



## **ТЕПЛО-, ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ТА РЕСУРСОЕФЕКТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО**

Методичні вказівки до виконання практичних занять  
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

УДК 664 (07)

T15

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

**Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво [Текст]:**

Методичні вказівки до виконання практичних занять для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти освітньої програми «Харчові технології» галузь знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності 613 Харчові технології денної та заочної форм навчання/ уклад. І.В. Тараймович, Ю.В. Федорусь. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 36 с.

**T 15**

Методичне видання складене відповідно до діючої програми курсу «Тепло , енергозбереження та ресурсоефективне виробництво» з метою вивчення та надання методичної допомоги у виконанні практичних робіт. Наведені основи теоретичного матеріалу з курсу і загальні вказівки оформленні робіт.

© І. В. Тараймович, 2026

## ВСТУП

Дисципліна «Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво» призначена сформувати у здобувачів вищої освіти систему знань і практичних умінь щодо аналізу, розрахунку та оптимізування енергоспоживання і ресурсокористування в технологічних процесах харчових виробництв. Мета навчальної компоненти полягає у тому, щоб навчити студентів застосовувати інструменти енерго- та ресурсозбереження, а також обґрунтовувати технологічні й організаційні рішення з позицій економічної доцільності, екологічної відповідальності та підвищення конкурентоспроможності підприємства. Основними завданнями курсу є опанування термінології, виявлення джерел втрат тепла, холоду, електроенергії, води та матеріальних ресурсів, складання енергетичних балансів, виконання енергоаудитів, добір енергоощадних заходів і оцінювання потенціалу відновлюваних джерел енергії.

Ці методичні рекомендації охоплюють сім практичних занять. Кожен розділ містить короткі теоретичні відомості, перелік завдань для виконання на практиці та варіанти для самостійного опрацювання.

Методичні рекомендації є орієнтиром для виконання практичних занять і можуть доповнюватися викладачем залежно від конкретних умов та особливостей навчання. Виконання практичних робіт відповідно до запропонованої структури сприятиме формуванню компетентностей у сфері енергозбереження та ресурсоефективного управління, що, в свою чергу, підвищить конкурентоспроможність майбутніх фахівців харчової промисловості.

Для поглиблення знань рекомендується опрацьовувати додаткову літературу з енергоефективності, ресурсозбереження, біоенергетики та зеленої економіки, а також відстежувати сучасні тенденції у галузі (наприклад, впровадження цифрових енергоменеджмент-систем, smart-factory концепцій, циркулярної економіки).

# Практичне заняття 1.

## ВСТУП ДО ТЕПЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ

**Мета заняття:** Розвинути у студентів розуміння базових понять тепло- та енергозбереження, ресурсоефективності та «зеленої» економіки; навчитися визначати основні джерела втрат енергії та ресурсів у виробничих процесах і розраховувати індикатори ресурсоефективності; обґрунтовувати першочергові заходи підвищення енерго- й ресурсної ефективності в контексті переходу до «зеленої» економіки.

### Теоретичні відомості

*Теплозбереження* охоплює комплекс технічних та організаційних заходів, спрямованих на мінімізацію втрат теплоти в процесах виробництва й транспортування. До них належать теплоізоляція, рекуперація відпрацьованого тепла, оптимізація теплообмінних поверхонь та використання інноваційних матеріалів. *Енергозбереження (енергоощадність)* – діяльність, спрямована на раціональне використання та економне витрачання первинної й перетвореної енергії. Законодавство трактує енергозбереження як комплекс організаційних, технічних і освітніх заходів, що забезпечують зменшення споживання енергетичних ресурсів та зниження негативного впливу на довкілля.

*Енергоефективність* визначається як технічна характеристика обладнання або матеріалів, що показує, яку частку підведеної енергії вони перетворюють у корисний результат. *Енергозбереження*, у свою чергу, стосується дій, спрямованих на скорочення споживання енергії кінцевими користувачами. Наприклад, встановлення енергоощадних ламп підвищує енергоефективність, тоді як вимикання зайвого освітлення є заходом енергозбереження. І енергоефективність, і енергозбереження допомагають зменшувати рахунки за енергію та обсяг викидів парникових газів, сприяючи економічній вигоді та поліпшенню екології

*Ресурсоефективність.* Ефективність використання ресурсів характеризує зв'язок між кількістю ресурсів, витрачених у процесі виробництва, і кількістю товарів і послуг, отриманих у результаті цього використання. Збільшення обсягів продукції за незмінних витрат означає підвищення ефективності, а зменшення – її зниження. У промисловості ресурсоефективність виражають як співвідношення корисного результату (кількість продукції, енергії, доходу) до витрат матеріальних, енергетичних, водних та інших ресурсів. Показниками є питоми витрати (ресурсоемність), енергоємність, водоємність тощо.

*Енергоємність продукції* – це кількість енергії, необхідна для виробництва одиниці продукції. *Питоми витрати ресурсів* визначаються відношенням витраченої кількості ресурсу до обсягу виробу. Вони дають змогу оцінити ефективність технологічних процесів та порівняти різні виробництва. Мета енерго- й ресурсозбереження – мінімізувати енергоємність і питоми витрати без погіршення якості продукції.

*Вторинні енергетичні ресурси (ВЕР).* До ВЕР відносять теплоту відпрацьованих газів, пару, конденсату, відходів виробництва, які при певних умовах

можуть стати джерелом енергії. Використання ВЕР дозволяє скорочувати споживання первинних енергоносіїв і зменшувати викиди парникових газів.

Концепція «зеленої» економіки розглядає економіку як залежний компонент природного середовища, у рамках якого вона існує. Цей напрямок ставить за мету забезпечити сталий розвиток, мінімізувати негативний вплив на довкілля та оптимізувати використання ресурсів, враховуючи екологічні та соціальні чинники. В межах зеленої економіки важливими є принципи циклічності, мінімізації відходів і відновлюваності ресурсів.

### **Види втрат енергії та їх оцінка**

Втрати енергії в будівлях поділяються на конструктивні (трансмісійні) та вентиляційні.

Трансмісійні теплові втрати через огорожувальні конструкції визначають за формулою:

$$Q_{tr}=A \times U \times \Delta T, \quad (1.1)$$

де  $A$  – площа,  $m^2$ ;

$U$  – коефіцієнт теплопередачі;

$\Delta T$  – різниця температур,  $^{\circ}C$ .

*Приклад:* Стіна площею  $50 m^2$  з  $U=0,6 \text{ Вт} \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$  при різниці температур  $20^{\circ}C$  втратить  $50 \times 0,6 \times 20=600$  Вт тепла.

Вентиляційні втрати враховують об'єм приміщення, кратність повітрообміну, густину та теплоємність повітря й розраховують за формулою:

$$Q_{vent}=V \times n \times \rho \times c_p \times \Delta T, \quad (1.2)$$

де  $V$  – об'єм,  $m^3$ ;

$n$  – кратність повітрообміну,  $год^{-1}$ ;

$\rho$  – густина повітря,  $кг/m^3$ ;

$c_p$  – його теплоємність,  $кДж/кг \cdot K$ .

*Приклад:* При об'ємі  $150 m^3$ ,  $n=0,5 \text{ год}^{-1}$ ,  $\rho=1,2 \text{ кг}/m^3$ ,  $c_p=1,0 \text{ кДж}/кг \cdot K$ ,  $\Delta T=20^{\circ}C$ :  $Q_{vent}=500$  Вт.

Сумарні теплові втрати  $Q_{заг}$  включають також втрати через «містки холоду» та визначаються формулою:

$$Q_{заг}=Q_{tr}+Q_{vent}+Q_{міст}, \quad (1.3)$$

На підприємствах харчової промисловості значну частку становлять втрати енергії в технологічних процесах: тепло, що втрачається з димовими газами, відпрацьованими середовищами, неповне згоряння, втрати в електродвигунах та компресорах. Використання тепловізорів, температурних логерів, газових аналізаторів та лічильників допомагає будувати детальну карту втрат і визначати пріоритетні напрямки для покращення.

### **Способи зменшення споживання та удосконалення SEC.**

*Питоме енергоспоживання (SEC)* – це показник, що розраховується як відношення сумарно спожитої енергії до кількості випущеної продукції:

$$SEC = E/P, \quad (1.4)$$

де  $E$  – загальне споживання енергії,  $кВт \cdot год$ ;

$P$  – обсяг продукції, т.

Визначення *водоємності* аналогічно до енергоємності, воду, що спожита за період, ділять на одиницю діяльності (виробництва):

$$V = W/P, \quad (1.5).$$

$W$  – загальна витрата води, м<sup>3</sup>;

$P$  – обсяг продукції, т.

*Матеріалоємність* – це показник, що відображає кількість відходів у розрахунку на тону продукції; його принцип схожий на показник утворення відходів, який розраховують як загальну масу відходів, поділену на період.

$$M = M_w/P, \quad (1.6)$$

де  $M_w$  – маса відходів, кг;

$P$  – обсяг продукції, т.

*Вартість енергії* визначають, помноживши річне споживання на тариф (кВт·год), після чого ділять суму на кількість спожитих кВт·год, щоб отримати ціну 1 кВт·год.

$$E_{\text{cost}} = C/E, \quad (1.7).$$

де  $C$  – загальна вартість спожитої енергії, грн;

$E$  – загальне споживання енергії, кВт·год.

Зменшення SEC досягається шляхом технічних і організаційних заходів: модернізації обладнання (наприклад, встановлення енергоефективних насосів, двигунів з частотними перетворювачами), теплової ізоляції трубопроводів, оптимізуванню режимів роботи, планового обслуговування, зменшення простою, повторного використання тепла. З боку енергозбереження корисними є дії, що не потребують значних інвестицій: вимикання непотрібного освітлення, підтримання оптимальної температури та тиску, оперативне усунення витоків пари чи стисненого повітря.

