є доступними і зменшують конкуренцію із харчовими культурами.

- Тваринні жири (сало, жир, побічні продукти м'ясоперероблення). Вони мають високу концентрацію насичених жирних кислот. Для таких жирів застосовують кислотну-лужну трансестерифікацію або гідрогенізацію.

- Рослинні олії низької якості (відходи олієпереробних підприємств). Можуть мати високий вміст вологи й домішок, тому потребують очищення.

Розглядаючи переваги та недоліки виробництва біодизелю можна до переваг віднести те, що використання відходів кулінарних олій знижує собівартість палива й утилізує відходи. Біодизель також відрізняється хорошими мастильними властивостями та меншими викидами сірки, однак має вищу в'язкість, ніж звичайне дизельне паливо, й може кристалізуватися при низьких температурах. Вартість очищення та видалення вологи і вільних жирних кислот також впливає на економічні показники.

Біоетанол – це спирт, отриманий шляхом біохімічного або термохімічного перетворення рослинної сировини. Департамент енергетики США зазначає, що майже будь-який рослинний матеріал, який містить цукри або крохмаль, може бути ферментований для отримання етанолу. У процесі перероблення крохмальні чи цукрові матеріали розщеплюються до глюкози, яка потім перетворюється дріжджами на етиловий спирт і двоокис вуглецю.

Сировиною з харчової промисловості для виробництва біоетанолу можуть бути:

- Меляса, патока та сиропи – побічні продукти цукрового виробництва. Вони містять значну частку цукрів і давно використовуються для виробництва етилового спирту.

- Відходи хлібопекарної промисловості (черствий хліб, тісто). За наявності невикористаного хліба його можна гідролізувати та ферментувати. Дослідження про використання хлібних відходів як сировини для етанолу показують, що залишки крохмалю дають змогу отримувати до 0,45 л етанолу з 1 кг сухої речовини.

- Сироватка та лактозна сировина від молочної промисловості може бути ферментована спеціальними мікроорганізмами (наприклад, *Kluyveromyces fragilis*) для виробництва етанолу.

– Целюлозовмісні відходи (солома, макуха, жом, лушпиння). Вони містять целюлозу, геміцелюлозу та лігнін й для перетворення необхідно розщепити полісахариди (за допомогою кислотного, ферментативного чи парового гідролізу) перед ферментацією.

Розглядаючи переваги та недоліки виробництва біоетанолу можна до переваг віднести те, що використання харчових відходів для етанолу зменшує залежність від зернових культур. Проблемами є необхідність попереднього підготовки (гідролізу) і зниження виходу спирту при високому вмісті лігніну. Крім того, побічні продукти ферментації можуть містити інгібітори, які потребують додаткового очищення.

Тверді біопалива – це паливні матеріали у вигляді пелет, брикетів, тріски, дров чи вугілля, що виробляються шляхом механічного, термохімічного або біохімічного оброблення біомаси. ІЕА відзначає, що такі паливні матеріали зазвичай виготовляють із лісових чи сільськогосподарських відходів (опилок, тирси, соломи, кукурудзяного жому).

Сировиною з харчової промисловості для виробництва твердого біопалива можуть бути:

– Лузга та шкаралупа: лушпиння соняшника, рисова лузга, шкаралупа горіхів, кісточка плодів (оливок, персиків). Після висушування та пресування ці матеріали можна перетворювати на пелети або брикети із теплотворною здатністю 15–18 МДж/кг.

– Вичавки та макуха: жом цукрових буряків, макуха після пресування олійних культур або виноградні вичавки. За рахунок залишкового вмісту олії вони мають високу калорійність.

– Пивна дробина та фільтраційні відходи пивоваріння: після сушіння та грануляції дають біопаливні гранули.

Розглядаючи переваги та недоліки виробництва біодизелю можна до переваг віднести те, що тверді біопалива можна зберігати й транспортувати з меншими втратами енергії. Вони придатні для спалювання в котлах та когенераційних установках. Однак високий вміст золи або хлоридів у деяких харчових відходах може спричиняти корозію обладнання; потрібна додаткова підготовка (сушіння, подрібнення, пресування).

2 Технологічні схеми виробництва біогазу та біодизеля

Анаеробне зброджування та виробництво біогазу

Процес анаеробного зброджування складається з чотирьох мікробіологічних стадій: гідроліз, ацидогенез, ацетогенез і метаногенез. На першій стадії складні біополімери (білки, жири, вуглеводи) розщеплюються до розчинних мономерів. Потім ці мономери зброджуються кислотогенними бактеріями до легких жирних кислот, спиртів і водню. Ацетогенні бактерії перетворюють ці кислоти на оцтову кислоту, водень і діоксид вуглецю, які метаногенні археї перетворюють у метан.

Технологічна схема (рисунок 11.1) складається з таких етапів:

1. Підготовки та подрібнення сировини. Сировину (харчові відходи, гній, відпрацьовані жири) збирають та подрібнюють до однорідної маси, додають воду для отримання оптимальної сухої речовини (10–12 %).

2. Завантаження в реактор. Суміш подають у герметичний реактор (ферментатор), форма і розмір якого обираються залежно від виду сировини; у ньому

підтримується безкисневе середовище та температура мезофільного (35–40 °С) або термофільного (50–55 °С) режиму.

3. Анаеробне зброджування. Протягом 15–30 днів відбувається мікробіологічне розкладання та утворення біогазу. При цьому еко-зброджування декількох видів відходів (наприклад, харчові відходи, гноївка, жири) підвищує вихід метану.

4. Збір біогазу та очищення. Біогаз, що складається переважно з метану та CO₂, відводять через систему трубопроводів. За необхідності газ очищують від діоксиду вуглецю, водяної пари та сірководню, отримуючи біометан, придатний для подачі в газові мережі чи використання як паливо.

5. Видалення дигестату. Дигестат, тобто тверда й рідка фракції зброженої маси, використовується як органічне добриво. ЕРА підкреслює, що після відповідного оброблення тверда і рідка фракції можуть служити підстилкою для тварин, компостом або ґрунтовим покривом.



Рисунок 11.1 – Технологічна схеми виробництва біогазу

Технологічна схема виробництва біодизеля

У загальному вигляді схема виробництва біодизеля із відходів кулінарних олій чи жирів містить такі стадії:

1. Підготовки сировини. Для цього відфільтровують домішки, видаляють залишки води та контролюють вміст вільних жирних кислот (FFA). При високому FFA необхідний попередній етап естерифікації з кислотою для перетворення вільних кислот у тригліцериди або естери.

2. Трансестерифікація. Змішують алкоголь (метанол або етанол) із каталізатором (луговим – NaOH, KOH; кислотним – H₂SO₄; або ферментативним). Суміш реагує із жиром при 60–70 °С, утворюючи метилові ефіри жирних кислот (біодизель) та гліцерол. Для відходів із високим вмістом вільних кислот застосовують двоступеневий процес: кислотну естерифікацію для зменшення FFA, потім лужну трансестерифікацію.

3. Розділення фаз. Після реакції відстоювання або центрифугування відокремлюють фази: легший біодизель та важчий гліцерол.

4. Очищення і промивання. Біодизель промивають водою для видалення каталізатора, залишків спирту та мила, далі очищений продукт сушать і фільтрують. За даними дослідників, за оптимальних умов вихід біодизеля з олій може перевищувати 95 %.

5. Використання побічних продуктів. Гліцерол використовується в косметичній та фармацевтичній промисловості; відпрацьований алкоголь можна рекуперувати, а відходи каталізаторів утилізувати.

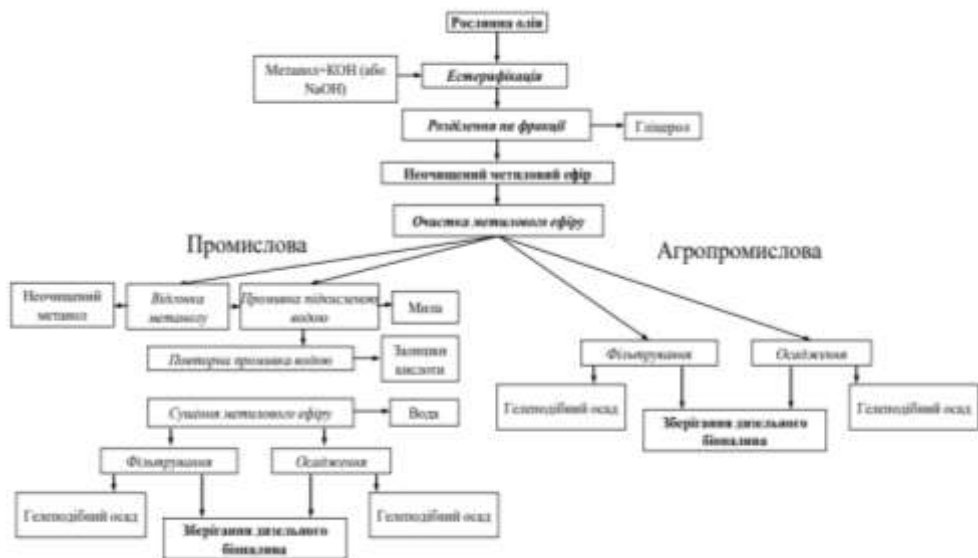


Рисунок 11.2 – Технологічна схема виробництва біодизеля

3 Вибір сировини для біоенергетичних технологій

Вибір сировини визначає ефективність та економіку біоенергетичного проекту. Основні критерії включають доступність та кількість відходів, вміст бажаних компонентів (цукрів, жирів, крохмалю, клітковини), наявність домішок і вологість, а також екологічний вплив перероблення.

Сировина для біогазу

Для анаеробного зброджування потрібна біорозкладна сировина з низьким вмістом лігніну. Це можуть бути відходи харчової промисловості (продукти перероблення овочів, фруктів, молока, м'ясоперероблення), кухонні та ресторанный відходи, осади стічних вод і жири. Важливим фактором є співвідношення вуглецю до азоту (C/N в межах 20–30) та відсутність інгібіторів (солей, важких металів).

Добавлення жирів чи молочної сироватки підвищує вихід біогазу, але надлишок жирних кислот може гальмувати процес, тому потрібна еко-зброджувальна стратегія.

Сировина для біодизеля

Відпрацьовані кулінарні олії та жири мають низьку вартість і зменшують конкуренцію із харчовими культурами. Проте висока кислотність потребує попереднього оброблення та застосування кислотних каталізаторів. Жири тваринного походження дають паливо з високим метановим числом, але вимагають ретельного очищення. Також в якості сировини можуть використовуватися рослинні олії нижчої якості (макадамія, горіхова олія, залишки олієпресів). Вибір каталізатора залежить від вмісту вільних жирних кислот, тому при низьких FFA (>1 %) застосовують лужну трансестерифікацію, при високих – кислотну або ферментативну.

Сировина для біоетанолу

Вибір сировини для виробництва біоетанолу залежить від регіональних умов та наявності ресурсів. На сьогоднішній день основний обсяг етанолу виробляють із крохмалю та цукрових культур, зокрема кукурудзи та цукрової тростини. Для використання відходів харчової промисловості звертають увагу на:

– Цукрові побічні продукти (меяса, патока, сироватка) містять легкоферментовані цукри, вихід етанолу при цьому обмежений вмістом цукру.

– Крохмалевмісні відходи (черствий хліб, відходи кондитерського виробництва, картопляні відходи) вимагають ферментативного або кислотного гідролізу до простих цукрів.

– Целюлозні відходи (солома, лушпиння, макуха). Переваги використання цього виду сировини полягають у відсутності конкуренції з харчовими культурами та їх велика кількість, однак важко виділити цукри, для цього необхідний попередній розрив структури целюлози й видалення лігніну.

Сировина для твердого біопалива

Головними чинниками при виборі сировини для виробництва твердого біопалива є їх доступність та енергетична щільність. Пелети та брикети виробляють із зернової соломи, лушпиння соняшнику, рисової лузги, шроту, макухи, кісточок фруктів та виноградних вичавок. Важливими параметрами при виборі сировини є вміст золи, вологість ($\leq 10\%$), механічна стійкість та теплотворна здатність. До недоліків можна віднести те, що високий вміст вологи вимагає сушіння перед пресуванням, а надлишок хлоридів може викликати корозію котлів.

