



---

ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»

---

## **АЛЬТЕРНАТИВНІ ТА НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ:**

методичні рекомендації  
до виконання практичних завдань

Запоріжжя 2026

---



УДК 620.92(072)  
А56

Рекомендовано Науково-методичною радою  
ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»  
(протокол №7 від 04.06.2026 р.)

**Укладач**

ТАВРЕЛЬ М.І., старший викладач кафедри безпеки праці та охорони  
довкілля

**А56**      **Альтернативні та нетрадиційні джерела енергії** : методичні  
рекомендації до виконання практичних завдань / уклад.  
М. І. Таврель. Запоріжжя : ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», 2026. 51 с.

Методичні рекомендації до виконання практичних завдань з  
дисципліни «Альтернативні та нетрадиційні джерела енергії» включають  
інформацію щодо видів завдань, змісту та приклади розрахунків; містить  
перелік основної та додаткової літератури.

**УДК 620.92(072)**



## ЗМІСТ

Вступ	4
Практична робота 1. Стан енергетичної галузі України та перспективи розвитку паливно-енергетичного комплексу України	5
Практична робота 2. Сонячна енергетика. основні поняття про геліосистеми	10
Практична робота 3. Вітроенергетика. розрахунок вітрогенератора	19
Практична робота 4. Геотермальна енергетика	31
Практична робота 5. Біоенергетика	36
Практична робота 6. Екологічні проблеми використання альтернативних джерел енергії	44
Подання на перевірку практичних робіт та критерії оцінювання	49
Додаток А - Приклад оформлення титульного листа	51

## ВСТУП


Сучасний розвиток світової та національної енергетики супроводжується постійним зростанням споживання енергії, поступовим виснаженням традиційних паливно-енергетичних ресурсів і посиленням екологічних проблем, що виникають унаслідок використання викопного палива. Забруднення атмосферного повітря, зміни клімату, збільшення обсягів парникових викидів, порушення природних екосистем та зростання техногенного навантаження на довкілля зумовлюють потребу переходу до більш екологічних і сталих моделей енергозабезпечення. У зв'язку з цим особливої актуальності набуває розвиток та впровадження альтернативних і нетрадиційних джерел енергії як важливого напрямку зміцнення енергетичної безпеки та забезпечення сталого розвитку.

Навчальна дисципліна «Альтернативні та нетрадиційні джерела енергії» спрямована на формування у здобувачів освіти ґрунтовних знань щодо сучасного стану, потенціалу та перспектив використання відновлюваних і нетрадиційних енергетичних ресурсів. До них належать сонячна, вітрова, гідроенергія малих річок, геотермальна енергія, енергія біомаси, вторинні енергетичні ресурси та інші сучасні технології отримання енергії. Дисципліна є вибірковою та має важливе значення у підготовці фахівців технічного й екологічного профілю.

Метою виконання практичних завдань є закріплення теоретичних знань, отриманих під час вивчення дисципліни, а також набуття практичних умінь з оцінювання енергетичного потенціалу альтернативних джерел, проведення інженерних і техніко-економічних розрахунків, аналізу ефективності енергетичних установок та обґрунтування доцільності їх використання з урахуванням економічних, екологічних і соціальних чинників.

Запропоновані теми практичних завдань охоплюють основні напрями розвитку альтернативної енергетики, зокрема визначення потенціалу сонячної та вітрової енергії для окремих територій, розрахунок виробництва електричної і теплової енергії за допомогою біоенергетичних установок, оцінювання ефективності застосування теплових насосів, гібридних енергетичних систем та технологій утилізації вторинних енергоресурсів. Окрема увага приділяється питанням зниження негативного впливу енергетичних об'єктів на довкілля та підвищення енергоефективності промислових і житлово-комунальних систем.

Виконання практичних завдань сприятиме формуванню у студентів професійних компетентностей, необхідних для майбутньої діяльності у сфері альтернативної енергетики, енергоменеджменту та екологічної безпеки.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА 1. СТАН ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ УКРАЇНИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ ПАЛИВНО-ЕНЕРГЕТИЧНОГО КОМПЛЕКСУ УКРАЇНИ

**МЕТА:** Розглянути сучасний стан енергетичної галузі України та перспективні напрями розвитку паливно-енергетичного комплексу України

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

Паливно-енергетичний комплекс завжди був і залишається найважливішою складовою національної безпеки та економічного зростання держави. Від розвитку галузей ПЕК значною мірою залежить динаміка, масштаби та техніко-економічні показники суспільного виробництва, насамперед промисловості.