### **Завдання до виконання**

1. Вивчення термінів. Визначте та поясніть такі ключові терміни: «теплозбереження», «енергозбереження», «ресурсоефективність», «енергоємність», «питомі витрати», «вторинні енергетичні ресурси», «зелена економіка». Для кожного терміна наведіть приклади з харчової промисловості, вказуючи, які процеси або обладнання впливають на відповідний показник.

2. За вихідними даними (таблиці 1) розрахуйте базові індикатори ресурсоефективності: питома витрата енергії (кВт·год/т), водоємність (м<sup>3</sup>/т), матеріалоємність (кг відходів/т продукції), енергетична інтенсивність (гривень/кВт·год). Порівняйте отримані показники зі середньогалузевими значеннями та зробіть висновки про ефективність виробництва.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані для розрахунку ефективності виробництва

№ п/п	Споживання енергії, кВт·год	Споживання води, м <sup>3</sup>	Кількість відходів, кг	Обсяг продукції, т	Вартість енергії, грн
1	15 000	280	160	12	48 000
2	12 500	250	140	10	37 500
3	18 200	320	200	15	64 000
4	10 800	210	120	9	31 320
5	14 300	270	180	11	46 240
6	17 000	350	240	14	57 800
7	9 600	190	110	8	28 800
8	20 400	420	300	16	70 000
9	11 500	230	130	10	34 500
10	13 800	260	170	11	44 160
11	16 200	310	210	13	54 000
12	8 900	180	100	7	26 700
13	19 500	400	280	15	67 600
14	7 800	160	90	6	23 400
15	21 000	430	320	17	73 500

**Примітка.**

Споживання енергії – сумарне електро- і теплове споживання підприємства за період.

Споживання води – обсяг води, використаної у виробництві.

Кількість відходів – маса твердих та інших відходів, що утворилися.

Обсяг продукції – тоннаж виробленої продукції.

Вартість енергії – загальні витрати на енергоресурси за той самий період (умовно взято тариф  $\approx 3,2$  грн/кВт·год).

**Приклад розрахунку.**

Припустимо, за рік підприємство виготовило 1000 т продукції, спожило 1,5 млн кВт·год електроенергії вартістю 6 млн грн, витратило 30 000 м<sup>3</sup> води та утворило 120 000 кг відходів.

Необхідно розрахувати показники:

$$SEC = 1\,500\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год} \div 1000 \text{ т} = 1500 \text{ кВт}\cdot\text{год}/\text{т}.$$

$$B = 30\,000 \text{ м}^3 \div 1000 \text{ т} = 30 \text{ м}^3/\text{т}.$$

$$M = 120\,000 \text{ кг} \div 1000 \text{ т} = 120 \text{ кг}/\text{т}.$$

$$E_{\text{cost}} = 6\,000\,000 \text{ грн} \div 1\,500\,000 \text{ кВт}\cdot\text{год} = 4 \text{ грн}/\text{кВт}\cdot\text{год}.$$

Після розрахунку цих показників їх порівнюють із середніми для галузі (наприклад, довідковими значеннями енергоспоживання й водоспоживання на 1 т продукції). Якщо розраховані величини нижчі за середньогалузеві, виробництво вважається ефективнішим. Якщо навпаки – необхідно виявити причини (старе

обладнання, недостатня ізоляція, втрати води, неправильна організація технологічних процесів) і розробити заходи щодо скорочення втрат.

3. На основі тарифів на електроенергію й тепло (актуальних на даний момент часу) обчисліть вартість енергії, що споживається підприємством за зміну, та частку енергетичних витрат у собівартості 1 т продукції. Проаналізуйте, які фактори впливають на цю частку і як її можна знизити.

4. Запропонуйте комплекс заходів для підвищення енерго- та ресурсної ефективності. Оцініть, які заходи слід реалізовувати першочергово (наприклад, ізоляція трубопроводів, модернізація обладнання, використання варіаторів частоти, рекуперація теплоти, оптимізація виробничих режимів).

5. Ознайомтеся із законодавчими актами України щодо енергоефективності та ресурсозбереження. Підготуйте короткий огляд вимог до харчових підприємств, пов'язаних із енергетичним аудитом, декларуванням викидів парникових газів та стимулюванням використання відновлюваних джерел енергії. Розгляньте можливості фінансування заходів з енергоефективності (гранти, кредити).

### **Контрольні питання.**

1. Поясніть поняття енергозбереження, ресурсоефективності, питоме енергоспоживання (SEC) та коефіцієнт корисної дії (ККД). У чому їхня практична цінність?

2. Запишіть формулу розрахунку теплових втрат через огороджувальні конструкції та поясніть значення кожного параметра.

3. Як розрахувати вентиляційні втрати тепла? Назвіть потрібні вхідні дані й наведіть приклад.

4. Які основні джерела теплових втрат у виробничих приміщеннях? Запропонуйте 3–4 способи їх зменшення.

5. Поясніть, як побудувати карту теплових втрат приміщення та які висновки можна з неї зробити.

6. Розрахуйте SEC для підприємства, яке споживає 20 000 кВт·год електроенергії та виробляє 50 000 кг продукції. Оцініть ефективність цього показника.

7. Визначте річні витрати на електроенергію при споживанні 5 000 кВт·год і тарифі 3,50 грн за кВт·год. Які фактори впливають на ціну електроенергії для споживача?

## Практичне заняття 2.

### РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ

**Мета заняття:** навчитися визначати та аналізувати показники енергоефективності технологічного обладнання харчових виробництв, розраховувати питому витрату енергії, складати енергетичні баланси та оцінювати вплив енерговитрат на собівартість продукції.

#### Теоретичні відомості

У харчовій промисловості енергоресурси витрачаються на привод електродвигунів (насоси, міксери, подрібнювачі), нагрівання та охолодження сировини, сушіння, дистиляцію, механічні транспортувальні операції. Знання енергетичних характеристик обладнання дозволяє оцінити його ефективність і вибрати оптимальні режими роботи.

*Питома витрата енергії на одиницю продукції* визначається як відношення спожитої енергії до маси або кількості виробленої продукції (кВт·год/кг або кВт·год/т). Для систем із багатокомпонентним споживанням (електроенергія, теплова енергія, пара) слід перераховувати енергію в єдині одиниці (наприклад, кВт·год), враховуючи коефіцієнт переводу.

*Енергетичний баланс обладнання* – це розрахунок сумарного входу та виходу енергії, що дозволяє виявити втрати. Для теплового обладнання баланс складається за джерелом тепла, тепловим навантаженням, втратами (конвекційними, радіаційними, теплопередачею) та корисним використанням.

*Коефіцієнт корисної дії (ККД)* визначається як відношення корисного виходу до сумарних витрат енергії:

$$\eta = P_{\text{вих}}/P_{\text{вх}} \times 100 \%, \quad (2.1)$$

Ця формула, наведена у джерелах з фізики, дає значення у відсотках. Якщо корисна потужність дорівнює 8,5 кВт, а вхідна – 10 кВт, ККД = 85 %.

Харчова промисловість споживає близько 6 % загального промислового енергоспоживання, причому дві третини цієї енергії припадає на процеси нагрівання. Основними напрямками використання енергії є виробництво пари для стерилізації та пастеризації, обігрівання сушарок, приготування продуктів, підігрів води для миття та санітарії. Ефективне використання пари та впровадження технологій рекуперації тепла дає можливість значно скоротити витрати.

Підвищення енергоефективності технологічного обладнання полягає не лише у модернізації окремих вузлів, але й у комплексній заміні систем керування. Встановлення частотних перетворювачів на електродвигуни насосів, вентиляторів і компресорів дає змогу автоматично змінювати швидкість обертання в залежності від потреби і уникати зайвих втрат. Використання більш ефективних теплообмінників, зменшення теплових втрат у трубопроводах, ізоляція резервуарів для збереження температури – прості заходи, які дають значний ефект. Для котлів та парогенераторів застосовують економайзери, що повертають тепло димових газів для підігріву живильної води.

Питоме енергоспоживання (SEC) для конкретного виду продукції є ключовим індикатором, що дозволяє порівнювати ефективність різних цехів чи підприємств. SEC визначають як відношення сумарного енергоспоживання до кількості

виготовленої продукції. Наприклад, якщо лінія виробляє 10 000 кг продукту, використовуючи 5 000 кВт·год енергії, SEC становитиме 0,5 кВт·год/кг. Для полегшення аналізу створюють діаграми Санкі, що графічно відображають енергетичні потоки, а також застосовують теплові карти, які показують зони максимальних втрат.

Для досягнення високих показників енергоефективності підприємства впроваджують стандарти енергоуправління (ISO 50001). Він допомагає структурувати роботу з енергією: проводити енергетичні аудитори, встановлювати цілі, контролювати КРІ і постійно поліпшувати процеси. Важливо залучати персонал та проводити навчання, оскільки відповідальність за енергоефективність не може покладатися на одну службу – це повинен бути корпоративний стиль мислення.

Серед сучасних технологій, що застосовуються у харчовій галузі, особливу увагу приділяють електрифікованим методам нагрівання (електронагрівання, мікрохвильове оброблення), утилізації відпрацьованого тепла, когенерації (спільне виробництво електро- і теплової енергії), використанню сонячних колекторів для підігрівання води.

### **Завдання до виконання**

1. Розрахунок питомої витрати енергії на одиницю продукції для обраного технологічного обладнання (наприклад, пастеризатора, сушильної установки, котла, холодильного компресора). Визначте сумарне споживання електроенергії та тепла за годину роботи, віднесіть до обсягу випущеної продукції. Порівняйте отриману величину з нормативними значеннями або паспортними даними.

Питома витрата енергії показує, скільки кВт·год енергії використовується на одиницю продукції. Вона визначається як відношення спожитої енергії до обсягу виробництва:

$$SEC = E_{змін} / Q, \quad (2.2)$$

де Q – кількість продукції (т чи шт). Формула використовується для оцінки, скільки кВт·год енергії витрачається на одиницю продукції

Наприклад, якщо енергоспоживання за зміну 80 кВт·год, а випуск продукції 15 т, то  $SEC = 80/15 \approx 5,33$  кВт·год/т. Цей показник дозволяє порівнювати ефективність різних ліній.