4. Поєднання виробництва харчових продуктів і енергії в одному циклі

Концепція інтегрованих систем «їжа-енергія»

Оскільки світ стикається з подвійною кризою продовольчої безпеки та зміни клімату, необхідні інноваційні рішення для забезпечення сталого майбутнього. Одним з найперспективніших підходів, що з'явилися в останні роки, є концепція інтегрованих продовольчих та енергетичних систем (IFES). Ці системи спрямовані на виробництво як продуктів харчування, так і енергії з однієї й тієї ж землі, створюючи кругові потоки ресурсів, які приносять користь фермерам, громадам та довкіллю.

Ідея поєднання виробництва харчових продуктів та енергії полягає у створенні замкнених потоків матеріалів і енергії. *Integrated Food–Energy Systems* (IFES) виробляють та використовують відновлювану енергію на господарствах, що підвищує економічну стійкість через максимальне використання поживних і енергетичних потоків.

Інтегровані продовольчі та енергетичні системи розроблені для оптимізації землекористування, мінімізації відходів та підвищення стійкості шляхом поєднання сільськогосподарського виробництва з виробництвом відновлюваної енергії. Замість того, щоб вирощувати продовольчі та енергетичні культури окремо або надавати пріоритет одній над іншою, IFES прагне гармонізувати ці результати, щоб створити збалансовану систему, яка задовольняє численні потреби. Ця інтеграція може приймати різні форми, такі як поєднання сільськогосподарських культур із сонячними панелями (агровольтаїка), використання відходів тваринництва для виробництва біогазу або культивування водоростей, які можуть забезпечити як їжу, так і паливо.

Одним із найпереконливіших аспектів IFES є потенціал синергії між компонентами. Наприклад, залишки рослинництва та відходи тваринного походження можна подавати в анаеробні дигестати для виробництва біогазу – чистого та відновлюваного джерела енергії. Побічний продукт цього процесу, відомий як дигестат, багатий на поживні речовини та може використовуватися як органічне добриво, зменшуючи залежність від хімічних речовин та замикаючи цикл поживних речовин. Аналогічно, риби можна інтегрувати з вирощуванням овочів в аквапонічних системах, де риби відходи удобрюють рослини, а рослини очищують воду.

Екологічні переваги IFES також є суттєвими. Виробляючи енергію на місці, ферми можуть зменшити свою залежність від ископного палива, тим самим знижуючи викиди парникових газів. Водночас використання органічних відходів як ресурсу допомагає зменшити забруднення та покращити стан ґрунту. Крім того, диверсифіковані системи є більш стійкими до потрясінь, таких як екстремальні погодні явища або коливання ринку, оскільки вони не залежать від одного продукту для отримання доходу чи виживання.

З економічної точки зору, інтегровані системи пропонують численні потоки доходу. Фермери можуть продавати не лише харчові продукти, а й енергію, таку як електроенергія від сонячних панелей або газ від біореакторів. Така диверсифікація може стабілізувати доходи та створити нові можливості для розвитку сільських районів. У багатьох країнах, що розвиваються, де доступ до енергії залишається обмеженим, IFES може бути потужним інструментом для розширення прав і можливостей громад та зменшення бідності.

Незважаючи на численні переваги, впровадження IFES пов'язане з певними труднощами. Початкові інвестиційні витрати можуть бути високими, особливо для технологій відновлюваної енергетики. Для ефективного управління та обслуговування систем потрібні технічні знання, а політична підтримка часто бракує. Однак за допомогою належного навчання, стимулів та інфраструктури ці перешкоди можна подолати. Уряди та агентства розвитку дедалі більше визнають важливість інтегрованих підходів і починають просувати IFES через дослідницькі програми, демонстраційні проекти та ініціативи з нарощування потенціалу.

У добре спроектованих системах IFES фермери можуть:

1. Вирощувати енергетичні та харчові культури на різних полях або в сівозміні, щоб уникнути конкуренції за землю. Наприклад, кукурудза може використовуватися і для харчових продуктів, і для виробництва біогазу з силосу.
2. Використовувати побічні продукти як ресурс. Відходи харчового виробництва (солома, сироватка, кісточки) подаються у біогазову установку;

отриманий біогаз забезпечує тепло для переробки або електроенергію, а дигестат повертається на поля як добриво.

3. Встановлювати когенераційні та тригенераційні установки для спільного виробництва електроенергії, тепла та холодних потоків, зменшуючи енергоспоживання.

Майбутнє сільського господарства полягає в системах, які є регенеративними, інклюзивними та ефективними. Інтегровані продовольчі та енергетичні системи (IFES) втілюють ці принципи, перетворюючи відходи на багатство, поєднуючи традиційні знання із сучасними інноваціями та узгоджуючи діяльність людини з циклами природи.

Біорефінерії та циркулярна економіка

Біорефінерії – це інтегровані промислові комплекси, що здійснюють комплексну переробку біомаси з метою отримання широкого спектра продуктів: біопалива, теплової та електричної енергії, біохімікатів, біополімерів, а також харчових і кормових інгредієнтів. За своєю концепцією вони є аналогом нафтопереробних заводів, проте замість викопної сировини використовують відновлювані ресурси – сільськогосподарські культури, побічні продукти харчової промисловості, органічні відходи або спеціально вирощену енергетичну біомасу.

У харчовій промисловості біорефінерії можуть інтегрувати традиційні виробничі процеси з виробництвом етанолу, біогазу, біодизелю, органічних кислот, амінокислот, біопластиків (наприклад, PLA) та високобілкових кормових добавок. Такий підхід дозволяє трансформувати відходи або побічні продукти у додаткові джерела доходу та зменшити витрати на утилізацію. Наприклад, завод Etanolix® у Фінляндії переробляє харчові відходи – непроданий хліб, кондитерські вироби, цукровмісні напої – на біоетанол, який використовується як компонент бензинових сумішей. При цьому тверді залишки після ферментації спрямовуються на виробництво кормових добавок, що забезпечує майже безвідходний цикл.

Іншим прикладом є пивоварні підприємства, які сушать та гранулюють відпрацьований солодовий жом, перетворюючи його на паливні пелети або корм для тварин. У молочній галузі сироватка – побічний продукт виробництва сиру – може ферментуватися для отримання біоетанолу, біогазу або лактози та білкових концентратів. Це не лише зменшує екологічне навантаження на очисні споруди, а й формує додаткові товарні потоки.

У ширшому контексті біорефінерії сприяють створенню замкнених виробничих циклів, де відходи одного процесу стають ресурсом для іншого. Наприклад, теплова енергія, що утворюється під час спалювання біогазу, може використовуватися для сушіння біомаси або підігріву ферментерів; вуглекислий газ, що виділяється під час ферментації, може застосовуватися у харчовому виробництві або тепличному господарстві. Така інтеграція підвищує загальну ресурсоефективність підприємства, знижує вуглецевий слід продукції та підвищує його конкурентоспроможність на ринку.

5. Перспективи біоенергетики в Україні та світі

Стан і плани розвитку в Україні

За даними Біоенергетичної асоціації України, на початок 2024 року в країні працювали 68 біогазових установок потужністю 135 МВт та 24 електростанції на біомасі сумарною потужністю 178 МВт. У 2020 році частка біомаси становила 98 %

у загальному обсязі відновлюваного тепла; планується, що до 2030 року біомаса та біогаз забезпечуватимуть близько 81 % відновлюваного тепла.

Національний план дій з відновлюваної енергетики (до 2030 р.). Згідно з документом, частка відновлюваних джерел у кінцевому енергоспоживанні має зрости до 27 % до 2030 року, зокрема в системах опалення – до 33 %, в електрогенерації – до 29 %, а у транспорті – до 17 %. План включає 38 заходів, серед яких розвиток генерації на біомасі й біогазі (1,681 млрд дол. інвестицій), створення теплогенераційних потужностей на біомасі (3,419 млрд дол.), а також стимулювання використання біоетанолу й біодизеля у транспорті. Очікується, що споживання рідких біопалив (біоетанолу, біодизеля) досягне 420 тис. тонн умовного палива, з яких 398 тис. тонн припадатиме на етанол із харчових культур, 10 тис. тонн – на етанол із відходів і 12 тис. тонн – на біодизель із відходів.

В Україні наявний значний ресурс аграрних відходів: потенціал твердого біопалива оцінюється у 35,3 млн т умовного палива на рік, а потенціал біогазу – у 1,6 млн т у. п. на рік. Це відкриває перспективи для децентралізованого енергопостачання, енергетичної незалежності фермерських господарств і зменшення викидів парникових газів. Важливими умовами є впровадження ринкових стимулів (тарифів на біометан, обов'язкових часток біопалива у бензині), розвиток інфраструктури збору та транспортування відходів, а також кредитно-фінансова підтримка дрібних виробників.

Особливої ваги набуває енергетичний аспект, оскільки перехід на біопалива місцевого виробництва виступає базовим інструментом децентралізації енергосистеми. Це мінімізує критичну залежність сільських громад від волатильності цін на імпортовані енергоносії та підвищує їхню автономність в умовах нестабільної роботи централізованих мереж.

Разом з тим, екологічна складова інтеграції біопалива корелює із засадами «зеленого переходу», забезпечуючи зниження емісії парникових газів та реалізацію принципу замкнутого циклу через використання побічних продуктів виробництва (дигестату) як високоєфективних органічних добрив. Соціальна значущість досліджуваних процесів проявляється у можливості оптимізації витрат сільського населення на енергозабезпечення та покращенні локальної інфраструктури, що в комплексі створює умови для стримування деструктивних демографічних тенденцій. Таким чином, інтеграція біопалив має розглядатися не лише як технологічне оновлення енергетичної бази, а як фундаментальний драйвер сталого розвитку сільських територій, що дозволяє конвертувати природно-ресурсний потенціал у реальну економічну та соціальну самодостатність громад.

Відповідно до статистичного звіту Bioenergy Landscape 2024 року Європейської біоенергетичної асоціації, біоенергетика має значний вплив на економіку та зайнятість у ЄС. Вона забезпечила близькомільйона прямих та непрямих робочих місць в ЄС у 2019 р. Так, біоенергетика – найбільший роботодавець серед усіх ВДЕ. З огляду на енергетичний перехід, який триває, прогнозується, що ця цифра зросте і досягне понад 1,5 мільйона робочих місць до 2050 р. В Україні також повинна зберегтись дана тенденція, оскільки можна спостерігати розвиток вітчизняної біоенергетики за останні роки.

Окремого наукового осмислення потребує питання екологічного балансу та рециркуляції поживних речовин. Інтенсивне вилучення побічної продукції

рослинництва (соломи, стебел кукурудзи) для енергетичних потреб несе ризики дегуміфікації ґрунтів. Тому модель інтеграції повинна обов'язково включати механізм повернення органіки в землю. У випадку спалювання біомаси — це використання золи як мінерального добрива, а при біогазових технологіях - в несення рідкого та твердого дигестату. Саме такий замкнутий цикл дозволяє позиціонувати біоенергетику не як конкурента продовольчій безпеці, а як елемент відновлювального землеробства.

Світові тенденції

Підсумки світового огляду REN21 за 2025 рік показують, що сучасна біоенергетика (без традиційного використання дров) забезпечувала 5,8 % світового кінцевого споживання енергії у 2022 році. Сучасне біопаливо використовується переважно в транспорті, промисловості та виробництві електроенергії; частка твердих біопалив у глобальному споживанні тепла становила 8,3 %.

Виробництво рідкого біопалива у 2023 році досягло 175,2 млрд л, що на 7 % більше, ніж у попередньому році, завдяки збільшенню виробництва етанолу та біодизелю у Бразилії, Індії, Індонезії та США. У Бразилії закон «Паливо майбутнього» підвищив вимогу щодо вмісту етанолу у бензині до 30 % і передбачає збільшення частки біодизелю до 20 % до 2030 р. . Індія у 2024 р. виробила 6,35 млрд л етанолу та прагне довести обов'язкову домішку до 20 %, однак досягла лише 15 % . У США виробництво біодизелю та його споживання у 2024 р. дещо зменшилися, натомість виробництво етанолу зросло до рекордних 61,4 млрд л.

Загальна встановлена потужність біоенергетичних електростанцій у світі у 2024 р. становила 150,8 ГВт, причому значну частку приросту дали Китай та Франція. Біогаз та біометан стають важливим заміником природного газу; більшість установок зосереджені у Європі, Китаї та США, де існує мережа для впорскування біометану в газопроводи.