Паливно-енергетичний комплекс (ПЕК) – це складна система, що включає сукупність виробництв, процесів, матеріальних пристроїв з видобутку паливно-енергетичних ресурсів (ПЕР), їх перетворення, транспортування, розподілу та споживання як первинних ПЕР, так і перетворених видів енергоносіїв.

Паливно-енергетичний комплекс поєднує галузі, пов'язані з:

- видобутком та виробництвом первинних енергетичних ресурсів;
- перероблюванням первинних ресурсів на інші види палива;
- перетворенням первинних ресурсів на інші види енергії (електрична, теплова енергія та ін.);
- транспортуванням та розподілом по споживачах первинних ресурсів.

Паливно-енергетичний комплекс ставить на меті два основні завдання:

- 1) забезпечення населення та економіку всіма видами енергії;
- 2) забезпечити бюджет України за рахунок експорту енергоресурсів, насамперед електроенергії та вугілля.

Основним первинним джерелом енергії є паливо, що забезпечує виробництво понад 50% електроенергії та використовується на промислових підприємствах для технологічних цілей та опалення промислових печей (наприклад, у металургії – доменних, мартенівських, нагрівальних, випалювальних та ін.)

Існуючі види палива поділяються на три групи: тверді, рідкі та газоподібні. У кожній із цих груп розрізняють палива природні та штучні. Усі природні джерела енергії поділяються на невідновлювальні та відновлювальні або альтернативні. Своєю чергою невідновлювальні джерела енергії бувають традиційними та нетрадиційними. Серед нетрадиційних невідновлювальних джерел енергії виділяють ті джерела, освоєння яких у XXI столітті є реальним, а також гіпотетичні джерела –

видобування яких на даний час можливе лише за наявності спеціальної технології та відповідної техніки. Загальна класифікація основних природних джерел енергії наведена на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Основні природні джерела енергії

Паливно-енергетичний комплекс України має свої особливості та є далеким від стандартів країн Європи та США. Останні десятиріччя в ньому спостерігається глибока криза. Розвиток в Україні монополістських ринкових відносин у функціонуванні паливно-енергетичного комплексу, відсутність реальної конкуренції та чіткої специфікації власності прав в умовах надмірно безвідповідального управління національною економікою напівтіньових бізнес-структур і потужних політичних еліт призвело до суттєвого падіння видобутку первинних енергоресурсів і значне скорочення промислового виробництва.

Незаміщення компенсаторного росту внаслідок катастрофічно низьких обсягів цільового геологорозвідування в надрах ефективних запасів природного газу, нафти та викопного вугілля, видобутого за останні 20 років, і низький ступінь використання альтернативних і відновлюваних джерел енергії – нижче мінімальної критичної межі в національній енергетиці балансу, визначив системну залежність економіки України від імпорту природного газу, нафтопродуктів, викопного вугілля та антрациту за завищеними нерівноважними цінами. Так, на імпорт нафти, газу та вугілля країна щороку витрачає понад 11 млрд. дол., що є фатальним для нашої економіки.



Для України енергетична безпека в складних сучасних умовах – це стан захищеності загальнодержавних інтересів своїх громадян, суспільства, основних галузей промисловості, регіонів, територій і населених пунктів від системних загроз для ефективного тепlopостачання та надійного функціонування паливо-енергетичного комплексу. Тому енергетична безпека України має бути невід’ємною складовою національної безпеки, а забезпечення національної безпеки є одним із пріоритетів діяльності державної збалансованої енергетичної політики.

Найважливішими принципами забезпечення ефективної енергетичної безпеки України є:

- гарантоване та надійне енергозабезпечення економіки та населення країни в повному обсязі і за збалансованими оптимальними цінами в нормальних умовах і в мінімальному необхідному обсязі у кризові періоди або при виникненні різного роду надзвичайних ситуацій;

- ефективний контроль з боку держави та органів місцевого самоврядування за надійним енергопостачанням базових галузей промисловості, соціальних секторів та об’єктів, що забезпечують безпеку держави;

- збалансоване відтворення та зростання запасів первинних енергетичних ресурсів у відповідності до швидкості споживання відпрацьованого палива і розробку відновлювальних або альтернативних джерел енергії;

- раціональна та економічно стійка диверсифікація використовуваних видів палива та енергії, а також сталий та ощадливий розвиток національної енергетики;

- створення сприятливих економічних умов і стимулів для розвитку інноваційних напрямків в енергетиці, запобігання марнотратству енергії та підвищення енергетичної ефективності національної економіки;

- максимально можливе використання в усіх технологічних процесах та нововведеннях конкурентоспроможного обладнання, що виготовлено у межах України.