Розрахуйте абсолютні втрати потужності:

$$P_{втрат} = P_{вх} - P_{вих}, \quad (2.3)$$

та їхню частку від підведеної енергії:

$$\eta_{втрат} = 1 - \eta, \quad (2.4)$$

Великі втрати свідчать про низьку ефективність і можливість модернізації.

Енергетичні втрати за зміну обчислюють множенням споживання на тариф:

$$E_{вит.зм.} = E_{змін} \times C, \quad (2.5)$$

Щоб отримати вартість енергії на одиницю продукції, поділіть цю суму на обсяг продукції.

Ці формули базуються на принципі, що вартість енергії дорівнює споживанню, помноженому на тариф.

2. Визначення ККД обладнання. З використанням даних з попереднього завдання обчисліть коефіцієнт корисної дії. Проаналізуйте, які види втрат найбільші і які заходи дозволять зменшити ці втрати (наприклад, утеплення ізоляції, налаштування горілки, регулювання теплового навантаження).

3. Аналіз впливу енерговитрат на собівартість продукції. Розрахуйте частку енергетичних витрат у собівартості, використовуючи актуальні тарифи. Порівняйте варіанти модернізації обладнання: наприклад, установка регулятора частоти на електродвигун зменшує електроспоживання на 10–15 %, що в результаті знижує собівартість; заміна газового пальника з підвищеним ККД дає змогу економити природний газ.

Таблиця 2.1 – Вихідні дані для розрахунку

№ п/п	Вхідна потужність, $P_{вх}$ , кВт	Корисна потужність, $P_{вих}$ , кВт	Тривалість роботи, t, год	Споживання енергії за зміну, кВт·год	Випуск продукції, Q, т
1	10,0	8,5	8	80	15
2	8,0	6,5	7	56	12
3	12,0	10,0	9	108	18
4	9,0	7,2	8	72	14
5	7,0	5,7	6	42	11
6	11,0	8,8	8	88	16
7	13,0	10,4	10	130	20
8	6,0	4,8	6	36	9
9	10,5	8,2	8	84	14
10	9,5	7,4	7	66,5	13
11	14,0	11,0	9	126	21
12	5,5	4,4	6	33	8
13	16,0	13,0	9	144	24
14	7,5	6,0	7	52,5	10
15	12,5	9,8	8	100	17

5. Порівняйте отримані значення ККД і SEC із середньогалузевими нормами або довідковими даними. Високий ККД (наприклад, понад 90 %) і низький SEC свідчать про ефективну роботу.

6. Оформлення результатів. За підсумками розрахунків оформіть таблицю з усіма показниками (ККД, SEC, втрати, вартість енергії) та зробіть висновки. Рекомендується графічно подати залежність витрат від ККД, щоб візуально виявити найбільш «проблемні» об'єкти.

### Контрольні питання.

1. Поясніть принцип енергетичного балансу для технологічного обладнання. З яких компонентів складається підведена та відведена енергія?

2. Запишіть формулу ККД обладнання. Як зміниться ККД, якщо корисна потужність збільшиться за незмінної підведеної?

3. Обладнання споживає 8 кВт і віддає 6,6 кВт корисної потужності. Розрахуйте ККД та втрати енергії.

4. Що таке питома енерговитрата на одиницю продукції і як її визначити для конв'єрсної лінії?

5. Які основні типи втрат (механічні, електричні, теплові) впливають на енергетичний баланс обладнання? Наведіть приклади та шляхи їх зменшення.

### Практичне заняття 3. РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**Мета заняття:** оволодіти методами оцінки доцільності впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) на харчових підприємствах: розраховувати потенціал сонячної енергії, визначати можливість використання біогазу з відходів, оцінювати строк окупності проєктів і порівнювати альтернативні види енергопостачання.

#### Теоретичні відомості

*Класифікація відновлюваних джерел енергії.* До ВДЕ належать сонячна, вітрова, гідро-, геотермальна енергія та біоенергетичні джерела. Для харчових підприємств найбільш перспективні сонячні (теплові колектори та фотоперетворювачі), біогазові установки, твердопаливні котельні на біомасі та комбіновані системи, що поєднують різні види енергії.

Фотогальванічні (PV) елементи виробляють електроенергію безпосередньо з сонячного світла: фотони, поглинаючись у напівпровідниковому матеріалі, вибивають електрони, створюючи напругу. Окремі елементи компонується в панелі, а панелі – в масиви, формуючи систему, яка може забезпечувати електроенергією приміщення або підприємство. Сонячні модулі генерують постійний струм (DC), який перетворюється в змінний (AC) за допомогою інверторів. Сучасні модулі мають комерційну ефективність близько 25 %, що значно вище, ніж перші зразки (менше 10 %). Ключовими факторами для розрахунку потужності є площа панелей, їхня ефективність та рівень сонячної радіації:

$$P_V = A \times \eta \times G, \quad (3.1)$$

A – площа панелей, м<sup>2</sup>,

G – сонячна радіація, Вт/м<sup>2</sup>,

η – ефективність.

*Приклад розрахунку:* масив площею 50 м<sup>2</sup> з ефективністю 18 % у регіоні зі середньою радіацією 1 000 Вт/м<sup>2</sup> дає  $50 \times 0,18 \times 1\,000 = 9\,000$  Вт (9 кВт). Якщо сонячний день триває 4 години, отриманий добовий виробіток становить 36 кВт·год.

Потенціал сонячного нагрівання оцінюють за допомогою інсоляційних карт регіону та характеристик колекторів. Для попереднього розрахунку необхідно знати річну сумарну сонячну радіацію (кВт·год/м<sup>2</sup>), площу панелі й коефіцієнт корисної дії. Теплова потужність сонячного колектора визначається за формулою:

$$Q_{\text{сон}} = A \cdot G \cdot \eta_{\text{кол}} \cdot (1 - \eta_{\text{тепл. втрати}}), \quad (3.1)$$

де A – площа поглиначка,

G – інтенсивність сонячної радіації,

η<sub>кол</sub> – ККД колектора.

*Біогазові установки.* Біогаз утворюється під час анаеробного розкладання органічної сировини (відходів тваринництва, рослинної маси, стічних вод). Для визначення потенціалу біогазу необхідно знати масу сировини, її вологість, вміст сухої органічної речовини та газоутворювальний потенціал. Енергетичний вихід біогазу у середньому становить 18–24 МДж/м<sup>3</sup>. При проєктуванні біогазових установок враховують санітарні вимоги, логістичні відстані та сезонність надходження сировини.

Економічну доцільність впровадження ВДЕ визначають через *строк окупності* ( $T_{ок}$ ) та *чисту приведену вартість* (NPV). Строк окупності розраховують як відношення капітальних витрат до річної економії енерговитрат:  $T_{ок} = K_{инв} / \Delta C_{ен}$ . Критерієм прийнятності є  $T_{ок}$ , що не перевищує нормативний строк (5–7 років для промислових об'єктів).

Для вибору оптимальної системи енергопостачання розглядають техніко-економічні й екологічні показники: вартість виробництва енергії, експлуатаційні витрати, викиди CO<sub>2</sub>, залежність від цін на паливо. Альтернативні системи часто вимагають більших інвестицій, але забезпечують менші експлуатаційні витрати і сприяють зниженню викидів.

### Завдання до виконання

1. Розрахувати потенціал сонячної енергії для підігрівання води. Виберіть тип сонячного колектора (плоский чи вакуумний), визначте доступну площу на даху або території підприємства та скористайтеся статистикою сонячної радіації вашого регіону. Розрахуйте можливий тепловий вихід та зекономлений обсяг природного газу чи електроенергії.

2. Оцінити можливість використання біогазу з відходів. Визначте обсяги біологічних відходів (м'якоть, жом, лушпайки, стічні води), що утворюються на підприємстві. З використанням стандартних коефіцієнтів газотворення розрахуйте обсяг біогазу та його теплотворну здатність. Зробіть висновок щодо доцільності будівництва біогазової установки.

3. Оцінити строк окупності проекту ВДЕ. Для одного з розглянутих варіантів (сонячна система чи біогазова установка) розрахуйте інвестиційні витрати, прогнозну економію енерговитрат та строк окупності. Використайте діапазон майбутніх тарифів, а також врахуйте можливі державні стимули та гранти.

Таблиця 1 – Вихідні дані для розрахунків

№ п/п	Площа сонячних панелей А, м <sup>2</sup>	ККД панелей, η	Сонячна радіація G, Вт/м <sup>2</sup>	Середня тривалість сонця Н, год/добу	Об'єм біогазу V, м <sup>3</sup> /добу	ККД генератора біогазу, η <sub>р</sub>	Інвестиції, грн	Тариф на ел.енергію, грн/кВт·год
1	20	0,18	900	4,5	40	0,25	50 000	3,50
2	16	0,17	900	4,0	35	0,28	45 000	3,80
3	24	0,19	950	5,0	50	0,30	60 000	3,50
4	14	0,15	850	4,5	30	0,25	40 000	3,30
5	22	0,18	900	5,0	55	0,30	65 000	3,20
6	18	0,17	900	4,0	45	0,25	50 000	3,50
7	26	0,20	950	4,5	60	0,28	70 000	3,80
8	12	0,16	850	4,0	25	0,25	45 000	3,20
9	28	0,18	900	5,0	65	0,30	70 000	4,00
10	16	0,16	900	4,5	40	0,25	50 000	3,50
11	20	0,19	900	4,0	50	0,25	55 000	3,30
12	14	0,18	850	4,5	35	0,28	50 000	3,80
13	22	0,15	900	5,0	45	0,30	60 000	3,20
14	24	0,20	950	4,0	55	0,25	65 000	3,50
15	18	0,16	900	5,0	50	0,28	55 000	4,00

### Алгоритм виконання розрахунку

1. Розрахувати потужність  $P_V$  за формулою (3.1). Щоб отримати значення у кВт, поділіть результат на 1000.