Контрольні питання.

1. Назвіть види біопалива, що можуть виготовлятися з відходів харчової промисловості.

2. Опишіть основні етапи отримання біогазу за допомогою анаеробного зброджування.

3. Які відходи харчової промисловості використовують як сировину для виробництва біогазу та які переваги має цей процес?

4. Що таке реакція трансестерифікації і як вона застосовується при виробництві біодизелю?

5. Які види сировини можна використовувати для виготовлення біодизелю і які обмеження існують?

6. Що таке біоетанол, які культури слугують для його виробництва і які переваги та недоліки має цей вид палива?

7. Чому поєднання виробництва харчової продукції та біоенергетики в одному циклі є економічно та екологічно вигідним?

8. Які перспективи розвитку біоенергетики в Україні та світі, особливо з огляду на енергетичну незалежність та скорочення викидів CO₂?

9. Чому біоенергетика сприяє утилізації відходів і зменшенню навантаження на полігони?

ТЕМА 12. ЕНЕРГЕТИЧНИЙ АУДИТ ТА ЦИФРОВЕ ВИМІРЮВАННЯ

1. Засоби та прилади для вимірювання споживання енергії, води, газу, пари.
2. Правила та періодичність проведення вимірювань.
3. Оброблення даних та побудова енергетичного балансу підприємства.
4. Впровадження системи моніторингу та обліку енергії.

Енергетичний аудит у промисловості (зокрема в харчових технологіях) – це систематизований аналіз використання та споживання енергії з метою виявлення, кількісного оцінювання та документування можливостей підвищення енергоефективності. Саме таке визначення закріплено в Законі України «Про енергетичну ефективність».

В умовах зростання вартості енергоносіїв і підвищених вимог до сталості (ESG), харчові підприємства виграють найбільше тоді, коли поєднують енергоаудит із *цифровим вимірюванням*: інтелектуальними лічильниками, автоматизованими системами збору даних, SCADA/EMS, та керованою якістю даних.

«Цифрове вимірювання» в цій лекції означає не просто наявність лічильника, а побудову **керованого потоку даних**: від датчика → через шлюз/мережу → до системи зберігання → до аналітики й управлінських рішень. В українському правовому полі надійність вимірювань підкріплена вимогами законодавчо регульованої метрології: засоби вимірювальної техніки, що застосовуються у розрахунках за енергоносії (електроенергія, газ, вода тощо), підлягають періодичній повірці, а міжповірочні інтервали встановлюються уповноваженим органом.

Харчові підприємства (молочні, м'ясопереробні, хлібопекарські, напої, заморожування тощо) є енергоємними через поєднання теплових та холододових процесів, санітарних режимів (CIP), роботи насосів, компресорів, вентиляторів, холодильних машин, котельного та теплогенеруючого обладнання, а також через високі вимоги до стабільності параметрів середовища (температура, вологість, тиск) і безпечності харчового продукту.

На нормативному рівні в Україні *енергетичний аудит* визначений законом, а питання достовірності вимірювань підтримуються законодавством про метрологію: діяльність, пов'язана з розрахунками за постачання/споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електрична і тепла енергія, газ, вода тощо), належить до сфери законодавчо регульованої метрології. Це означає, що для комерційного обліку мають використовуватися справні та повірені засоби обліку, а інтервали повірки встановлені нормативно.

На рівні ЄС (як орієнтир найкращих практик) переглянута Директива з енергоефективності (EU) 2023/1791 прямо посилює роль енергоменеджменту та енергоаудитів і встановлює вимоги до регулярності аудитів для підприємств, що перевищують визначені пороги споживання енергії (сумарно за всі енергоносії).

1. Засоби та прилади для вимірювання споживання енергії, води, газу, пари

У межах енергетичного аудиту доцільно відрізнити дві категорії вимірювань: *Комерційний (розрахунковий) облік* – використовується для фінансових розрахунків з постачальниками/операторами мереж і має підпорядковуватися вимогам законодавчо регульованої метрології (повірка, міжповірочні інтервали,

вимоги до застосування). Для електроенергії додатково діють вимоги Кодексу комерційного обліку (терміни, АСКОЕ, синхронізація часу, придатність даних).

Технологічний (внутрішній) облік/моніторинг – потрібен для управління виробничими дільницями, пошуку втрат, нормування, побудови енергобалансу і M&V ефекту заходів. У навчальних матеріалах з енергоаудиту підкреслюється, що аудит починається із збору первинних даних (паливо, вода, електроенергія) та аналізу структури енергоспоживання, а потім переходить до вивчення потоків і додаткових вимірювань на ключових споживачах.

Принципи роботи ключових груп приладів

1. Електроенергія (кВт·год, кВт, параметри якості). Основні прилади – лічильники активної / реактивної енергії та аналізатори / реєстратори електричних параметрів (на ввіді підприємства, на цех, на лінію/агрегат). Для цифрового вимірювання важливо, що Кодекс комерційного обліку визначає інтервальні лічильники (дані за періодами часу), поняття інтервалу часового ряду, процедури валідації та агрегації даних, а АСКОЕ включає засоби зв'язку й синхронізації часу.

2. Вода (м³) та технологічні рідини. Основні прилади – водолічильники та витратоміри. У «комунальному» контексті вузол обліку відповідно до Закону про комерційний облік теплової енергії та водопостачання – це комплекс пристроїв / ЗВТ для вимірювання спожитої теплової енергії та води та технічної реєстрації результатів, включаючи засоби дистанційної передачі (за наявності).

За принципом дії у промисловості типові: механічні (крильчаті / турбінні / вставні), ультразвукові (час проходження), електромагнітні (для провідних рідин). Дослідження щодо енергомоніторингу вказує, що ультразвукові лічильники менш чутливі до зношування та краще підтримують збір та аналіз даних, тоді як механічні – надійні, але точність може страждати через зношування.

3. Газ (м³ або енергія за теплою згоряння). Типові лічильники: діафрагмові (мембранні), роторні, турбінні, ультразвукові. Важливу «цифрову» частину газового обліку на промисловості є корекція до стандартних умов і перерахунків у енергію (за складом/теплою згоряння). OIML R 137 підкреслює, що рекомендація застосовується до газових лічильників різних принципів, які вимірюють кількість газу в об'ємних, масових або енергетичних одиницях.

4. Пара (т/год, кг/год, ГДж/год або кВт теплової потужності). «Пара» як енергоносії складніша, оскільки для енергетики процесу важливо знати масову витрату та ентальпію (функція тиску / температури / ступеня сухості). Тому практично часто використовують витратоміри з компенсацією тиску й температури.

2. Правила та періодичність проведення вимірювань

Україна (метрологія та повірка). Закон України «Про метрологію та метрологічну діяльність» встановлює, що законодавчо регульовані ЗВТ в експлуатації підлягають періодичній повірці та повірці після ремонту. Також закон визначає, що сфера законодавчо регульованої метрології охоплює, зокрема, торговельно-комерційні операції та розрахунки між покупцем і продавцем (постачальником) під час постачання та/або споживання енергетичних і матеріальних ресурсів (електричної і теплової енергії, газу, води тощо).

Міжповірочні інтервали залежать від категорії ЗВТ. У переліку міжповірочних інтервалів для законодавчо регульованих ЗВТ наведено, зокрема: водолічильники – 4 роки; лічильники газу та пристрої перетворення об'єму – 2 роки

для класу 1,0 та 8 років для класу 1,5; для електрولیчильників наведено диференційовані інтервали (залежать від типу: електромеханічні чи статичні, однофазні чи трифазні, класи точності, активна чи реактивна енергія), а також окремо зазначений інтервал 1 рік для лічильників класу точності 0,01–0,1.

Кодекс комерційного обліку електричної енергії вводить поняття АСКОЕ та прямо включає в систему зв'язок і синхронізацію часу, а також визначає «інтервал часового ряду», «агрегацію», «валідацію даних» тощо.

Кодекс також вказує на обов'язковість вимог до облаштування засобів комерційного обліку при проектуванні чи реконструкції та на неможливість обмежувати експлуатацію справних і повірених засобів (за умови виконання низки критеріїв).

ЄС (енергоаудити та регулярність).

Директива (EU) 2023/1791 у статті про енергоменеджмент та енергоаудити встановлює, що підприємства з середнім річним споживанням понад 10 ТДж енергії (за всіма енергоносіями сумарно) мають підпадати під енергоаудит, якщо не впровадили систему енергоменеджменту; перший аудит – до 11.10.2026, наступні – принаймні кожні 4 роки. Для підприємств понад 85 ТДж встановлено вимогу мати систему енергоменеджменту до 11.10.2027. Також у директиві зазначено, що енергоаудити мають враховувати релевантні стандарти (EN ISO 50001, EN 16247-1 тощо).

Закон України «Про енергетичну ефективність» визначає енергоаудит і встановлює вимоги до його виконання (незалежність/конфлікт інтересів, договірні умови, істотні умови договору тощо), але норма загальної обов'язкової періодичності для всіх підприємств не зафіксована – тобто це поле слід вважати невизначеним без посилення на спеціальні програми/вимоги державної підтримки чи галузеве регулювання.

Методика відбору точок вимірювання.

У навчальній методології енергоаудиту робота переходить від «загальних даних» до конкретних потоків і споживачів: збір первинних даних → аналіз структури → нанесення місць споживання/передачі енергоресурсів на технологічну схему → складання карти використання енергоресурсів → визначення пріоритетів для поглиблених вимірювань.

Для харчового підприємства зручно використовувати правило «від межі до агрегату»:

1. Межа підприємства – головні вводи електроенергії, газу, води; (якщо є) вхід пари / теплоносія або власна котельня.

2. Енергоцентр – котельня (газ → пара/гаряча вода), компресорна (електроенергія → стиснене повітря), холодильно-амоніачна/фреонова станція (електроенергія → холод), насосні.

3. Дільниці/лінії – пастеризування / стерилізування, випарювання/сушіння, миття СІР, фасування, склади холоду, вентиляція.

4. Втрати та повернення – конденсат (пара), продування котлів, витоки стисненого повітря, тепловтрати мереж, «нічне/холосте» електроспоживання.

Нормативні акти, як правило, не задають єдину частоту технологічних вимірювань для енергоаудиту, натомість частота визначається завданням аудиту та природою процесу (динаміка навантаження). Це поле для більшості «внутрішніх»

вимірювань – методичне, а не суто нормативне (тобто залежить від мети). Підхід ISO 50002/EN 16247 – спочатку спланувати аудит і визначити, які дані потрібні.

Практично для харчових підприємств рекомендовано: для електроенергії – інтервальні дані (типово 1–15 хв), щоб бачити піки / цикли; для пари / газу / води – інтервали 15–60 хв (або частіше на критичних СІР-процесах); для виробничого випуску (т/добу, партії) – узгодити часові мітки із енергетичними рядами, інакше неможливо коректно обчислити питомі витрати.

3. Оброблення даних та побудова енергетичного балансу підприємства

У цифровому енергоаудиті «дані» зазвичай приходять із різних сфер діяльності, зокрема комерційний облік (рахунки, покази), АСКОВЕ/лічильники, дані виробництва (тоннаж / партії), інколи – лабораторні дані (склад газу / параметри теплоносія). Кодекс комерційного обліку прямо використовує терміни «валідація», «агрегація» та «часові ряди» для забезпечення придатності даних до подальшого оброблення.

Практичний навчальний алгоритм:

1. Збір даних: імпорт із лічильників; фіксуємо джерело та частоту.
2. Нормалізація одиниць: зводимо до єдиних форматів (кВт·год, м³, кг, ГДж). Для зведеного енергобалансу часто використовують Дж/ГДж або «умовне паливо»; у навчальних матеріалах зазначено, що умовне паливо має теплотворну здатність 29,3 ГДж/т.

3. Синхронізація часу: приводимо часові мітки до єдиної шкали; вирівнюємо інтервали (наприклад, до 15 хв або 60 хв).

4. Очищення: виявляємо пропуски, дублікати, «нульові значення», стрибки. Вводимо правила:

– пропуск $\leq N$ інтервалів \rightarrow інтерполяція/перенесення;

– пропуск $> N \rightarrow$ маркуємо як missing і не використовуємо для висновків без пояснення.