Ефективність функціонування національного паливно-енергетичного комплексу та його здатність до сталого інноваційно-інвестиційного розвитку буде залежати, передусім, від цілісності її структурно єдиної системи, мінерально-сировинної, виробничо-господарського потенціалу. Водночас національна інвестиційна політика в енергетиці та вугільній промисловості України має базуватися на економічній та екологічній ефективності, оптимальному енергоспоживанні та збалансованості цін на первинні енергетичні ресурси, тепло та електроенергію.



Надійне функціонування паливно-енергетичного комплексу України в середній та довгостроковій перспективі можуть бути забезпечені лише на основі комплексної концепції сталого розвитку, яка дозволить узагальнити та збалансувати національні, регіональні та ринково-корпоративні інтереси відповідно до прогнозованих соціально-економічних макропоказників економічної стратегії України на період до 2035 року. Зокрема, на основі докорінного технологічного оновлення та модернізації виробництва з урахуванням входження України до загальноєвропейського енергетичного простору та шляхом реалізації виваженої податкової та цінової державної політики.

Негативні тенденції зниження ролі промисловості в трансформації національної економіки в єдиний європейський економічний простір також має бути подолано, шляхом суттєвого зменшення енергоємності ВВП країни, принаймні до середньоєвропейського рівня, максимального використання наявного мінерально-сировинного потенціалу для збільшення власного видобутку вуглеводнів, урану, вугілля і метану з вугільних пластів і родовищ, а також значного збільшення частки відновлюваних джерел енергії в кінцевій енергії споживання.

Низька рентабельність розробки більшості розвіданих родовищ вуглеводнів та кам'яного вугілля має бути доведено до економічно прийняттого стану за рахунок впровадження нових екологічно чистих технологій, а також розробки та комплексного використання інноваційної сировини, яка зараз віднесена до розряду "відходів". Перспективним напрямом, який сприятиме розвитку паливно-енергетичного комплексу України є розробка родовищ природного газу щільних порід, а також видобуток та використання метану, який зосереджений у вугільних шахтах Донбасу.

Таким чином, раціональне використання національних паливно-енергетичних ресурсів шляхом реконструкції та модернізації виробництва, використання нових технологій та інноваційних досягнень науки та техніки можуть створити надійну матеріальну та енергетичну базу стабілізації та сталого функціонування національної промисловості та інноваційно-інвестиційного розвитку національної економіки.

### **Завдання 1. Дайте відповіді на контрольні питання:**

1. Поняття паливно-енергетичного комплексу. Галузі, що поєднує ПЕК.
2. Завдання ПЕК.
3. Класифікація природних джерел енергії.
4. Особливості ПЕК України.
5. Принципи забезпечення ефективної енергетичної безпеки України.



6. Фактори, від яких залежить ефективність функціонування паливно-енергетичного комплексу України.

7. Забезпечення сталого розвитку ПЕК України.

### **Завдання 2.**

**1) Ознайомитися з основними положеннями законодавства України в галузі розвитку альтернативної енергетики в Україні, а саме:**

- Закон України «Про альтернативні види палива» (21.05.2009);

- Закон України «Про альтернативні джерела енергії» (20.02.2003).

При цьому необхідно звернути увагу на:

- види альтернативного палива;

- ознаки, які мають альтернативні види палива;

- організаційні та фінансові стимулювання виробництва (видобутку) та споживання альтернативних видів палива;

- поняття альтернативні джерела енергії та їх види;

- особливості використання альтернативних джерел енергії;

- стимулювання виробництва та споживання енергії, виробленої з альтернативних джерел;

### **2) Письмово дати відповіді на контрольні питання:**

1. Що таке альтернативні види палива? Наведіть приклади.

2. Які ознаки мають альтернативні види палива.

3. Заходи щодо стимулювання виробництва (видобутку) та споживання альтернативних видів палива.