2. Знайти денний та річний виробіток від  $P_V$ .

Денний виробіток електроенергії від  $P_V$ :

$$E_{\text{ден}} = P_V \times H, \quad (3.2)$$

де  $H$  – кількість годин сонця на добу.

Річний виробіток електроенергії від  $P_V$ :

$$E_{P_V \text{річ}} = E_{\text{ден}} \times 365. \quad (3.3)$$

3. Визначити енергію від біогазу, для цього необхідно помножити об'єм газу на нижчу теплоту згоряння (для біогазу із 60 % метану нижча теплота згоряння становить 21,5 МДж/м<sup>3</sup>).

$$E_{\text{біогаз}} = (V \times \text{LHV}) / 3,6 \times \eta_p, \quad (3.4)$$

де  $V$  – добовий обсяг біогазу (м<sup>3</sup>/добу),

LHV – нижча теплота згоряння (МДж/м<sup>3</sup>),

$\eta_p$  – ККД біогазового генератора; 1 МДж  $\approx$  0,2778 кВт·год (відповідно, 3,6 МДж = 1 кВт·год).

4. Обчислити річний виробіток біогазу:

$$E_{\text{біогаз,річ}} = E_{\text{біогаз}} \times 365. \quad (3.5)$$

5. Сумарний річний виробіток

$$E_{\Sigma \text{річ}} = E_{P_V \text{річ}} + E_{\text{біогаз,річ}}. \quad (3.6)$$

6. Знайти річну економію:

$$C_{\text{річ}} = E_{\Sigma \text{річ}} \times K, \quad (3.7)$$

де  $K$  – тариф, грн.

7. Визначити період окупності  $T_{\text{ок}}$ , для цього поділити інвестиції на річну економію  $C_{\text{річ}}$ .

8. Проаналізувати результати й порівняти отримані значення між здобувачами, оцінити, який об'єкт найефективніший та як швидко окупляться інвестиції.

9. Скорочення викидів CO<sub>2</sub>\*. Знаючи, що виробництво 1 кВт·год електроенергії з викопного палива супроводжується емісією близько 0,4 кг CO<sub>2</sub>, можна оцінити скорочення викидів при заміні традиційної енергії біогазом. *Наприклад*, 298,6 кВт·год/добу  $\times$  0,4 кг/кВт = 119,4 кг CO<sub>2</sub> на добу.

### Контрольні питання.

1. Запишіть формулу для розрахунку потужності сонячної установки. Як впливають площа панелі, її ККД та рівень сонячної радіації на кінцевий результат?

2. Сонячний масив площею 15 м<sup>2</sup> має ефективність 17 % і встановлений у місцевості зі середньою радіацією 900 Вт/м<sup>2</sup>. Розрахуйте його потужність та прогнозний денний виробіток при 5 годинах сонячного дня.

3. Яка формула визначає період окупності інвестицій у ВДЕ?

4. За допомогою якої формули обчислюють енергетичний вміст біогазу?

5. Які фактори впливають на ефективність вітрових електростанцій? Назвіть принаймні три.

6. Поясніть, як оцінити скорочення викидів CO<sub>2</sub> при заміні традиційної електроенергії біоенергетичною.

7. Порівняйте переваги й недоліки сонячних та біогазових установок з точки зору інвестиційних витрат, стабільності виробітку та екологічного ефекту.

## Практичне заняття 4. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ

**Мета заняття:** навчитися визначати вторинні матеріальні ресурси та відходи в харчових технологіях, перетворювати їх на економічно вигідні ресурси (вторинна сировина, корми, добрива, інгредієнти, енергія), а також розробляти схему ресурсоефективного виробництва з оцінкою екологічних переваг та ризиків.

### Теоретичні відомості

Вторинні ресурси у харчовій промисловості поділяють на *матеріальні* (органічні відходи, побічні продукти, пакувальні матеріали), *енергетичні* (теплота відпрацьованих газів, пари), *водні* (стічні води, конденсат), *інформаційні* (дані, знання). Побічні продукти можуть слугувати кормами, сировиною для біогазу, компостом або вторинною сировиною для отримання харчових інгредієнтів.

Концепція «zero waste» у харчовій галузі передбачає замкнуті цикли, де кожен відхід одного процесу стає ресурсом для іншого. Наприклад, пресовий жом цукрового заводу може бути кормом для тварин, барда спиртового виробництва використовується для отримання кормових білково-вітамінних концентратів, а відпрацьоване тепло—для нагрівання води. Розробляючи схему, необхідно враховувати санітарні вимоги, технологічну сумісність та економічну ефективність.

*Відпрацьоване тепло* – це теплова енергія, яка відводиться у навколишнє середовище без використання. Відповідно до визначення, утилізація відпрацьованого тепла полягає у повторному використанні теплової енергії, що інакше була б втрачена. Існують різні пристрої для відбору й використання цього тепла:

*Стекові економайзери* – теплообмінники, що встановлюють у димовому каналі котла і використовують тепло димових газів для підігріву живильної води. Це підвищує ККД котла на 5–10 % та зменшує витрати палива.

*Утилізаційні котли* – встановлюють за технологічним обладнанням (наприклад, печами), щоб використовувати тепло відхідних газів для утворення пари або гарячої води.

*Теплоутилізаційні парогенератори (HRSG)* в комбінованих енергетичних установках та когенераційних системах, що перетворюють тепло від газових турбін у пару.

*Абсорбційні холодильні машини*, які використовують відпрацьоване тепло для холодопостачання (наприклад, лігій-бромідні холодильники).

Органічні відходи (лушпиння, макуха, сироваткові залишки) можуть бути сировиною для біогазу, кормів, компосту. Тверді відходи, що містять пластик чи метал, за умови сортування направляють на переробку. Водні стоки після очищення можна повторно використовувати у технічних потребах (миття обладнання, полив). Врахування теплотворної здатності відходів дозволяє оцінити їхній енергетичний потенціал:  $E=m \times LHVE$ .

*Формування схем комплексного використання включає:*

1. Ідентифікацію усіх потоків відходів (матеріальних і енергетичних).
2. Оцінювання їхніх обсягів, складу, енергетичного потенціалу.
3. Визначення можливих шляхів утилізації (спалювання, зброджування, перероблення, рекуперация тепла).

4. Аналіз економічної доцільності (потенційна економія, витрати на обладнання, період окупності).

5. Проектування матеріальних і енергетичних потоків з урахуванням законодавчих норм і технічних вимог.

Приклад: на підприємстві з перероблення насіння соняшнику лущиння може спалюватися в котлі для виробництва пару, димові гази котла проходять через економайзер та підігрівають воду. Олійний жмих може використовуватися для виробництва комбікормів. Зворотну воду після мийки посудини можна використовувати у системі охолодження після відповідного очищення.

Отже, комплексне використання вторинних ресурсів сприяє зменшенню обсягу відходів, скороченню витрат на утилізацію та закупівлю сировини, зменшенню емісій парникових газів. Наприклад, використання абсорбційного холодильника для перероблення відпрацьованого тепла дозволяє зменшити споживання електроенергії компресорними холодильниками. Підприємства також отримують позитивний імідж «зеленої» компанії, що важливо для споживачів та інвесторів.

Економічна ефективність використання вторинних ресурсів оцінюється за допомогою показників: додаткова виручка від реалізації побічних продуктів, економія на утилізації, капітальні та експлуатаційні витрати на перероблення, строк окупності. Оцінка екологічного ефекту включає зменшення навантаження на довкілля, зниження обсягів захоронення, зменшення викидів парникових газів та забруднюючих речовин.

*Правові та нормативні аспекти.* Законодавство України передбачає вимоги щодо поводження з відходами, допуску вторинних продуктів у харчові ланцюги, а також стимулювання ресурсозбереження. Під час планування необхідно враховувати вимоги санітарних норм, екологічних ліцензій та квоти на викиди.

### **Завдання до виконання**

1. Ідентифікація вторинних ресурсів конкретного харчового виробництва (наприклад, молочного, пивоварного, цукрового, олійного тощо). Складіть перелік побічних продуктів і відходів: органічні залишки, вторинні теплові потоки, стічні води, упакування. Оцініть їх кількість та сезонність.

2. Розроблення схеми повторного використання. Побудуйте блок-схему, що показує потоки основних та вторинних ресурсів. Для кожного відходу визначте напрям використання: вторинна сировина для іншого виробництва, корм, добриво, біогаз, енергоресурс. Обґрунтуйте технологічну та санітарну допустимість кожного варіанта.

3. Економічна ефективність перероблення відходів. Розрахуйте економічний ефект від повторного використання або продажу побічних продуктів: визначте додатковий дохід, економію на утилізації, капітальні витрати на переробне обладнання, строк окупності. При необхідності оцініть екологічні платежі за викиди, захоронення тощо.

4. Оцінювання зменшення навантаження на довкілля. На основі розрахунків визначте, наскільки зменшується кількість відходів, що направляються на захоронення чи спалювання, і які екологічні переваги це дає (зниження викидів метану, запобігання евтрофікації водойм, покращення ґрунтових показників).