5. Валідація: перевіряємо межі фізично можливих значень (напруга, витрата, тиск), узгодженість «вхід–вихід» (наприклад, електроспоживання компресорної має корелювати з витратою стисненого повітря).

6. Агрегація: підсумки по зміні / добі / місяцю; розподіл по цехах; отримання питомих показників (кВт·год/т продукції тощо).

Енергетичний баланс у навчальних матеріалах визначається як повна кількісна відповідність між витратою палива й енергії в енергетичному господарстві; він має прибуткову (надходження) і видаткову (використання, втрати, перетворення, транспортування, накопичення) частини.

Для діючого підприємства основою мають бути дані приладового обліку та контрольні виміри. Важливий практичний критерій якості балансу – **нев'язка**, у навчальних матеріалах зазначено, що в нормальних умовах вона не повинна перевищувати 2,5% сумарної витрати енергоносія (як критерій достовірності аналітичного балансу).

Приклад енергетичного балансу підприємства

Нижче – навчальний приклад (умовні дані) для середнього харчового підприємства з власною котельнею (газ \rightarrow пара), холодильним господарством та стисненим повітрям. Числа наведені для демонстрації методики; для реального балансу потрібні фактичні покази й фактична теплота згоряння газу (це поле тут

умовне / невизначене, тому наведено «обраний для прикладу коефіцієнт» як навчальний).

Обрані навчальні коефіцієнти перерахунку (для прикладу): 1 кВт·год = 3,6 МДж (фізична константа); природний газ, прийнято 34 МДж/Нм³; пара: енергія пари залежить від тиску / температури / ентальпії; для спрощення в балансі нижче парова енергія врахована «через паливо котельні» (газ), а не як окремий вхідний енергоносій.

Енергобаланс за місяць (умовний приклад):

| Стаття | Первинні дані | Перерахунок у ГДж (для балансу) | Коментар |
|--|------------------------|---------------------------------|---|
| Надходження електроенергії | | | |
| Електроенергія (ввід) | 420 000 кВт·год | 1 512 ГДж | 420 000×3,6 МДж |
| Природний газ (на котли) | 85 000 Нм ³ | 2 890 ГДж | 85 000×34 МДж (коеф. умовний) |
| Вода (як ресурс, не енергія) | 12 000 м ³ | - | Для водного балансу; енергетично враховується через підігрів/насоси |
| Використання електроенергії (розподіл) | | | |
| Холодильна станція і склади холоду | - | 520 ГДж | Значна частка типова для харчових виробництв |
| Компресорна (стиснене повітря) | - | 240 ГДж | Потенціал втрат через витоки (перевірка ультразвуком/профілем) |
| Насоси/перекачка/вентиляція | - | 260 ГДж | Залежить від гідравліки й режимів |
| Технологічні лінії (приводи, мішалки, фасування) | - | 310 ГДж | Узгоджується з випуском продукції |
| Освітлення, допоміжні системи, офіси | - | 90 ГДж | Часто легко оптимізується |
| Разом розподілено електроенергії | - | 1 420 ГДж | |
| Нев'язка електроенергії | - | 92 ГДж (≈6,1%) | Потрібна деталізація/втрати/неточності; >2,5% — сигнал проблеми даних |
| Використання газу (через котельню → пара/тепло) | | | |
| Тепло на пастеризацію/нагрів процесів | - | 1 450 ГДж | Умовно з енергобалансу котельні |
| SIP/SIP, гаряча вода, мийка | - | 520 ГДж | Для харчових підприємств критичний споживач |

| Стаття | Первинні дані | Перерахунок у ГДж (для балансу) | Коментар |
|--|---------------|---------------------------------|---|
| Надходження електроенергії | | | |
| Втрати котельні/мереж/продавця/неконденсат | - | 620 ГДж | Оцінюється через вимірювання, інвентаризацію пасток, температури мереж |
| Разом розподілено газу (тепла) | - | 2 590 ГДж | |
| Нев'язка тепла (газу) | - | 300 ГДж (≈10,4%) | Для навчального прикладу показано, як «вилазять» невимірні втрати/помилки |

Як читати цей приклад: якщо нев'язка значна, це означає або (а) відсутність лічильників на ключових гілках (немає «розподільних» точок), або (б) різна частота / часова розбіжність даних, або (в) невраховані втрати чи некоректні коефіцієнти перерахунку (наприклад, теплота згоряння газу), або (г) проблеми з повіркою/справністю приладів у комерційних точках. У нормативній логіці законодавчо регульованої метрології та комерційного обліку ці питання критичні, бо впливають на достовірність вимірювань і розрахунків.

4. Впровадження системи моніторингу та обліку енергії

У промисловій практиці цифровий енергомоніторинг поєднує: (1) польові прилади, (2) засоби збору/передачі, (3) зберігання та обробку часових рядів, (4) інтерфейси для аналізу і рішень. Кодекс комерційного обліку для електроенергії прямо описує, що АСКОЕ включає ЗВТ, зв'язок, синхронізацію часу та функції збору/обробки/збереження/відображення інформації.

Кроки впровадження

Наведемо навчальну дорожню карту, яка узгоджена з логікою енергоаудиту (від даних до рішень):

1. Передпроектна діагностика: які енергоносії, де «вузькі місця», які лічильники вже є, чи повірені вони (для комерційних цілей), які міжповірочні інтервали.

2. Опис меж і енергопотоків: мапа потоків (газ → котли → пара → процеси → конденсат; електрика → холод/компресори/приводи). Логіка «карти використання ПЕР» і нанесення точок споживання на схему описана в навчальному модулі енергоаудиту.

3. Проект точки вимірювання: пріоритетність найбільш енергоємних дільниць; у харчових — холод, пара/СІР, компресори.

4. Вибір обладнання: тип приладів (за середовищем і вимогами), інтерфейси, вимоги до монтажу, повірка/сертифікація. Вибір має узгоджуватися із технічним регламентом засобів вимірювальної техніки, який в Україні розроблений на основі Директиви 2014/32/ЄС (MID).

5. Інтеграція даних: налаштування збору, синхронізація часу, визначення «інтервалу часового ряду», правила валідації.

6. Аналітика й управлінські цикли: звіти, енергобаланси, KPI/EnPI, тривоги. У працях з енергомоніторингу підкреслюється, що система має бути не лише «облік», а інструмент управління з можливістю статистичного аналізу й розрахунку енергобалансів.

7. Постійне вдосконалення: повторні вимірювання, корекція балансу, адресна робота з втратами (витоки, режими, ізоляція, пастки пари тощо).

Ключові проблеми, які зазвичай виявляють шляхом енергоаудиту та цифрових вимірювань:

– «Сліпа зона» пари: немає даних, скільки пари реально споживає CIP/SIP, процес пастеризування чи підігрівання води. Встановлення витратоміра пари з T,P компенсацією дозволяє перейти від «оцінок» до масової витрати та теплової енергії.

– «Невидимі» витоки стисненого повітря: без профілю електроспоживання компресорів і без маркування режимів складно відрізнити корисний від «витоків» навантаження. Навчальні матеріали з енергоаудиту прямо відносять компресорні установки до специфічних споживачів, де потрібні додаткові вимірювання.

– надлишковий холод уночі/у вихідні: без інтервального профілю електроенергії та температурних датчиків неможливо відокремити «безпеку продукту» від «перехолодження». Публікації з енергомоніторингу описують системи, які збирають дані від лічильників і датчиків та забезпечують аналітику й рейтинги підрозділів.

Енергетичний аудит у харчових технологіях стає максимально корисним тоді, коли підприємство переходить від «епізодичних замірів» до системної цифрової моделі даних: вимірювання → валідація → баланс → рішення. Українське законодавство задає рамку для достовірності комерційних вимірювань (періодична, міжперіодична перевірка), а сучасні підходи ЄС додатково задають орієнтири регулярності енергоаудитів і впровадження енергоменеджменту для великих споживачів.

Контрольні питання.

1. Поясніть, що таке енергетичний аудит та які його основні завдання у харчовій промисловості.

2. Які засоби та використовують для вимірювання споживання енергії, води, газу та пари?

3. У чому полягає відмінність між комерційним (розрахунковим) та технологічним (внутрішнім) обліком енергоресурсів?

4. Які дані необхідні для побудови енергетичного балансу підприємства і як вони збираються?

5. Як відбувається впровадження систем моніторингу та обліку енергії (SCADA/EMS) та які їх переваги?

6. Які законодавчі вимоги регулюють періодичність перевірки засобів вимірювальної техніки та надійність комерційних лічильників?

7. Чому якісні дані та надійні вимірювання важливі для прийняття управлінських рішень у сфері енергоефективності?

8. Як сучасні цифрові технології (інтелектуальні лічильники, Інтернет речей) сприяють покращенню енергоменеджменту?

9. Яку роль відіграють європейські та українські нормативи (наприклад, директива ЄС з енергоефективності, Закон України «Про енергетичну ефективність») у проведенні енергоаудитів?

ТЕМА 13. ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕПЛОВІ НАСОСИ

1. Критерії вибору енергоефективного обладнання та оцінка окупності.
2. Заморозження, сушіння та підігрівання з використанням теплових насосів.
3. Вплив заміни обладнання на експлуатаційні витрати та екологічні показники.

Харчова промисловість є одним із найбільш енергоємних секторів економіки. На оброблення сировини, приготування продуктів, охолодження та зберігання припадає значна частка витрат на електроенергію й теплову енергію. Аналітики зазначають, що енергія є другою за величиною статтею витрат у харчовому виробництві після сировини: в середньому 3–8 % виручки підприємства йде на оплату енергоносіїв. Дослідження свідчать, що близько 40 % енергії, що споживається у типовому харчопереробному підприємстві є марнотратством – обладнання працює без навантаження, холодильні системи циклічно запускаються без потреби, а стислий повітряний мережевий тиск перевищує реальну потребу. Тому енергоефективність стає одним із головних напрямів стратегії сталого розвитку та дає можливість скоротити операційні витрати, знизити викиди парникових газів і підвищити конкурентоздатність підприємства.

1. Критерії вибору енергоефективного обладнання та оцінка окупності

Енергетичний аудит. Перше, що рекомендують фахівці, – провести енергетичний аудит виробництва. Це дає змогу визначити «енергетичних дармоїдів» та оцінити, де та коли споживається найбільше енергії. Детальні вимірювання потоків тепла, пари, газу та електроенергії допомагають скласти енергетичний баланс і встановити точки найбільших втрат.

Моніторинг та аналітика. Після аудиту вкрай важливо встановити систему моніторингу, яка дозволяє фіксувати споживання енергії різними системами (холодильними, компресорними, тепловими тощо) і виявляти невинуваті пікові навантаження. Енергомоніторинг забезпечує зниження експлуатаційних витрат у середньому на 28 %, а також на 35 % скорочує плату за пікову потужність і на 42 % – вуглецевий слід. Така система стає основою прийняття рішень щодо модернізації.

Енергоспоживання та ефективність. Під час вибору машин слід порівнювати питомі енерговитрати обладнання різних виробників. Наприклад, сучасні чиллери з великими економайзерами використовують холодне зовнішнє повітря для генерації охолодженої води замість компресійних холодильних машин, що суттєво зменшує електроспоживання. Для змішувальних баків доцільно обирати мішалки з гідрофойлами, які забезпечують ту ж силу перемішування, що й традиційні пропелери, але споживають менше електроенергії. На ранніх етапах проектування варто передбачити ізоляцію зон, що потребують підігріву, щоб мінімізувати тепловтрати.

Втрати тепла й утилізація відпрацьованого тепла. Значна кількість енергії втрачається у вигляді відпрацьованого тепла з димових газів, конденсату чи гарячого повітря. Використання конденсаційних економайзерів та теплообмінників дозволяє підвищити коефіцієнт корисної дії (ККД) парових котлів на 10–25 % і забезпечити

додаткову економію палива 5–10 %. Повторне використання тепла для нагріву води чи попереднього підігріву повітря зменшує споживання палива.

Екологічні та експлуатаційні аспекти. При виборі обладнання слід враховувати не лише енергоспоживання, а й робочий ресурс, можливості технічного обслуговування, рівень шуму, використання холодильних агентів з низьким потенціалом глобального потепління (GWP), наявність функцій енергоаудиту (вбудовані датчики, IoT). Відсутність герметичності в холодильних системах, наприклад, призводить до витoku високоглобальних газів, що підвищує вуглецевий слід.