Таблиця 4.1 – Вихідні дані

№ п/п	Масова кількість органічних відходів, т/рік	Нижча теплота згоряння (LHV), МДж/кг	Кількість пакувальних відходів, т/рік	ККД перетворення, η	Інвестиційні витрати, тис. грн	Ціна пакування, грн/кг	Тариф на ел.енергію, грн/кВт·год
1	200	16,2	3,1	0,30	50	15	3,50
2	180	15,8	2,8	0,28	48	14	3,70
3	220	17,1	3,5	0,32	60	15	3,50
4	190	16,0	2,5	0,29	52	14	3,40
5	240	17,5	4,0	0,35	65	15	3,60
6	210	16,8	3,2	0,31	55	15	3,50
7	250	17,7	4,1	0,36	68	16	3,70
8	175	15,6	2,6	0,27	47	14	3,40
9	260	18,0	4,5	0,38	70	16	3,80
10	195	16,3	2,9	0,30	53	14	3,50
11	230	17,2	3,8	0,34	62	15	3,60
12	185	15,9	2,7	0,28	50	14	3,40
13	245	17,3	4,0	0,35	65	15	3,60
14	205	16,5	3,1	0,32	54	15	3,50
15	270	18,2	4,8	0,39	72	16	3,80

**Пояснення:** маса відходів указана в тоннах на рік, LHV (нижча теплота згоряння) – теплоутворювальна здатність біомаси; упаковочні відходи можна продати; η – очікувана частка тепла/електроенергії, що буде отримана з відходів; інвестиції – витрати на обладнання для утилізації; ціна упаковки та тариф потрібні для оцінки економічних вигод.

### Алгоритм розрахунку

1. Визначення потоків вторинних ресурсів. Перелічіть усі відходи, що утворюються на підприємстві: органічні (жом, лушпа, макуха, обрізки), відпрацьоване тепло від технологічних процесів, пакування, відходи води.

2. Розрахунок енергетичного потенціалу органічних відходів

Переведіть масу відходів у кілограми:

$$m = \text{масу у т} \times 1,000. \quad (4.1)$$

Знайдіть теплотворювальну здатність (LHV) для конкретного виду відходів.

Обчисліть сумарний енергетичний потенціал (кВт·год/рік):

$$E_{\text{пот}} = (m \times \text{LHV}) / 3,6, \quad (4.2)$$

що є аналогом загального тепла  $Q = mc\Delta T$  для нагрівання речовини, але з використанням теплоти згоряння.

Врахуйте ККД перетворення (наприклад, для біогазової установки чи котла) η та отримайте корисну енергію:

$$E_{\text{кор}} = E_{\text{пот}} \times \eta. \quad (4.3)$$

3. Розрахунок економічного ефекту від пакувальних відходів

Переведіть масу пакування  $m_{\text{пак}}$  в кілограми.

Знайдіть ринкову ціну вторсировини (грн/кг).

Обчисліть дохід від реалізації:

$$R = m_{\text{пак}} \times \text{Ц}, \quad (4.4)$$

де Ц – ціна, грн.

4. Розрахунок енергетичної економії

Помножте кількість корисної енергії на тариф:

$$EE = E_{\text{корис}} \times T. \quad (4.5)$$

Складові втрат, такі як тепло, що виноситься потоками повітря або води, можна оцінювати за допомогою законів теплопередачі:

для конвекції  $Q_{\text{conv}} = hc \times A \times \Delta T$ , а для потоків газу/рідини  $Q = S \times V \times \rho \times c_p \times \Delta T$ , що допоможе знайти, скільки тепла ще можна утилізувати.

5. Розрахунок загального ефекту і періоду окупності.

Складіть сумарну річну економію:

$$E_{\text{заг}} = R + EE. \quad (4.6)$$

Визначте період окупності інвестицій:

$$T_{\text{ок}} = \text{Invest} / E_{\text{заг}}. \quad (4.8)$$

6. Проаналізуйте отримані результати. Найменший період окупності та найбільша економія свідчать про найперспективніше використання вторинних ресурсів.

### Контрольні питання.

1. Що таке «вторинні ресурси»? Наведіть приклади відходів і побічних продуктів, які можна повторно використовувати на харчовому підприємстві.

2. Запишіть формулу для розрахунку енергетичного потенціалу відходів.

3. Як оцінити економічну доцільність утилізації побічних продуктів? Які дані для цього потрібні?

4. Опишіть принцип роботи утилізатора відпрацьованого тепла. Для яких процесів він найефективніший?

5. Складіть можливу схему комплексного використання вторинних ресурсів для маслосирзаводу. Які види відходів можна повернути у виробництво чи реалізувати?

6. Чому повторне використання відходів важливе з точки зору екології та економіки? Наведіть конкретні приклади.

7. Які труднощі можуть виникнути при впровадженні системи повторного використання вторинних ресурсів? Запропонуйте шляхи їх подолання.

## Практичне заняття 5.

### ОЦІНЮВАННЯ БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ

**Мета заняття:** сформуванати практичні навички оцінювання біоенергетичного потенціалу побічних продуктів і відходів харчових виробництв; навчитися підбирати раціональний напрям енергетичного використання (біогаз, біоетанол, біодизель, тверде біопаливо) та виконувати спрощені розрахунки енергетичного виходу та економічної доцільності.

#### Теоретичні відомості

До *біоенергетичних продуктів* належать газоподібні (біогаз, біоводень), рідкі (біоетанол, біобутанол, біодизель) та тверді (брикетовані чи пелетовані відходи, деревні залишки) палива.

*Біоенергетичний потенціал* – це кількість енергії, що може бути отримана з біомаси через спалювання, анаеробне зброджування, піроліз чи інші технології.

*Біомаса* охоплює широкий спектр сировини: сільськогосподарські залишки (солома, лушпиння соняшнику, кукурудзи), побічні продукти харчової промисловості (жом, барда, відходи молочної сироватки), тваринні відходи (гній, послід), біошлами. Теплотворна здатність залежить від складу: для сухої соломи вона становить 14–18 МДж/кг, лушпиння соняшнику – близько 18 МДж/кг, деревини – 16–20 МДж/кг.

Основними відходами харчової промисловості, придатними для біоенергетики, є відходи цукрового виробництва (жом, меляса), зернопереробки (барда, висівки), фруктово-овочеві вичавки, м'ясопереробні відходи та жири, молочна сироватка.

Основні напрями перероблення біомаси:

1. Спалювання – пряме згорання у котлах для виробництва теплової енергії. До переваг цього виду перероблення можна віднести простоту, високу надійність; а до недоліків – викиди твердих частинок і газів, потреба у додатковій системі очищення.

2. Анаеробне зброджування – мікроорганізми розкладають органічні речовини у безкисневих умовах, утворюючи біогаз. Вихід біогазу залежить від виду сировини, так як курячий послід дає приблизно 70 м<sup>3</sup> біогазу з 1 т, свинячий – 30–40 м<sup>3</sup>. Отриманий біогаз можна використовувати як паливо для когенерації або очищати до біометану.

3. Ферментація та спиртове бродіння – використовується отримання біоетанолу з крохмалистої або цукристої сировини (кукурудза, пшениця, цукрова тростина).

4. Піроліз та газифікація – термічне перероблення біомаси для отримання рідких і газоподібних палив. Піроліз при 400–500 °С виробляє біовугілля та біоолію, газифікація при 800–900 °С – синтез-газ.

Отже, при виборі напрямку використання відходів потрібно враховувати:

1. Доступність сировини. Кількість відходів (кг/добу), їх сезонність, логістика доставки.

2. Склад та вологість. Вміст сухої речовини та зольність впливають на енергетичний вихід.

3. Потреба підприємства у теплі/електроенергії. Якщо підприємство має значні теплові потреби, доцільно орієнтуватися на когенерацію (біогазова ТЕЦ), а при потребі палива для транспорту — на біоетанол чи біодизель.

4. Санітарні обмеження та доступність інфраструктури. Наявність біореакторів, можливості для зберігання та транспортування палива.

Для оцінювання *біоенергетичного потенціалу* проводять інвентаризацію всіх побічних продуктів підприємства, визначають їхню масу, вологість, хімічний склад. Потім розраховують LHV та потенційну енергію. Вибір технології залежить від фізико-хімічних властивостей сировини: сухі відходи (солома, лушпиння) підходять для спалювання; вологі відходи (фільтрати) – для анаеробного зброджування; жирова фракція чи меляса – для виробництва біодизелю або біоетанолу.

Орієнтовні коефіцієнти: 1 т кукурудзяної барди дає 200 м<sup>3</sup> біогазу (4 ГДж), 1 т бурякового жому — 100–120 л біоетанолу, 1 т рафінованої олії — 900 л біодизелю.

Оцінюють також логістику (збір, зберігання, транспортування), наявність ринку збуту та фінансові параметри (вартість обладнання, експлуатаційні витрати, доходи від енергії та побічних продуктів).

Для розрахунку енергетичного потенціалу використовують формулу:

$$E = m \times LHV. \quad (5.1)$$

*Наприклад*, 1000 т соломи з LHV = 14 МДж/кг містять 14 000 ГДж енергії (≈3,9 млн кВт·год). Якщо використати лише 70 % цієї біомаси (з урахуванням збору й транспортування) та ККД котельні 80 %, реальна корисна енергія дорівнюватиме 2,18 млн кВт·год.

*Наприклад*, 1 т курячого посліду здатна виробити близько 70 м<sup>3</sup> біогазу. Якщо ферма має 500 т посліду на рік, то об'єм біогазу становитиме 35 000 м<sup>3</sup>. При LHV біогазу 21,5 МДж/м<sup>3</sup> енергетичний потенціал дорівнює 752 500 МДж, або 209 000 кВт·год.

*Наприклад*, побічний продукт цукрового виробництва – меляса – може бути сировиною для біоетанолу. Якщо з 1 т меляси отримують 0,25 т етанолу з теплою згоряння 27 МДж/кг, то 10 т меляси дадуть 2,5 т етанолу із енергетичним потенціалом 67,5 ГДж (18,8 тис кВт·год).

#### *Екологічні та соціальні аспекти*

Використання біомаси дозволяє зменшити залежність від викопних палив, скорочує викиди парникових газів і вирішує проблему утилізації відходів. Біоенергетичні проекти сприяють розвитку сільських територій, створюють робочі місця та можуть забезпечувати фермерів додатковими доходами від продажу сировини або електроенергії. Водночас важливо враховувати питання сталості: надмірне вилучення поживних залишків може погіршувати родючість ґрунтів, тому необхідний баланс між енергетичним використанням і поверненням органіки на поля.

*Економічна оцінка біоенергетичних проектів.* Розрахунок передбачає визначення капітальних витрат на будівництво установок, експлуатаційних витрат (ферментів, технічного обслуговування), виручки від продажу енергії або економії на її закупівлі. Враховуються також екологічні платежі та можливі дотації.

### Завдання до виконання

1. Ідентифікувати джерела біоенергетичної сировини для умовного харчового підприємства, оцінити їх орієнтовну кількість (кг або т за добу/тиждень) і сезонність. Використайте дані виробничих звітів або літературні довідники.

2. Класифікувати побічні потоки за можливими напрямками використання: біогаз, біоетанол, біодизель, тверде біопаливо, комбіновані продукти. Для кожного виду відходів визначте потенційний енергетичний вихід.

3. Вибрати пріоритетний варіант біоенергетичної технології та обґрунтувати вибір за критеріями доступності сировини, сезонності, потреби в теплі/електроенергії, логістики, санітарних обмежень і наявності інфраструктури. Представте рішення у вигляді порівняльної таблиці критеріїв.

4. Виконати спрощений розрахунок енергетичного потенціалу для обраної сировини (таблиця 5.1). З використанням стандартних коефіцієнтів ( $\text{м}^3$  біогазу/кг сухої речовини, літрів біоетанолу/т тощо) обчисліть потенційний обсяг енергії та порівняйте з потребами підприємства.

Для оцінки біоенергетичного потенціалу застосовують такі ж загальні формули, як у практичних заняттях 3, 4:

1. Потужність сонячної установки – для порівняння різних джерел:

$$P_V = A \cdot G \cdot \eta_{\text{кол}}, \quad (5.1)$$

де  $A$  – площа поглинач,

$G$  – інтенсивність сонячної радіації,

$\eta_{\text{кол}}$  – ККД колектора.

2. Енергетичний потенціал біомаси (спрощено) ( $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{рік}$ ):

$$E_{\text{пот}} = (m \times \text{LHV}) / 3,6, \quad (5.2)$$

де  $m$  – маса відходів, кг,

$\text{LHV}$  – теплота згоряння,  $\text{МДж}/\text{кг}$ ,

3,6 – перехідний коефіцієнт із  $\text{МДж}$  у кіловат-години ( $1 \text{ кВт} \cdot \text{год} = 3,6 \text{ МДж}$ ).

3. Корисна енергія:

$$E_{\text{кор}} = E_{\text{пот}} \times \eta. \quad (5.3)$$

де  $\eta$  – ефективність установок (спалювання, біогазова станція тощо).

4. Енергетична економія:

$$EE = E_{\text{кор}} \times T, \quad (5.4)$$

Де  $T$  – тариф.

5. Розрахунок загального ефекту і періоду окупності.

Визначте період окупності інвестицій:

$$T_{\text{ок}} = \text{Invest} / EE. \quad (5.5)$$

Якщо побічний продукт зброджують, можна також використати формулу для біогазу:

$$E_{\text{біогаз}} = (V \times \text{LHV}) / 3,6 \times \eta_p, \quad (3.4)$$

де  $V$  – добовий обсяг біогазу ( $\text{м}^3/\text{добу}$ ),

$\text{LHV}$  – нижча теплота згоряння,  $\text{LHV} \approx 21,5 \text{ МДж}/\text{м}^3$  для біогазу з 60 % метану ( $\text{МДж}/\text{м}^3$ ),

$\eta_p$  – ККД біогазового генератора;  $1 \text{ МДж} \approx 0,2778 \text{ кВт} \cdot \text{год}$  (відповідно,  $3,6 \text{ МДж} = 1 \text{ кВт} \cdot \text{год}$ ).

Таблиця 5.1 – Вихідні дані

№ п/п	Вид побічного продукту	Маса, т/рік	LHV (МДж/кг)	ККД перетворення, $\eta$	Інвестиції, тис. грн	Тариф на енергію, грн/кВт·год
1	Пшенична солома	220	14,5	0,32	55	3,6
2	Жом буряковий	180	15,0	0,30	48	3,5
3	Картопляні очистки	250	13,8	0,33	60	3,7
4	Соняшникова лузга	200	17,5	0,35	62	3,8
5	Дріжджовий барда	150	14,0	0,28	45	3,4
6	Сироватка молочна	190	12,0	0,25	50	3,5
7	Фруктовий жом	210	13,0	0,30	53	3,6
8	М'ясо-кісткове борошно	140	18,0	0,38	48	3,6
9	Курячий послід	170	6,5	0,25	52	3,4
10	Кукурудзяні качани	230	16,0	0,34	65	3,7
11	Рисове лушпиння	200	15,5	0,32	58	3,5
12	Крохмальний відпад	160	13,5	0,29	47	3,4
13	Рибні відходи	120	10,0	0,27	45	3,6
14	Кавова гуща	180	17,0	0,36	55	3,8
15	Кукурудзяне стебло	250	15,0	0,33	68	3,7

*Примітка:* LHV – нижча теплота згоряння; ККД – очікувана ефективність перетворення біомаси на корисну енергію; тарифи й інвестиції призначені для оцінки економічної ефективності.

#### Контрольні питання.

1. Назвіть основні види біомаси у вашому регіоні (солома, лушпаки, гній тощо) та їхню орієнтовну теплоту згоряння.

2. Як розрахувати енергетичний потенціал соломи масою 800 т при  $LHV = 14$  МДж/кг? Переведіть результат у кВт·год.

3. Поясніть, як оцінити біогазовий потенціал тваринних відходів.

4. Які технології перероблення біомаси існують та які чинники визначають вибір?

5. Чим відрізняються вимоги до збору та транспортування біомаси для спалювання та для анаеробного зброжування?

6. Оцініть, яку частку енергопотреб підприємства може покрити 500 т соломи на рік, якщо воно споживає 2 млн кВт·год теплової енергії.

7. Які екологічні й соціальні переваги має використання біомаси як альтернативного палива?

## Практичне заняття 6. ЕНЕРГОАУДИТ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОГО ПІДПРИЄМСТВА

**Мета заняття:** сформувати практичні навички проведення енергоаудиту холодильних систем: визначати основних споживачів електроенергії, розраховувати коефіцієнт холодопродуктивності (*Coefficient of Performance, COP*), оцінювати втрати через недостатню теплоізоляцію та пропонувати заходи оптимізації температурних режимів.

### Теоретичні відомості

Холодильні установки та теплові насоси є одними з найбільших споживачів електроенергії на харчових підприємствах.

Типова холодильна установка складається з компресора, конденсатора, дросельовального пристрою та випарника. Компресор стискає холодоагент, у конденсаторі холодоагент віддає тепло довкіллю, у випарнику — поглинає тепло від охолоджуваного середовища, забезпечуючи охолодження продукції. Електроенергія витрачається переважно на привід компресора й вентиляційні системи.

**Коефіцієнт холодопродуктивності (COP).** COP показує, наскільки ефективно холодильна установка перетворює електричну енергію в холодопродуктивність. Для системи охолодження він визначається як відношення холодопродуктивності  $Q$  (кВт) до споживаної електричної потужності  $P$  (кВт):

$$COP=Q/P. \quad (6.1)$$

Чим вищий COP, тим менші енергетичні витрати на одиницю холоду.

Це миттєвий показник ефективності, що дозволяє порівнювати продуктивність різних машин: COP = 4 означає, що на кожну одиницю електроенергії машина переносить 4 одиниці тепла. Існує також теоретичний COP для циклу Карно, який залежить від температур випаровування та конденсації, але фактичні системи працюють з нижчим COP через теплові втрати та недосконалості.

Фактори, що знижують COP, це підвищена температура конденсації, низька температура кипіння, недолік холодоагенту, забруднення теплообмінних поверхонь, зношеність компресора.

### Оцінка теплових навантажень і розрахунок $Q$

Для проектування та аудиту систем холодопостачання важливо визначити кількість тепла, що потребує відведення. Це виконують за формулою:

$$Q=m \times c_p \times \Delta T, \quad (6.2)$$

де  $m$  – маса продукту, кг;

$c_p$  – його питома теплоємність, кДж/кг·К або кДж/кг·°С;

$\Delta T$  – різниця температур, К або °С.

*Наприклад,* охолодження 15 кг молока з 40 °С до 5 °С з питомою теплоємністю 3,9 кДж/кг·К потребує  $Q = 15 \times 3,9 \times (40 - 5) \approx 2047$  кДж, або 0,57 кВт·год.

Розглянемо типові втрати та заходи з підвищення ефективності.

Втрати у холодильних системах зумовлені неповним заповненням компресорів, тепловою ізоляцією, витоками холодоагенту, забрудненням

конденсаторів. Застарілі холодильні машини споживають більше електроенергії при меншому COP.

*Втрати через недостатню теплоізоляцію.* Теплоізоляція камер та трубопроводів запобігає проникненню тепла та підвищенню навантаження на компресор. Недостатня товщина або пошкодження ізоляції призводять до збільшення теплопритоків, а відтак — до зростання енергоспоживання.

Втрати тепла через ізоляцію оцінюють за формулою теплопередачі через стінку:

$$Q = \lambda \cdot \Delta T \delta \cdot A, \quad (6.3)$$

де  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності матеріалу,

$\delta$  – товщина шару, м;

$\Delta T$  – різниця температур,

$A$  – площа поверхні, м<sup>2</sup>.

*Оптимізування температурних режимів.* Встановлення адекватних температур зберігання (наприклад,  $-18$  °C для заморожених продуктів,  $+2 \dots +4$  °C для охолоджених) дає змогу зменшити теплові притоки й енергоспоживання. Надмірно низькі температури призводять до перевитрат електроенергії. Системи автоматичного регулювання й моніторингу забезпечують підтримання заданих температур у камерах.