Таблиця 13.1 – Фактори вибору енергоефективного обладнання

| Критерій | Приклади енергоефективних рішень | Оцінка та ефект |
|-----------------------------|---|---|
| Питомі енергетичні витрати | Чиллери з економайзерами, мішалки з гідрофойлами, двигуни з електронно-комутованими моторами | Зменшення споживання електроенергії до 20–30 % |
| Варіативність навантаження | Частотно-регульовані приводи на вентиляторах, насосах та конвеєрах | 20–50 % економії на змінних режимах роботи |
| Теплова утилізація | Конденсаційні економайзери, рекуператори тепла із димових газів, теплові насоси | Підвищення ККД котлів на 10–25 %, економія палива 5–10 % |
| Екологічні вимоги | Використання холодильних агентів з низьким GWP, герметичні системи, автоматичний моніторинг витоків | Зменшення викидів парникових газів і відповідність нормативам |
| Автоматизація та моніторинг | Вбудовані датчики енергії, системи IoT, інтегровані енергоменеджмент системи | Середнє скорочення витрат на енергію 28 % і зменшення пікових навантажень на 35 % |

2. Заморожування, сушіння та підігрівання з використанням теплових насосів

Тепловий насос – це термодинамічна система, що переносить тепло від джерела з низькою температурою до споживача з більш високою температурою. На відміну від котлів, теплові насоси не спалюють паливо для виробництва тепла, а перекачують наявне тепло, використовуючи компресор, випарник, конденсатор та регулятор витрати. Ефективність системи вимірюється коефіцієнтом перетворення (COP) – відношенням теплової енергії, що подається, до електричної енергії, яку споживає компресор. Для промислових теплових насосів COP зазвичай становить 3–5, тобто на кожен кіловат електроенергії виробляється 3–5 кВт теплової енергії.

На відміну від традиційних парових котлів (COP < 1), теплові насоси рециклують та підвищують температуру низькопотенційного тепла — від вихлопних газів, вентиляційного повітря чи зливної води. Це означає менші рахунки за енергію й швидшу окупність інвестицій.

Застосування теплових насосів у харчовій промисловості

Сушіння та дегідратація. Сушильні процеси зазвичай використовують гаряче повітря від парових чи газових котлів. Однак лише 5–10 % підведеної енергії поглинається вологим матеріалом; решта втрачається з відпрацьованим повітрям. Дослідники показали, що 90–95 % цієї енергії можна відновити за допомогою теплового насоса, що істотно скорочує витрати на енергію та зберігає якість продукту. Випаровувач теплового насоса охолоджує та осушує вологе повітря,

водночас конденсатор підігріває його до необхідної температури для повторного використання.

Прикладами практичних ефектів є сушіння овочів (наприклад, цибулі), де економія енергії сягала 30 % і спостерігалось скорочення часу сушіння. У системах для сушіння картоплі встановлення теплового насоса дозволило зменшити споживання енергії на 70 % (конденсація 1500 кг води на годину) і скоротити споживання природного газу на 800 000 м³ на рік; проект окупився за чотири роки. Дослідження також показують, що теплові насоси в сушильних апаратах мають високі показники SMER (питоме вилучення вологи) та COP 2,5–3,9, що гарантує низьке енергоспоживання та якісний продукт.

Заморожування та охолодження. У системах заморожування теплові насоси відіграють подвійне значення, адже вони забезпечують охолодження та утилізують тепло, яке виділяється при заморожуванні продуктів. Наприклад, компанія GEA розробила лінії заморожування, де тепло, що відводиться з морозильних тунелів (в діапазоні від +90 °C до -18 °C), спрямовується на нагрівання води для миття та попереднього сушіння картоплі перед смаженням. В одному з проєктів це дозволило зменшити енергоспоживання при сушінні картоплі на 70 % і скоротити витрати природного газу. Крім того, система здійснює автоматичне регулювання морозильного обладнання та забезпечує додаткову економію електроенергії 10 % при збільшенні пропускної здатності на 20 %.

Підігрівання та пастеризування. Процеси пастеризування та стерилізування потребують підвищення температури продукту понад 70 °C, а потім швидкого охолодження. Зазвичай додаткове тепло забезпечується паром, а холод – водою з холодильних установок. Тепловий насос може одночасно відбирати тепло від охолоджуваного продукту та використовувати його для нагрівання іншої партії, що зменшує споживання як пари, так і холодоагенту. У результаті ефективний COP таких систем особливо високий. Теплові насоси можуть подавати температуру до 140 °C для сушіння, стерилізації та нагрівання води, забезпечуючи перехід до виробництва з низьким рівнем викидів.

Миття та CIP-процеси. Мийні процеси споживають значну кількість гарячої води. У традиційних системах вода підігрівається в котлі й подається через теплообмінник. Тепловий насос здатний відбирати тепло з вихлопного повітря або стічної води й використовувати його для підігрівання мийної води, що забезпечує економію енергії і зменшує викиди. Системи з рекуперацією тепла у CIP (Cleaning in Place) знижують витрати води й енергії та сприяють кращій санітарній безпеці.

Переваги та обмеження теплових насосів:

1. Енергетична ефективність та декарбонізація. Завдяки високому COP промислові теплові насоси можуть забезпечити скорочення споживання енергії до 70 % порівняно з традиційними системами. Це дозволяє істотно зменшити експлуатаційні витрати та викиди CO₂, особливо при використанні відновлюваної електроенергії.

2. Гнучкість в інтеграції. Теплові насоси можуть працювати одночасно на нагрівання та охолодження, що знижує кількість окремих агрегатів у виробництві та полегшує утилізацію тепла. Вони сумісні з існуючими теплообмінниками, сушарками чи охолоджувачами, що спрощує модернізацію.

3. Висока початкова вартість та температурні обмеження. Недоліками є відносно висока капіталомісткість і необхідність спеціальної технічної експертизи. Сучасні теплові насоси менш ефективні для процесів з температурами вище 150 °С, але дослідження спрямовані на розширення робочого діапазону. Крім того, потрібні належні обслуговування й контроль герметичності для запобігання витоку холодоагенту.

3. Вплив заміни обладнання на експлуатаційні витрати та екологічні показники

Економічний ефект

Переоснащення виробництва енергоефективним обладнанням дає змогу значно знизити експлуатаційні витрати. Запровадження систем моніторингу та оптимізаційних заходів забезпечує в середньому 28 % зниження енергетичних витрат, зменшує пікові навантаження на 35 % та скорочує вуглецевий слід на 42 %. Комплексна модернізація сушильних ліній та заміна котлів на теплові насоси забезпечують 70 % зменшення витрат на енергію при сушінні картоплі та повернення інвестицій за 4 роки.

Відповідно до опитування у харчовій промисловості, 62,1 % компаній протягом останніх двох років досягли помітного прогресу в підвищенні енергоефективності. Ініціативи з енергоефективності отримують 27,6 % бюджету на сталий розвиток, що більше, ніж витрати на упаковку чи зменшення відходів. Основною причиною такого фокусу є швидке повернення інвестицій: енергоефективні рішення забезпечують найкоротший строк окупності та допомагають виконувати вимоги законодавства щодо звітності про викиди.

Екологічний та соціальний ефект

Зниження викидів парникових газів. Замінюючи парові та газові котли тепловими насосами, підприємства зменшують споживання викопних видів палива, а отже – скорочують прямі викиди CO₂. Наприклад, перенесення тепла від заморожувального тунелю на підігрів води дозволяє скоротити споживання природного газу на 800 000 м³ на рік.

Покращення якості продукції та безпеки. Теплові насоси та сучасні системи керування забезпечують точний контроль температури під час сушіння, пастеризації та ферментації. Це позитивно впливає на якість продукції (краще збереження кольору, аромату, текстури) та зменшує ризики контамінації. Дослідження показали, що продукти, висушені з використанням теплового насоса, мають кращі фізичні властивості та менші втрати поживних речовин.

Відповідність нормативним вимогам і корпоративній репутації. Сталі інвестиції підвищують відповідність законодавству, що стає дедалі жорсткішим (наприклад, вимоги з кліматичної звітності й маркування сліду продукції). У 2025 році 36 % компаній зазначили, що законодавство є ключовим драйвером енергоефективності. Запровадження енергоефективних технологій також покращує репутацію бренду і дає перевагу при співпраці з великими рітейлерами, які вимагають низького вуглецевого сліду від своїх постачальників.

Таблиця 13.2 – Ефекти заміни обладнання

| Вид модернізації | Економічний ефект | Екологічний ефект |
|--|---|--|
| Теплові насоси для сушіння та пастеризації | Зниження витрат на енергію до 70 %, окупність 3–5 років | Скорочення споживання газу на сотні тисяч м ³ , зменшення CO ₂ , поліпшення якості продукції |
| Частотно-регульовані приводи на вентиляторах, насосах, компресорах | Економія електроенергії 20–50 %, швидка окупність (<2 років) | Зменшення пікових навантажень, зниження викидів від електростанцій |
| Система енергомоніторингу й автоматичне відключення устаткування | Зниження експлуатаційних витрат на 28 %, зменшення плати за пікову потужність на 35 % | Скорочення вуглецевого сліду на 42 %, прозорість даних для звітності |
| Конденсаційні економайзери та рекуператори тепла | Підвищення ККД котлів на 10–25 %, економія палива 5–10 % | Зменшення викидів за рахунок меншого спалювання палива |
| Світлодіодне освітлення та енергоефективні електродвигуни | Окупність 2–3 роки, економія до 50 % витрат на освітлення | Зменшення енергоспоживання, відсутність шкідливих ртутних ламп |

Отже, енергетична ефективність у харчовій промисловості — це поєднання технологічних інновацій і системного підходу. Важливо почати з енергетичного аудиту й моніторингу, що дозволяє виявити джерела втрат і сформувані пріоритети модернізації. При виборі нового обладнання потрібно оцінювати не лише його потужність і ціну, а й питоме споживання енергії, можливість регулювання навантаження, наявність систем рекуперації тепла, екологічні характеристики та вимоги до обслуговування.

Контрольні питання.

1. Які критерії слід враховувати при виборі енергоефективного обладнання для харчового підприємства?
2. Що таке повна вартість володіння (Total Cost of Ownership) і чому її потрібно враховувати при ухваленні інвестиційних рішень?
3. Як теплові насоси допомагають зменшити енергоспоживання під час заморожування, сушіння та підігрівання?
4. Порівняйте компресійні та абсорбційні теплові насоси. У яких випадках ефективніше використовувати кожен тип?
5. Як заміна застарілого обладнання на енергоефективне впливає на експлуатаційні витрати та викиди CO₂?
6. Наведіть приклади енергоефективного обладнання, що широко застосовується у харчовій промисловості.
7. Що таке коефіцієнт перетворення теплового насоса (COP) і які значення COP характерні для харчової промисловості?
8. Які обмеження та недоліки існують при використанні теплових насосів (температурний діапазон, капітальні витрати) і як їх враховувати під час планування?
9. Які державні та міжнародні програми підтримки стимулюють закупівлю та використання енергоефективного обладнання?

ТЕМА 14. РЕКУПЕРАЦІЯ ВІДПРАЦЬОВАНОВОГО ТЕПЛА ТА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ

1. Джерела відпрацьованого тепла на харчових підприємствах.
2. Методи рекуперації теплоти з конденсаторів холодильних машин та сушильних апаратів.
3. Теплова інтеграція та пінч-аналіз для мінімізації енергоспоживання.
4. Використання відпрацьованого тепла для підігрівання води й вентиляції.
5. Економічні та екологічні переваги впровадження системи рекуперації.

На харчових підприємствах значна частка енергії перетворюється на *відпрацьоване тепло* (у димових газах печей / котлів, у витяжному повітрі, у стоках, у конденсаті пари, у «відкинутому» теплі холодильних машин). У промисловості загалом відходить тепла є типовими й часто «невидимими» втратами, тому ключове завдання енергоменеджменту – зробити їх вимірюваними та зіставити з локальними потребами в теплі (вода, СІР, повітря, підігрів сировини, технологічні ванни, підігрів припливного повітря).

Технічно найчастіше економічно виправданими є рішення для низькопотенційного тепла (умовно нижче температури кипіння води), яке добре підходить для ГВП, миття / очищення, вентиляції та частини сушильних процесів. Особливо перспективні два «масові» джерела: конденсатори холодильних машин (тепло відведене з камер + робота компресора) та сушильні апарати (енергоємні процеси з великими тепловтратами з викидним повітрям). Для системного зниження енергоспоживання найкращі результати дає не «точкова» рекуперація, а теплова інтеграція з застосуванням пінч-аналізу (*Pinch Analysis*), який задає енергетичні «цілі» (мінімальні потреби в парі/гарячій воді та охолодженні) та правила проектування мереж теплообмінників.

1. Джерела відпрацьованого тепла на харчових підприємствах

Класифікація джерел за носієм та «якістю» тепла.

Інженерно корисно класифікувати відпрацьоване тепло за носієм (газ / повітря, рідина / вода, пара / конденсат, холодоагентний контур) та за температурним рівнем. На практиці на харчових підприємствах домінують низько- та середньопотенційні потоки, це тепле повітря 30–120 °С (вентиляція / сушіння), вода 25–60 °С (стоки, охолоджувальна вода, промивання), гарячий конденсат 60–90 °С, а також тепло конденсації в холодильних системах (часто 25–45 °С як «низькопотенційне» та 60–90 °С на ділянці супернагріву – залежить від режимів).

Особливість харчових виробництв – висока частка тепла від процесів нагрівання / охолодження рідин (пастеризування, варіння, стерилізування, промивання СІР), де теплообмінники можуть забезпечувати високу ефективність при малих температурних напорах і компактності, що робить їх базовим інструментом рекуперації та інтеграції.

Таблиця 14.1 дає узагальнену «карту» джерел відпрацьованого тепла для харчових підприємств. Наведені температури – орієнтовні та залежать від конкретного процесу, санітарних обмежень, графіків роботи та клімату (якщо точні значення не відомі – позначено як «залежить від умов»).

Таблиця 14.1 – Характеристика джерел відпрацьованого тепла

| Джерело відпрацьованого тепла | Типовий температурний рівень (°C) | Носій | Де виникає (приклади підгалузей) | Коментар щодо придатності для рекуперації |
|---|---|---------------------------|---|---|
| Димові гази печей / котлів / термоагрегатів | 100–500 (широкий діапазон) | Газ | Пекарські печі, обсмажування, котельня; у харчовій промисловості температура газу може сильно варіювати | Високий потенціал, але потрібні рішення проти корозії / забруднення; зазвичай доцільні повітря-повітря або газ-вода теплообмінники з очищенням |
| Витяжне / викидне повітря сушарок | часто 60–120 (для процесу сушіння; залежить від апарату) | Повітря | Сушіння овочів / фруктів, молочний порошок, хлібопекарські процеси | Енергоємне джерело; рекуперація через повітря-повітря теплообмінники / теплові насоси; обмеження — волога, пил, запахи (фільтрація/мийка) |
| Тепло конденсатора холодильних машин | «низькопотенційне» тепло, часто придатне для ГВП / підігріву (залежить від режимів) | Рідинний контур / повітря | Холодильні станції в м'ясній, молочній, заморожувальній, складській логістиці | Класична утилізація: підігрівання води / повітря, інколи – через супернагрівач для вищих температур; методика відбору тепла описана в профільних гайдлайнах |
| Тепло з охолодження продукту (пастеризування / охолодження) | 4–75 (для HTST пастеризування) | Рідина | Молочна промисловість: молоко нагрівають приблизно з 4°C до 72°C і потім охолоджують назад до 4°C | Дуже придатне до рекуперації через регенеративні секції пластинчастих теплообмінників; може повертатися 94–95% тепла пастеризованого молока |
| Гарячі стоки / стічні води процесів миття / варіння / консервування | 25–60+ (залежить від процесу) | Вода | Консервні заводи, овочепереробні, СІР, варильні цехи | Підходить для рекуперації «вода-вода» або «вода-тепловий насос»; важливі санітарні бар'єри (розділення контурів), ризики забруднень; рамкові підходи для харчових стоків розглядають у наукових роботах |
| Конденсат пари та «флеш-пара» | 60–100 (залежить від тиску / схеми) | Конденсат / пара | Варіння, стерилізування, | Ефективна утилізація через повернення конденсату, флеш-пару, |

| Джерело відпрацьованого тепла | Типовий температурний рівень (°C) | Носій | Де виникає (приклади підгалузей) | Коментар щодо придатності для рекуперації |
|------------------------------------|-----------------------------------|---------|-----------------------------------|--|
| | | | теплообмінники з паровим нагрівом | підігрів живильної води; класичні енергозберігаючі рішення описуються виробниками парової арматури |
| Вентиляційне витяжне повітря цехів | залежить від цеху / сезону | Повітря | Практично всі підгалузі | Типові рішення — пластинчасті (без змішування) або роторні (вищі ККД, але ризик перенесення запахів) рекуператори; можливий «performance gap» у реальній експлуатації через дисбаланс витрат, підсоси, забруднення |

2. Методи рекуперації теплоти з конденсаторів холодильних машин та сушильних апаратів

Будь-яка *холодильна машина* «перекачує» тепло від холодного джерела до теплого. Теплота, що відводиться в конденсаторі (або газоохолоджувачі для CO₂-систем), дорівнює сумі холодопродуктивності випарника та електричної потужності компресора:

$$Q_{\text{cond}} = Q_{\text{var}} + W_{\text{comp}} \quad (14.1).$$

Це безпосередньо впливає з енергетичного балансу та визначень COP (коефіцієнта перетворення) для холодильних/теплових машин.

Холодильні установки не лише охолоджують продукт, а й є ефективними генераторами тепла. Нагріті компресорні гази мають температуру близько 90 °C і можуть забезпечувати гарячу воду для підприємства. За аналітичними даними, установка, що споживає 1 кВт електроенергії, виділяє близько 4 кВт тепла; за допомогою теплообмінника між компресором і конденсатором можна отримувати 80 л гарячої води на годину. Існують дві основні схеми:

1. Теплоакumuляційна (водосховище) система. Гарячий газ із компресора проходить через теплообмінник у вигляді змійовика або пластинчастого теплообмінника, нагріваючи воду в баку. Така система здатна підігрівати воду до 60 °C і застосовується для нагрівання води в молочних фермах, на м'ясокомбінатах або в пивоварнях. Враховуючи, що приблизно 30 % енергії в доільному залі витрачається на нагрівання води, то установка рекуперації тепла може зменшити ці витрати наполовину.

2. Проточні системи. Гаряча вода отримується безпосередньо у теплообміннику, розташованому між компресором і конденсатором, причому вода нагрівається при кожному циклі й у такій системі з пластинчастим теплообмінником температура води може досягати 50–60 °C, а продуктивність – до 80 л/год. Використання рекуперації тепла поліпшує роботу холодильника, оскільки конденсор охолоджується ефективніше.

Типи теплообмінників для рекуперації від холодильної системи

– Пластинчасті теплообмінники – компактні, працюють на малих температурних напорах, мають високу інтенсивність теплообміну через турбулізацію і тонкі пластини; зазвичай менше схильні до забруднення порівняно з кожухотрубними за однакових умов, але потребують коректного підбору за в'язкістю робочої рідини.

– Паяні пластинчасті – компактні, забезпечують високий тиск та температуру в межах специфікації; часто застосовуються як економайзери.

– Кожухотрубні – більш толерантні до деяких забруднень, але мають більші габаритні розміри; вибір «залежить від умов».

Міні-приклад теплового балансу. Нехай конденсатор віддає 667 кВт і з них реально можна стабільно відібрати 60% (решта – надлишок температур). Тоді корисне тепло $Q_{\text{кор}} = 400$ кВт. Якщо цим теплом заміщати котельне тепло з ККД котла ($\eta = 0,9$) (припущення), то еквівалентна економія палива: $Q_{\text{saved}} = 400/0,9 = 444$ кВт. Далі річна економія залежить від годин роботи та тарифів (залежить від умов).

Сушіння у харчовій промисловості (конвективні сушарки, розпилювальні сушарки тощо) часто належить до найбільш енергоємних операцій, а значна частка підведеного тепла виходить із викидним повітрям разом із водяною парюю, інколи пилом/аерозолями. На прикладі розпилювальної сушарки молока в літературі наведено оцінку «викиду в атмосферу» порядку 5300 МДж/год (1,47 МВт) для конкретного кейсу.

Технічні підходи

1. Повітря-повітря рекуператори (підігрівання припливного повітря) здійснюють відбір тепла з викидного повітря та передають його в припливне (перед калорифером). Для харчових виробництв важливі конструкції, які легко очищати та обслуговувати; виробники теплообмінних рішень для ефективності процесу підкреслюють вимоги до очищення саме для «food-applications».

2. Повітря-вода (утилізація в гарячу воду). Викидне повітря нагріває проміжний водяний контур (через ребристий або пластинчастий теплообмінник), який далі живить ГВП або технологічну воду.

3. Рециркуляція частини повітря (за умови допустимого вмісту вологи). Цей процес підвищує ефективність, але може впливати на якість продукту та санітарію, а також значною мірою «залежить від умов».

4. Тепловий насос або конденсаційна утилізація. Для вологих потоків можливе відведення теплоти конденсації водяної пари з підвищенням температури корисного тепла, особливо коли потрібна t води 60–80 °C і вище. У практичних промислових оглядах для харчових підприємств часто пропонують «комбіновані» конфігурації: рекуператор + тепловий насос + акумуляція.

5. Спеціалізовані рішення виробників для сушарок. Наприклад, у промислових оглядах обладнання для сушіння зазначають потенціал зниження тепловитрат на нагрівання у межах порядку до 15% і більше, при чому конкретні значення залежать від інтеграції та режимів.

3. Теплова інтеграція та пінч-аналіз для мінімізації енергоспоживання

Теплова інтеграція означає об'єднання процесів нагрівання й охолодження так, щоб максимально використати тепло, що вже існує в системі. У харчовій промисловості це реалізується через рекуперативні теплообмінники. Наприклад, при пастеризуванні молока гарячий пастеризований продукт віддає тепло холодному

молоку, при чому до 94–95 % тепловмісту може бути повернуто. Подібні підходи також застосовують у стерилізуванні напоїв, варінні пива, скловарінні та інших процесах.

Пінч-аналіз – це метод, який базується на термодинаміці і дозволяє ідентифікувати та мінімізувати потреби у зовнішньому нагріванні й охолодженні. Розглянемо основні етапи методу:

1. Побудова гарячих і холодних композиційних кривих. Всі потоки, які потребують охолодження (гарячі) чи нагрівання (холодні), аналізують, перевівши їхні температури у криві теплового навантаження. Потім підбирається мінімальна різниця температур ΔT_{\min} , яка визначає максимально можливий тепловий обмін.

2. Визначення «пінч-точки». Пінч – це точка, у якій відстань між гарячою та холодною кривою дорівнює ΔT_{\min} . Вона показує межу між ділянкою, де оптимально використовувати теплообмінники, і ділянкою, де потрібно зовнішнє тепло або охолодження.

3. Синтез мережі теплообмінників. Після визначення пінчу будують мережу теплообмінників між процесними потоками так, щоб максимально передавати тепло через «гарячі» потоки до «холодних», мінімізуючи використання пари та холодоагентів. Згідно з дослідженням компанії Enerquip (2025 р.), пінч-аналіз дозволяє знизити енергетичні витрати на 15–40 %, зменшити вузькі місця процесу на 5–15 % та скоротити капітальні витрати на 5–10 %.

4. Динамічний пінч-аналіз. У харчовій промисловості енергетичне навантаження змінюється залежно від асортименту й режимів роботи. Проект Food Pinch продемонстрував, що автоматичне керування тепловими потоками на основі пінч-аналізу забезпечує економію до 19 % на пілотних системах, а потенціал зниження енергоспоживання може становити 14–54 % при низьких інвестиційних витратах.

Отже, узагальнюючи наведене, визначимо переваги теплової інтеграції

– Зменшення споживання пари та палива, адже підприємства можуть перерозподіляти тепло між процесами, замінюючи частину пари, що виробляється котлами, теплом з інших потоків.

– Зниження витрат на утилізацію відпрацьованого тепла, оскільки зменшується потреба в холодильниках, градирнях та викидах тепла в атмосферу.

– Оптимізація системи, так як за рахунок раннього планування та комплексного підходу (пінч-аналіз) можна уникнути «вузьких місць» та підвищити гнучкість виробництва.