Покращити ефективність можна завдяки:

- своєчасному обслуговуванню (чищення конденсаторів, перевіряння тиску, заміна фільтрів);
- заміні морально застарілого обладнання на сучасне з більшою енергоефективністю;
- утепленню камер та трубопроводів;
- автоматичному регулюванню температури та вологості;
- рекуперації тепла конденсації для підігрівання води.

### *Моніторинг та аналіз енергоефективності*

Під час аудиту вимірюють потужність компресорів, температуру кипіння й конденсації, точку роси, кількість та тип холодоагенту. На основі цих даних розраховують фактичний COP і порівнюють його з паспортним або еталонним значенням. Якщо COP нижчий за норму, шукають причини: недостатній потік повітря через конденсатор, висока температура навколишнього середовища, перенавантаження системи. Для великих підприємств встановлюють енергетичні лічильники та системи диспетчеризації, що дозволяють в реальному часі відстежувати продуктивність обладнання.

### **Завдання до виконання**

1. Проаналізувати основних споживачів електроенергії у холодильній системі. За паспортними або фактичними даними визначте потужність компресорів, вентиляторів, насосів. Оцініть їхній вклад у загальне споживання електроенергії.

2. Розрахувати коефіцієнт холодопродуктивності (COP). COP вже наведено в таблиці 6.1, але для перевірки розрахуйте його ще раз за формулою:

$$COP = Q_{\text{cold}} / W_{\text{in}}. \quad (6.4)$$

Потім визначте ідеальний COP для холодильника Карно:

$$\text{COP}_{\text{Caro}} = T_{\text{cold}} / (T_{\text{hot}} - T_{\text{cold}}), \quad (6.5)$$

де  $T_{\text{cold}} = T_{\text{евап}} + 273,15$ , а  $T_{\text{hot}} = T_{\text{конденс}} + 273,15$ .

Порівняння реального та теоретичного COP покаже потенціал для підвищення ефективності.

Таблиця 6.1 – Вихідні дані

№	Холодопродуктивність Q <sub>cold</sub> , кВт	Споживана потужність W <sub>in</sub> , кВт	COP (факт.)	Т <sub>евап.</sub> , °C	Т <sub>конденс.</sub> , °C	Площа корпусу А, м <sup>2</sup>	U-значення, Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	h <sub>c</sub> , Вт/(м <sup>2</sup> ·К)	ΔТкорпус, °C	Тривалість роботи, год/добу	Тариф, грн/кВт·год	Річне споживання енергії, кВт·год	Річні витрати на енергію, грн	Орієнтовні інвестиції, тис. грн
1	18,0	5,6	3,21	-5	40	15	0,70	10	30	20	3,6	40 880	147 168	55
2	15,0	5,36	2,80	-6	38	12	0,60	9	28	18	3,5	35 180	123 130	50
3	22,0	7,33	3,00	-8	38	17	0,80	12	32	24	3,5	64 231	224 808	60
4	19,0	6,55	2,90	-6	42	14	0,65	10	30	20	3,4	47 815	162 571	52
5	25,0	7,14	3,50	-10	40	18	0,70	12	35	22	3,6	57 974	208 704	65
6	17,0	5,48	3,10	-7	39	13	0,70	11	28	20	3,5	40 004	140 014	54
7	27,0	7,11	3,80	-9	41	20	0,75	13	33	24	3,8	62 196	236 345	68
8	14,0	5,19	2,70	-4	37	11	0,60	9	27	18	3,4	34 113	115 984	47
9	28,0	8,75	3,20	-10	43	19	0,80	13	34	24	3,6	76 650	275 940	70
10	16,0	5,33	3,00	-7	40	13	0,65	10	29	20	3,5	38 909	136 182	53
11	21,0	6,18	3,40	-8	40	15	0,70	11	31	22	3,6	49 489	178 160	58
12	13,0	4,48	2,90	-5	38	10	0,55	9	26	16	3,4	26 163	88 954	45
13	23,0	6,57	3,50	-9	39	17	0,75	12	32	20	3,7	47 961	177 455	62
14	20,0	6,67	3,00	-6	39	14	0,65	10	30	20	3,5	48 591	170 068	56
15	26,0	7,22	3,60	-8	42	18	0,80	13	33	24	3,8	63 063	239 640	65

3. Оцінити теплопровідні та конвекційні втрати через корпус.

Теплопровідна компонента:

$$Q_{\text{cond}}=U \times A \times \Delta T. \quad (6.6)$$

Конвекційна компонента:

$$Q_{\text{conv}}=hc \times A \times \Delta T. \quad (6.7)$$

Переведіть отриману величину у кВт (розділивши на 1000) та порівняйте з  $Q_{\text{cold}}$  – це дасть частку втрат.

4. Визначити теплове навантаження від продукту.

Якщо відома маса продукту та зміна його температури, використовуйте формулу  $Q_{\text{product}}=m \times c_p \times \Delta T$  (поділіть на час охолодження, щоб отримати кВт).

У таблиці 6.1 цих даних не наведено, але можна оцінити, віднявши кондуктивні й конвективні втрати від загального  $Q_{\text{cold}}$ .

5. Обчислити річне споживання й вартість енергії.

Для кожної установки:

$$E_{\text{річн}}=W_{\text{in}} \times t_{\text{роб}}/\text{день} \times 365. \quad (6.8)$$

У таблиці 6.1 ці значення вже розраховані; перевірка допоможе зрозуміти, як зміни COP або години роботи впливають на витрати.

6. Проаналізувати результати і визначити “проблемні” установки. Зверніть увагу на установки з низьким COP (близько 2,7–3,0), великими тепловими втратами чи високими річними витратами на енергію. Це кандидати для модернізації.

7. Сформувати рекомендації щодо підвищення ефективності. Для установок з найгіршими показниками:

- Зменшити теплопровідні втрати шляхом покращення ізоляції (зменшення  $U$ ).
- Зменшити конвекційні втрати, покращивши ущільнення та знижуючи тепловтрати через вентиляцію.
- Оптимізувати температурні режими, щоб зменшити різницю між температурою випаровування й конденсації (ближчий до теоретичного COP).
- Впровадити частотне регулювання компресора для зниження споживання енергії в умовах неповного навантаження.

### Контрольні питання.

1. Дайте визначення коефіцієнта продуктивності холодильника (COP) та запишіть формулу для режиму охолодження.

2. Холодильна установка відбирає 10 кВт холоду та споживає 3 кВт електроенергії. Розрахуйте COP та поясніть, що означає це число.

3. Поясніть різницю між фактичним COP холодильника та теоретичним COP циклу Карно. Чому фактичні значення завжди нижчі?

4. Запишіть формулу для кількості теплоти, що відводиться чи підводиться речовині.

5. Які основні втрати енергії виникають у холодильних машинах? Наведіть приклади та вкажіть, як їх можна зменшити.

6. Оцініть вплив теплоізоляції та технічного обслуговування (очищення конденсаторів, контроль тиску) на ефективність холодильного обладнання.

## Практичне заняття 7. РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛОТИ ТА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

**Мета заняття:** оволодіти методами виявлення джерел відпрацьованого тепла, побудови схем теплообмінної інтеграції та розрахунку економії палива від рекуперації, оцінити доцільність застосування теплових насосів і визначити строк окупності впровадження системи рекуперації.

### Теоретичні відомості

Важливою частиною енергоменеджменту є використання відпрацьованого тепла. У технологічних процесах багато енергії втрачається з гарячими газами, охолоджувальними рідинами або парами. Теплові втрати можна повернути у виробництво завдяки теплообмінникам, рекуператорам, регенераторам та тепловим насосам. Концепція теплової інтеграції передбачає взаємне підключення гарячих і холодних потоків, щоб мінімізувати споживання пари та охолоджувальної води. Один із методів планування – аналіз за «точкою пінч», який дозволяє побудувати оптимальну схему теплообмінів.

*Рекуперація* – це відбір та повторне використання відпрацьованої теплоти з різних джерел (димові гази, відпрацьована пара, охолоджуючі рідини) для нагрівання сировини, повітря чи води. Використання рекупераційних теплообмінників (утилізаторів) дозволяє зменшити споживання первинного палива та підвищити загальну ефективність виробництва.

*Теплова інтеграція* – це метод оптимізування системи теплопередачі, який полягає у з'єднанні процесів, що вимагають тепла та генерують надлишкове тепло, для мінімізації потреб у зовнішньому паливі.

*Pinch-аналіз* використовують для визначення мінімального споживання енергії, побудови композитних кривих і виявлення «pinch-точки» – температури, при якій сумарна потреба в додатковому нагріванні або охолодженні мінімальна. Аналіз допомагає визначити оптимальні теплообмінні мережі.

Золоті правила pinch-аналізу:

1. ніякого підігрівання нижче пінча (гарячі потоки забезпечують підігрівання);

2. ніякого охолодження вище пінча;

3. жоден потік не повинен перетинати пінч-точку при передачі тепла.

Дотримання цих правил дозволяє оптимізувати мережу теплообмінників і зменшити потребу в свіжій парі та охолоджувальній воді.

*Етапи проведення pinch-аналізу*

1. Збирання даних. Визначаються всі технологічні потоки, що потребують нагрівання або охолодження (температури початку й кінця, масові витрати, теплоємність).

2. Побудова композитних кривих. Графічне зображення сумарних гарячих та холодних навантажень, що дозволяє знайти мінімальну різницю температур ( $\Delta T_{min}$ ).

3. Визначення пінч-точки. На основі композитних кривих визначають точку, де сумарний тепловий потік дорівнює нулю.

4. Синтез теплової мережі. Проектують мережу теплообмінників, утилізаторів, допоміжних пристроїв, дотримуючись золотих правил.

5. Перевірка економічності. Оцінюють економію енергії, витрати на обладнання, період окупності, враховують обмеження (корозія, забруднення, безпека).