– Екологічний ефект, оскільки зниження споживання палива скорочує викиди CO_2 та інших забруднювачів.

4. Використання відпрацьованого тепла для підігрівання води й вентиляції

Найпоширеніший «теплосховище-споживач» у харчовій промисловості – вода. Це пояснюється простотою акумулювання (баки), високою теплоємністю, широким спектром споживачів (СІР, миття, душі, технологічні ванни) та нижчими санітарними ризиками за умови гідравлічного розділення контурів.

На багатьох підприємствах великі об'єми теплої води потрібні для миття обладнання, санітарних процедур, приготування розсолів та інших процесів. Рекуперативні системи перетворюють відпрацьоване тепло на гарячу воду, зменшуючи потребу в котельній парі.

– Молочні ферми та молокозаводи.

Енергія, що виділяється під час охолодження молока, спрямовується у теплообмінник. За аналітичними даними, використання теплообмінників дозволяє нагрівати воду до 50–60 °С та скорочує витрати на її підігрівання до 50 %. Це покращує роботу холодильних конденсаторів та підвищує загальну енергоефективність.

– Напої та пивоваріння. Тепло з процесів охолодження пива (охолодження суслу, ферментаційні танки) можна використовувати для попереднього нагрівання води для миття пляшок або для варіння. У багатьох пивоварнях застосовують утилізацію пари з варильних котлів; її конденсат використовують як гарячу технологічну воду.

– М'ясопереробні та консервні підприємства. Нагрівання води для стерилізування банок чи миття обладнання може здійснюватися за рахунок тепла від компресорів або теплових насосів. У деяких системах перегрітий пар від копильних камер використовується для підігріву води.

Системи вентиляції з рекуперацією тепла дозволяють зберігати тепло, яке традиційно викидається зі викидами повітря, і покращують мікроклімат виробничих приміщень.

Принцип роботи. В теплообміннику два повітряні потоки проходять окремими каналами, де тепло від теплого витяжного повітря передається свіжому, що надходить, й при цьому потоки не змішуються. Пластинчасті теплообмінники можуть утилізувати до 85 % тепла, а роторні теплообмінники – до 90 %, що зменшує енергоспоживання на опалення та охолодження до 50 %.

Рекупераційні вентиляційні системи використовують, наприклад, у хлібопекарнях, цехах для нарізання та пакування, копильнях та ферментарних приміщеннях. Вони стабілізують температуру та вологість, скорочують витрати на кондиціонування повітря й підтримують гігієну.

Базова формула розрахунку потужності для нагрівання води:

$$Q = m \cdot c_p \cdot (T_{out} - T_{in}), \quad (14.2)$$

де Q – теплова потужність, кВт;

m – масова витрата, кг/с;

$c_p \approx 4,19$ кДж/(кг·К) у розрахунках можна брати середнє значення по діапазону температур);

T_{out}, T_{in} – температура на виході/вході, °С;

$\Delta T = T_{out} - T_{in}$.

Приклад підбору витрати води під доступне відпрацьоване тепло.

Нехай з рекуперації конденсатора холодильного агрегату доступно $Q_{use} = 400$ кВт, $T_{in} = 15^\circ\text{C}$, $T_{out} = 55^\circ\text{C}$.

$$\Delta T = 55 - 15 = 40^\circ\text{C}$$
$$Q = \frac{Q_{use}}{c_p \cdot \Delta T} = \frac{Q_{use}}{c_p \cdot (T_{out} - T_{in})};$$

Після підставлення числових значень, отримаємо (1кВт=1кДж/с)::
 $\dot{m} = 400 / (4,19 \cdot 40) \approx 2,39$ кг/с.

Далі здійснюємо перехід до об'ємної витрати (для води $\rho \approx 1000$ кг/м³):

$$V = \frac{m}{\rho} \approx \frac{2,39}{1000} \approx 0,00239 \text{ м}^3/\text{с}.$$

$$V \approx 0,00239 \cdot 3600 \approx 8,6 \text{ м}^3/\text{год.}$$

Якщо споживання гарячої води нерівномірне, ставлять бак-акумулятор, щоб узгодити потужність рекуперації та пікові витрати.

Енергія, що накопичується в баку:

$$E = m_{\text{бак}} \cdot c_p \cdot (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}), \quad (14.3)$$

або через об'єм:

$$E = \rho \cdot V_{\text{бак}} \cdot c_p \cdot \Delta T. \quad (14.4)$$

Використання баку-акумулятора забезпечує накопичення тепла та покриття пікових навантажень.

У молочній промисловості класичний приклад – регенеративний процес підігрівання або охолодження в теплообмінниках пастеризування, де до 94–95% тепла може бути повернено у процес. Додатково, тепло, зняте з потоків охолодження або пастеризування, часто доцільно спрямовувати на підігрівання мийних вод або проміжних вод, поєднуючи це з системами відновлення/повторного використання промивних середовищ.

Рекуперація у вентиляції та повітрообміні

У багатьох харчових цехах (особливо з вологими/теплыми зонами) вентиляція створює суттєві тепловтрати, які можна повернути системами air-to-air energy recovery. ASHRAE визначає air-to-air енергорекуперацію як відновлення тепла та/або вологи між двома повітряними потоками з різними температурами й вологістю – для зниження енерговитрат при збереженні якості повітря.

Типові рішення системи рекуперація у вентиляції

– Пластинчасті рекуператори. Конструкція з чергуванням пластин формує два розділені канали; перевага – відсутність рухомих частин і пасивна передача енергії через тепловий градієнт; типова схема — перехресний потік.

– Роторні (теплові колеса). Часто мають високу ефективність, але для харчових цехів треба враховувати ризик переносу запахів/аерозолів; виробники вентиляційних рішень прямо зазначають, що роторні теплообмінники не завжди придатні там, де є суворі вимоги гігієни та перенесення запахів.

– Гліколеві контури*. Доречні, коли приплив і витяжка просторово рознесені; у класичних дослідженнях air-to-air систем описано принципи ефективності та схеми саме таких контурів.

* Гліколеві контури — це замкнуті системи циркуляції холодоносія (суміші води та пропиленгліколю/етиленгліколю), призначені для ефективного охолодження в промисловості, кондиціонуванні або вентиляції. Вони дозволяють переносити холод від чилера (охолоджувача) до об'єкта, працюючи при мінусових температурах (до -40°C) без замерзання, запобігаючи пошкодженню обладнання.

5. Економічні та екологічні переваги впровадження рекуперації

Економічні вигоди

Економічний ефект рекуперації це насамперед зменшення OPEX* на паливо / електроенергію та, інколи, зменшення витрат на охолодження (менше відведення тепла в атмосферу). На рівні підприємства коректно рахувати:

- річну корисну утилізацію тепла:

$$E_{\text{rec}} = Q_{\text{use}} \cdot t, \quad (14.5)$$

де E_{rec} – кількість рекуперованої енергії,

Q_{use} – корисна теплова потужність,

t – час роботи.

- еквівалент зекономленого палива (з урахуванням ККД котла/теплогенератора),

- додаткові витрати на електроенергію насосів/вентиляторів/керування,
- CAPEX* на теплообмінники, баки, арматуру, автоматику, монтаж.

Фактична окупність суттєво залежить від параметрів джерела, його (температури та безперервності, від наявності стабільного теплоспоживача і від тарифів.

Отже, до економічних переваг можна віднести:

1. Зменшення енергетичних витрат, так як відбір тепла з викидів може скоротити потребу в первинній енергії на 15–40 %. У випадку холодильних машин рекуперация тепла дозволяє отримувати до 80 л гарячої води на годину й зменшувати витрати на воду та енергію. Для молочних ферм економія на підігріванні води досягає 50 %.

2. Швидкий термін окупності, оскільки інвестиції в низькотемпературні рекуперативні системи, які використовують тепло вже при 40 °С, можуть окупитися протягом 3–5 років, забезпечуючи до 25 % енергетичної економії.

3. Зменшення експлуатаційних витрат, так як підвищення ефективності холодильних систем зменшує знос компресорів та необхідність ремонту.

4. Зростання конкурентоспроможності за рахунок впровадження сучасних технологій рекуперативі тепла, що підвищує енергоефективність продукції та може стати елементом маркетингу («зелений» бренд).

Екологічні переваги

Для оцінки скорочення CO₂ при заміщенні тепла з котельні часто застосовують фактори IPCC. Для природного газу IPCC наводить типовий фактор 56 100 кг CO₂/ТДж (якщо спалити 1 ТДж теплової енергії природного газу, то в атмосферу буде викинуто приблизно 56,1 т CO₂).

Перерахунок (наближено): 1 ГВт·год = 3,6 ТДж, отже уникнені викиди:

$$\Delta\text{CO}_2 \approx 3,6 \cdot 56,1 \approx 202 \text{ т CO}_2 / 1 \text{ ГВт} \cdot \text{год.}$$

Якщо рекупероване тепло заміщує *корисну* теплоту котла, потрібно врахувати ККД котла, оскільки зекономлена енергія палива буде більшою за корисне тепло.

Отже, до екологічних переваг можна віднести:

1. Скорочення викидів парникових газів, так як відновлення тепла зменшує потребу у викопному паливі. Підрахунки показують, що для харчової промисловості рекуперация може скоротити викиди CO₂ на десятки тисяч тонн на рік. Наприклад, у проекті Food Pinch динамічна оптимізація теплових потоків дозволила зменшити споживання енергії на 19 % та забезпечити реалістичне зниження CO₂ на 25 %.

2. Зменшення теплового забруднення та покращення умов праці, оскільки відбір тепла зі смуг викидного повітря зменшує температуру повітря, що виділяється у навколишнє середовище, та знижує теплове навантаження на виробничі приміщення, покращуючи комфорт персоналу.

3. Раціональне використання ресурсів. Адже відновлюючи тепло та пару, підприємства зменшують споживання води та хімічних реагентів у котельнях, що також позитивно впливає на навколишнє середовище.

* Бюджетування CAPEX та OPEX – це фінансове планування витрат компанії, розділене на інвестиції в довгострокові активи (CAPEX) та щоденні операційні витрати (OPEX). CAPEX – це придбання обладнання чи будівель, що приносять прибуток роками, а OPEX – регулярні витрати (оренда, зарплати), потрібні для поточної роботи.

Отже, відпрацьоване тепло на харчових підприємствах являє собою важливий ресурс, який часто недооцінюють. Системи рекуперації та теплової інтеграції, зокрема метод пінч-аналізу, дозволяють ефективно відбирати та використовувати це тепло. Вони забезпечують значні економічні вигоди завдяки скороченню витрат на енергію та воду, швидкій окупності та покращенню продуктивності обладнання. Разом із тим реалізація таких рішень сприяє зменшенню викидів парникових газів, покращенню мікроклімату виробничих приміщень та реалізації принципів циркулярної економіки. Кожне харчове підприємство, незалежно від масштабу, може знайти власні можливості для відновлення відпрацьованого тепла і таким чином зробити свій внесок у енергетичну та екологічну стійкість.

Короткий перелік нормативів і стандартів

1. ISO 50001:2018 (Energy management systems – Requirements with guidance for use) – системний стандарт для енергоменеджменту підприємства.
2. ISO 14064-1 – організаційний рівень обліку та звітності щодо парникових газів.
3. ISO 14040 (LCA – principles and framework) – базовий каркас оцінки впливів життєвого циклу.
4. EN 308:2022 (випробування повітря-повітря теплообмінників та рекуператорів) – стандарт на методи випробувань та оцінки характеристик рекуператорів.
5. ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція та кондиціонування» - базові вимоги до систем ОВК, актуальні при інтеграції вентиляційної рекуперації.
6. EC: BAT Conclusions for Food, Drink and Milk industries (Commission Implementing Decision (EU) 2019/2031) – нормативно-довідковий документ для найкращих доступних технологій і цільових показників у контексті IPPC/IED.
7. BREF (Food, Drink and Milk Industries) – як довідникова база BAT-підходів.
8. IPCC 2006 Guidelines (Stationary Combustion) – джерело дефолтних факторів CO₂ для палива .

Контрольні питання.

1. Які основні джерела відпрацьованого тепла існують на харчових підприємствах?
2. Як здійснюється рекуперація тепла з конденсаторів холодильних машин, сушильних апаратів та інших установок?
3. Поясніть поняття теплової інтеграції та пінч-аналізу. Як ці підходи допомагають мінімізувати енергоспоживання?
4. Які способи використання відпрацьованого тепла існують для підігрівання води, вентиляції та опалення виробничих приміщень?
5. Як комбінації рекуперації і теплових насосів підвищують ефективність використання низькопотенційного тепла?
6. Які економічні вигоди та терміни окупності характерні для проектів рекуперації відпрацьованого тепла?
7. Які екологічні переваги (скорочення викидів CO₂, зменшення споживання палива) забезпечують системи рекуперації?
8. Чому правильна теплоізоляція та оптимізація трас теплоносіїв є важливими для ефективності систем рекуперації?
9. Що таке технологія Heat-to-Power (H2P) і як вони перетворюють теплову енергію на електричну?

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ, НЕОБХІДНОЇ ДЛЯ ОПРАЦЮВАННЯ КУРСУ

Базова

16. Momani, D.A.I., Turk, A.I., Abuashour, Y., Khalid, M. I., Muyeen, H.M., Sweidan, S.M., ... & Hasanuzzaman, M. (2023). Energy saving potential analysis applying factory scale energy audit—A case study of food production. *Heliyon*, 9(3). <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14216>

26. Кириленко, О., Денисюк, С., & Блінов, І. (2024). Енергетичний менеджмент: нові пріоритети ХХІ століття. *Науковий журнал «Енергетика: економіка, технології, екологія»*, (1).

36. Аналітичний звіт «Енергоефективність у “зеленому” відновленні: найкращі практики та можливості для України» DiXi Group & BPIE, (2023). 20 с. Режим доступу: <https://dixigroup.org/analytic/analitychnyj-zvit-energoefektyvnist-u-zelenomu-vidnovlenni-najkrashhi-praktyky-ta-mozhlyvosti-dlya-ukrayiny/>

46. Онищенко, Я. Д., & Замулко, А. І. (2022). Аналіз тенденцій споживання енергетичних ресурсів харчовою промисловістю України. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*, (28, № 3), 88-96.

56. Маляренко, А. О., Бурова, З. А. (2024) Вибір ефективної теплоізоляції для апаратів, обладнання та будівель харчових виробництв. Національний університет біоресурсів і природокористування України. Факультет харчових технологій та управління якістю продукції АПК, 13(2). С.161.

66. Singh, M., Sachchan, T. K., Sabharwal, P. K., & Singh, R. (2023). Smart and sustainable food production technologies. In Sustainable Food Systems (Volume II) SFS: Novel Sustainable Green Technologies, Circular Strategies, Food Safety & Diversity (pp. 3-25). Cham: Springer Nature Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-031-46046-3_1

76. Хорольський, В. П., Хорольський, В. П., Коренець, Ю. М., Коренець, Ю. Н., Омельченко, О. В., Омельченко, А. В. (2022). Шляхи вирішення питання оптимального вибору обладнання для охолодження та заморожування продуктів харчування на основі оцінки його енергоефективності. *Обладнання та технології харчових виробництв*, (1 (44)). С. 66-75.

86. Мельник, В., Цимбал, Б. (2022). Аналіз проблем підвищення енергоефективності аграрного виробництва. *Науковий журнал «Інженерія природокористування»*, (1(23)). С. 99-114. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6823538>

96. Соколовська, І. С., Іншеков, Є. М., Цапко, Г. Є., Шашко, В. О. (2024). Значення енергетичного менеджменту на підприємствах харчової промисловості. Проблеми й перспективи відновлення та розвитку підприємств харчової промисловості в сучасних умовах: колективна монографія / За ред. Проф. Н.С. Скопенко. Київ: ЦП Компрінт. С. 162 – 176.

106. Гелетуша, Г. Г., Кучерук, П. П., Матвеев, Ю. Б. (2022). Перспективи виробництва біометану в Україні. *Аналітична записка UABIO*. 29с.

Допоміжна

1д. Індекс промислового виробництва URL: <https://index.minfin.com.ua/ua/economy/index/industrial/2022/>

2д. Кондрашова М. В., Кондрашов О. М., Мех Л. М. (2024). Інвестиції в енергоефективність: шлях до сталого розвитку. *Економічний простір*. № 196. С. 2934. <https://doi.org/10.30838/EP.196.2934>

3д. Kushnir Svitlana Європейський досвід впровадження еко-інновацій як частина загальної стратегії розвитку підприємства / Svitlana Kushnir, Nataliia Kairachka // Науковий журнал «Економіка і регіон». Полтава: ПНТУ, 2023. Т. 2(89). С. 68-74. [https://doi.org/10.26906/eip.v0i2\(89\).2936](https://doi.org/10.26906/eip.v0i2(89).2936)

4д. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 21 квітня 2023 р. № 373-р Київ Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/373-2023-%D1%80#Text>

5д. Gorjian, S., & Campana, P. E. (Eds.). (2022). Solar energy advancements in agriculture and food production systems. Academic Press.

6д. Дашко, М., & Крилов, В. (2021). Енергоефективність: проблеми оцінки та наявний стан. Herald of Khmelnytskyi National University. *Economic sciences*, 294(3), 108-112.

7д. Пазюк, В. М., Токарчук, О. А., Токарчук, Д. М. (2021). Сучасний стан проблеми енергоефективності в світі та в Україні. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. № 1 (112). С. 88-99.

8д. Azizi-Lalabadi, M., Moghaddam, N. R., & Jafari, S. M. (2023). Pasteurization in the food industry. In *Thermal processing of food products by steam and hot water* (pp. 247-273). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818616-9.00009-2>

9д. Kuznetsova, I. (2024). Low-carbon development as strategic vector for enterprises. *Ekonomichnyu analiz*, 34(3), 54-61.

10д. Лавринюк З.В. Управління та поведження з відходами. Конспект лекцій для здобувачів освіти освітнього рівня бакалавр, спеціальності 101 Екологія, освітньо-професійної програми «Екологія». Луцьк: «Вежа Друк», 2022. 74 с.

11д. Закон України «Про управління відходами» із змінами і доповненнями, внесеними Законом України від 13 грудня 2022 року N 2849-IX.

12д. Ekici, B., Turkcan, O. F. S. F., Turrin, M., Sariyildiz, I. S., & Tasgetiren, M. F. (2022). Optimising High-Rise Buildings for Self-Sufficiency in Energy Consumption and Food Production Using Artificial Intelligence: Case of Europoint Complex in Rotterdam. *Energies*, 15(2), 660. <https://doi.org/10.3390/en15020660> .

13д. Розбицька, Т. В., Толок, Г. А., Лю, С., Тищенко, Л. М., Савченко, О. А. (2023) Інтегрована система управління технологічними процесами для ефективного та безпечного виробництва молочних продуктів з урахуванням ресурсозбереження. *Здоров'я людини і нації*, 1, С. 63-81.

14д. Сатир, Л. М., Кепко, В. М., Стадник, Л. І., & Роль, Н. В. (2023). Екологізація, стандартизація та сертифікація як елементи управління якістю в системі захисту прав споживачів: аналітичний огляд. *Міжнародний науковий журнал Інтернаука. Серія: Економічні науки*, (3), 183-190.

15д. Стадник І., Балабан С., Каспрук В., Деркач А. (2022). Оцінювання економічної доцільності використання технології утилізації тепла на підприємствах харчової промисловості. *Галицький економічний вісник*. Том 77. № 4. С. 7–12. https://doi.org/10.33108/galicianvisnyk_tntu2022.04.007

16д. Faraldo F., Byrne P. A Review of EnergyEfficient Technologies and Decarbonating Solutions for Process Heat in the Food Industry. (2024). *Energies*. vol 17. no 12. Article 3051. <https://doi.org/10.3390/en17123051>

17д. Купчук, І. М., Гонтарук, Я. В., & Присяжнюк, Ю. С. (2023). Перспективи підвищення рівня енергетичної автономії переробних підприємств АПК України за

рахунок виробництва біогазу. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. № 3 (118). С. 59-73. <https://doi.org/10.37128/2520-6168-2022-3-8>.

18д. Замлинський, В. А. (2025). Циркулярна економіка та продовольча безпека в контексті формування стійкої харчової екосистеми підприємств АПК. *Економіка харчової промисловості*, 17(1), 41-47.

19д. Зеленчук, Н. В. (2022). Оцінка сировинного потенціалу АПК для виробництва біогазу. *Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*, (23), 15-19.

20д. Токарчук, Д. М. Потенціал отримання енергетичних ресурсів із біовідходів сільськогосподарських, переробних та інших підприємств. *Наукові перспективи*. 2022. № 11 (29). С. 253-266. DOI: <https://doi.org/10.52058/2708-7530-2022-1129-253-266>.

21д. Гоцій, Б., Тульчинський, Р., & Погребняк, А. (2025). Напрями розвитку переробки харчових відходів в умовах становлення циркулярної економіки. *Herald of Khmelnytskyi National University. Economic Sciences*, 340(2), 454-458. <https://doi.org/10.31891/2307-5740-2025-340-71>

22д. Тараймович, І. В., Демчук, Л. І., & Тихонова, О. М. (2024). Екологічні аспекти виробництва та споживання: вплив на забруднення та вичерпання природних ресурсів. *Екологічні науки*, 1 (52), 145-150. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.1-52.1.22>

23д. Тараймович, І.В., Рожі, І.Г., Герасименко, О.В., Білогур, С.Ю. (2025). Розвиток підприємств харчової та переробної промисловості в Україні. *Наукові перспективи: журнал*. No 2(56), 1146-1155. [https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-2\(56\)-1146-1155](https://doi.org/10.52058/2708-7530-2025-2(56)-1146-1155)

24д. Тараймович, І. В., Логвиненко, Д., & Кривохижа, Є. М. (2025). Енергоефективні технології в харчовій промисловості. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*, 2(4), 187-197. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2025.4.2.21>

Рекомендовані курси

1. Онлайн-курс “Ресурсоефективне та чисте виробництво” розроблений Центром ресурсоефективного та чистого виробництва у рамках проекту Організації Об’єднаних Націй з промислового розвитку за підтримки Швейцарії. <https://www.recpc.org/recp-course-ua/>

2. Курс з ISO 14001:2015 - Системи управління навколишнім середовищем (EMS).

<https://ua.educations.com/institutions/alison-free-online-learning/kurs-z-iso-140012015-sistemi-upravlinnya-navkolishnim-seredovishem-ems>

3. Онлайн-курс «Продуктивність і управління відходами». <https://ua.educations.com/institutions/alison-free-online-learning/kurs-produktivnist-i-upravlinnya-vidhodami-oshadliivi-ta-ekologichni-perspektivi>

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| Тема 1. Вступ до тепло- та енергозбереження і ресурсоефективності | 3 |
| Тема 2. Ресурсоефективне виробництво як інструмент переходу до «зеленої» економіки | 8 |
| Тема 3. Показники енергоефективності та нормування енергоспоживання | 15 |
| Тема 4. Загальні заходи з енергозбереження | 22 |
| Тема 5. Відновлювані джерела енергії у харчовій промисловості | 31 |
| Тема 6. Енергозбереження у тепломасообмінних процесах | 40 |
| Тема 7. Енергозбереження у холодильних системах | 46 |
| Тема 8. Ресурсозбереження у харчовій промисловості | 54 |
| Тема 9. Теоретичні підходи до комплексного використання відходів | 62 |
| Тема 10. Управління вторинними ресурсами у різних галузях харчової промисловості | 72 |
| Тема 11. Біоенергетика та використання побічних продуктів для виробництва енергії | 78 |
| Тема 12. Енергетичний аудит та цифрове вимірювання | 88 |
| Тема 13. Енергоефективне обладнання та теплові насоси | 95 |
| Тема 14. Рекуперація відпрацьованого тепла та теплова інтеграція | 100 |
| Перелік літератури, необхідної для опрацювання курсу | 109 |

Для нотаток

Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво
[Текст]: Конспект лекцій для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти освітньої програми «Харчові технології» галузь знань G Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності G13 Харчові технології денної та заочної форм навчання/ уклад. І.В. Тараймович. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 114 с.

Комп'ютерний набір та верстка:

І.В. Тараймович.

Підписано до друку . Формат 60x84/16. Папір офс.
Гарн. Таймс. Ум. друк. арк. . Обл.-вид. арк. .
Тираж 50 прим. Зам. .

Інформаційно-видавничий відділ
Луцький національний технічний університет
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ІВВ ЛНТУ