Pinch-аналіз може забезпечити скорочення енергоспоживання до 40 %.

У практиці харчової промисловості використовують різні типи теплообмінників (трубчасті, пластинчасті, регенеративні) та рекуператорів. Наприклад, гарячі димові гази від сушіння зерна можна використовувати для підігріву повітря в інших процесах; конденсат від парових котлів – для підігрівання сировини. Абсорбційні холодильні установки дозволяють перетворювати низькопотенційне тепло в холод та застосовувати його для кондиціонування приміщень або охолодження продукції.

Кількість тепла, що може бути утилізовано, визначають за формулою:

$$Q_{\text{rec}} = m \cdot c_p \cdot \Delta T, \quad (7.1)$$

де  $m$  – масова витрата потоку, кг/с;

$c_p$  – його теплоємність, кДж/кг·К;

$\Delta T$  – зниження температури, °С.

*Наприклад*, охолодження 0,4 кг/с повітря з 250 °С до 80 °С за  $c_p=1$  кДж/кг·К дає  $Q_{\text{rec}}=0,4 \times 1 \times (250-80)=68$  кВт корисного тепла. Якщо ККД котла 85 %, це дозволяє скоротити споживання палива приблизно на 80 кВт.

Основні труднощі теплової інтеграції – відкладення на теплообмінних поверхнях, корозія, складність синхронізування теплових потоків (часові та кількісні відмінності), необхідність додаткових насосів та автоматизації. Крім того, високий рівень інтеграції підвищує взаємозалежність процесів, що може ускладнити роботу при відмові обладнання. Тому проектування повинно враховувати резерви, гнучкість системи та можливість байпасів.

*Економічний ефект від рекуперації* визначають порівнянням споживання палива до і після впровадження теплообмінної мережі. Економія палива  $\Delta Q$  дорівнює різниці між теплотою, необхідною без рекуперації, та фактичною після впровадження системи рекуперації. Грошовий ефект залежить від вартості енергоносіїв та капітальних затрат на теплообмінне обладнання.

*Тепловий насос* переносить тепло з низькотемпературного джерела до високотемпературного споживача. Його ефективність визначається коефіцієнтом перетворення тепла (COP теплового насоса). Теплові насоси можуть використовуватися для рекуперації низькопотенційного тепла (наприклад, від конденсаторів холодильних машин) і забезпечувати гаряче водопостачання або опалення.

### **Завдання до виконання**

1. Визначити потенційні джерела вторинної теплоти. Для цього проведіть уявний аудит теплових потоків підприємства: виявіть відпрацьовані гази, пари, конденсат, гарячу воду чи інші теплоносії, що скидаються в атмосферу чи каналізацію. Класифікуйте їх за температурою та тепловою потужністю.

Для розрахунку потенційної теплової потужності використовуйте закон теплообміну:

$$Q=m \times c_p \times \Delta T,$$

(7.2)

де Q – теплова потужність потоку в кВт.

Таблиця 7.1 – Вихідні дані

№ п/п	Масова витрата гарячого потоку (m), кг/с	Питома теплоємність (с <sub>p</sub> ), кДж/(кг·°C)	Різниця температур, °C	Теоретична теплота потоку (Q = m c <sub>p</sub> ΔT)	ККД рекуператора η	Кількість годин роботи на рік, год	Відновлена теплота (Q <sub>в</sub> ), кВт	Річна відновлена енергія, кВт·год	Тариф на енергію, грн/кВт·год	Інвестиції, тис.грн	Потенційна річна економія, грн	Окупність, роки
1	0,80	4,2	25	84,0	0,75	6000	63,0	378 000	3,5	60	1 323 000	0,05
2	0,90	1,0	30	27,0	0,70	5500	18,9	103 950	3,6	55	374 220	0,15
3	1,10	4,2	20	92,4	0,78	7000	72,1	504 504	3,5	65	1 765 764	0,04
4	0,70	1,0	35	24,5	0,72	5000	17,6	88 200	3,4	50	299 880	0,17
5	1,00	4,2	30	126,0	0,80	6500	100,8	655 200	3,7	70	2 424 240	0,03
6	0,90	1,0	28	25,2	0,74	6000	18,6	111 888	3,5	56	391 608	0,14
7	1,30	4,2	25	136,5	0,82	7500	111,9	839 475	3,8	75	3 190 005	0,02
8	0,60	1,0	22	13,2	0,70	5000	9,2	46 200	3,4	49	157 080	0,31
9	1,50	4,2	30	189,0	0,83	8000	156,9	1 254 960	3,9	80	4 894 344	0,02
10	0,85	1,0	32	27,2	0,72	5500	19,6	107 712	3,5	53	376 992	0,14
11	1,20	4,2	27	136,1	0,79	7000	107,5	752 522	3,6	68	2 709 081	0,03
12	0,65	1,0	24	15,6	0,71	5200	11,1	57 595	3,5	51	201 583	0,25
13	1,40	4,2	33	194,0	0,81	7600	157,2	1 194 510	3,8	76	4 539 139	0,02
14	0,75	1,0	29	21,8	0,73	5400	15,9	85 738	3,5	52	300 085	0,17
15	1,10	4,2	26	120,1	0,77	6800	92,5	628 948	3,6	70	2 264 214	0,03

**Примітка:**

питома теплоємність (с<sub>p</sub>), кДж/(кг·°C): вода – 4,2 кДж/(кг·°C); повітря – 1,0 кДж/(кг·°C);

масова витрата та теплоємність визначають теплоємність потоку; із цих даних обчислюють теплову потужність. ККД відображає частину тепла, що реально буде повернута через рекуператор або теплообмінник. Річна енергія та економія враховують тривалість роботи та тариф.

2. Визначити відновлену теплову потужність, для цього помножте потенційну теплову потужність на коефіцієнт ефективності рекуператора:

$$Q_{\text{rec}} = \eta \times Q. \quad (7.3)$$

Знайдену відновлену потужність множите на кількість годин роботи за рік, щоб розрахувати річну відновлену енергію:

$$E_{\text{річн}} = Q_{\text{rec}} \times h. \quad (7.4)$$

3. Розрахувати економію палива. Визначте, яку кількість палива (природного газу, мазуту, електроенергії) можна зекономити завдяки рекуперації. Обчисліть еквівалентну вартість за діючими тарифами та зробіть висновок щодо економічності ефективності.

$$E = E_{\text{річн}} \times T. \quad (7.5)$$

4. Визначити строк окупності впровадження системи рекуперації.

Період окупності (роки) обчислюють як відношення інвестицій до річної економії:

$$T_{\text{ок}} = \text{Invest} / E. \quad (7.6)$$

5. Підготовка висновків.

Після виконання розрахунків порівняйте отримані значення річної економії та періодів окупності та визначте, які потоки забезпечують найбільший економічний ефект і найшвидше повернення інвестицій.

### **Контрольні питання.**

1. Що таке тепла інтеграція та в чому полягає її мета? Наведіть приклади виробничих процесів, у яких вона застосовується.

2. Якою формулою визначають кількість тепла, що може бути утилізовано з гарячого потоку?

3. В чому суть річн-аналізу? Які параметри визначають ефективність інтеграції?

4. Поясніть, як обчислюють економію палива при використанні утилізованого тепла, якщо відома ефективність котла. Наведіть приклад.

5. Назвіть основні типи теплообмінників, що застосовуються для рекуперації тепла та їхні особливості.

6. Які труднощі виникають при реалізації схем теплової інтеграції? Як їх розв'язувати?

7. Розрахуйте період окупності установки для утилізації 50 кВт тепла, якщо обладнання коштує 150 000 грн, економія на паливі – 35 000 грн/рік.

## ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

### Методичне забезпечення

1м. Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво [Текст]: конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти освітньої програми «Харчові технології» галузі знань 18 Виробництво та технології спец. 181 Харчові технології денної та заоч. форм навч. / уклад. І.В. Тараймович. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 114 с.

2м. Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво [Текст]: Методичні вказівки до виконання самостійної роботи 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. 32 с.

### 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](https://doi.org/10.1007/978-3-031-46046-3_1)

76. Хорольський, В. П., Хорольский, В. П., Коренець, Ю. М., Коренец, 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>

9б. 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 Компрінг. С. 162 – 176.

10б. Гелетуха, 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. Gorjjan, 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](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>

## З М І С Т

<b>ВСТУП.....</b>	<b>3</b>
<b>Практичне заняття 1. ВСТУП ДО ТЕПЛО- ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ І РЕСУРСОЕФЕКТИВНОСТІ.....</b>	<b>4</b>
<b>Практичне заняття 2. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ.....</b>	<b>9</b>
<b>Практичне заняття 3. РОЗРАХУНОК ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ.....</b>	<b>12</b>
<b>Практичне заняття 4. РОЗРОБЛЕННЯ СХЕМИ КОМПЛЕКСНОГО ВИКОРИСТАННЯ ВТОРИННИХ РЕСУРСІВ.....</b>	<b>15</b>
<b>Практичне заняття 5. ОЦІНЮВАННЯ БІОЕНЕРГЕТИЧНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПОБІЧНИХ ПРОДУКТІВ ХАРЧОВИХ ВИРОБНИЦТВ...</b>	<b>19</b>
<b>Практичне заняття 6. ЕНЕРГОАУДИТ ХОЛОДИЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ ХАРЧОВОГО ПІДПРИЄМСТВА.....</b>	<b>23</b>
<b>Практичне заняття 7. РЕКУПЕРАЦІЯ ТЕПЛОТИ ТА ТЕПЛОВА ІНТЕГРАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....</b>	<b>27</b>
<b>ПЕРЕЛІК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>31</b>
<b>ЗМІСТ.....</b>	<b>34</b>

**Для нотаток**

Т15 **Тепло-, енергозбереження та ресурсоефективне виробництво** [Текст]: Методичні вказівки до виконання практичних занять 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, Ю.В. Федорусь. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 36 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