4. Дайте визначення таким поняттям, як: альтернативні джерела енергії, зелений тариф, відновлювальні джерела енергії.

5. Заходи щодо стимулювання виробництва та споживання енергії, виробленої з альтернативних джерел.

6. Порядок експлуатації альтернативних джерел енергії.

### **ЛІТЕРАТУРА:**

1 Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами і графіками) Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. 2013. 52 с.

2 Моделювання альтернативних джерел енергії ядерного синтезу : монографія / В. Скібінський, В. Петрук, Д. Мацюк ; М-во освіти і науки України, Вінницький нац. техн. ун-т. Вінниця : Універсум, 2012. 109 с.

3 Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / В. В. Клименко та ін. ; ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2023. 268 с.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА 2. СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ПРО ГЕЛІОСИСТЕМИ

**МЕТА:** ознайомитися з видами та конструкціями геліосистем; навчитися розраховувати сонячні колектори.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

**Геліосистеми** – це спеціальні комплекси, що дозволяють трансформувати променеву сонячну енергію в теплову.

До переваг геліосистем відносять:

- тривалий термін експлуатації – 20-25 років;
- енергія сонця є екологічно чистим, невичерпним джерелом енергії;
- низька собівартість отриманої теплової енергії.

За способом застосування геліосистеми поділяють на:

- Системи, які використовуються для тепlopостачання. Їх також називають сонячними.
- Системи, що використовуються для вироблення електричного струму. Дане обладнання не працює на фотоелектричному принципі.
- Системи, що використовуються для охолодження, тобто для абсорбції та адсорбції.

Найбільшого використання, зараз, набули системи тепlopостачання, оскільки вони мають найбільший попит. На поточний момент часу подібне обладнання застосовується з метою отримання гарячої води та підтримки необхідної температури в приміщеннях. В першу чергу, це стосується замських будинків, котеджів, пансіонатів і готелів. До того ж подібні установки можуть застосовуватися в різних галузях промисловості й при виконанні ряду технологічних процесів. Також дане обладнання може бути комбінованим і виконувати відразу кілька функцій.

За типом циркуляції теплового носія системи сонячного тепlopостачання можна поділити на: системи з природною циркуляцією, та системи з примусовою циркуляцією.

Геліосистема включає наступні основні елементи (рис. 2.1):

1. Сонячний колектор або, так званий, геліоколектор. Даний елемент є основоположним, адже саме він вловлює сонячні промені й перетворює світлову енергію на теплову або електричну. Так інфрачервона складова випромінювання, потрапляючи на колектор перетворюється в теплову енергію. Це призводить до розігрівання панелі. В результаті цього рідкий теплоносій у вигляді води або рідини, що не замерзає, нагрівається.

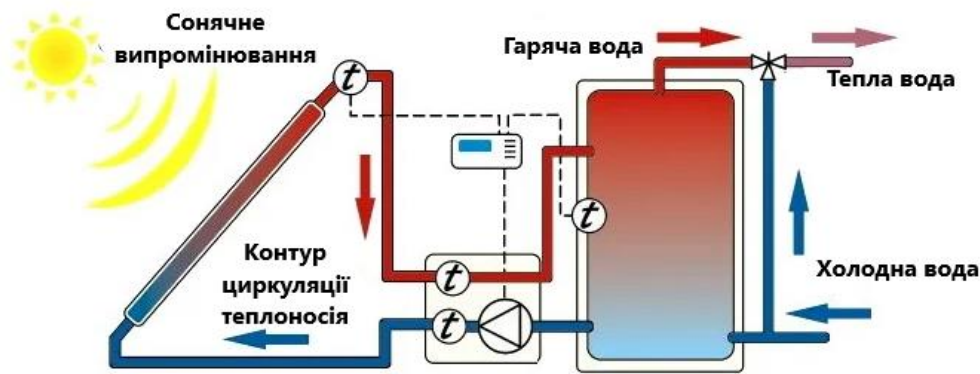


Рисунок 2.1 – Конструкція геліосистеми

2. Система трубопроводів, по яких переміщається рідина від колектора в баки й навпаки.

3. Бак-акумулятор, в якому накопичується теплоносії, ємністю 150-700 літрів.

4. Контур нагріву повітряних мас або води. Це можуть бути труби опалення.

5. Насос, який переміщує теплоносії по системі.

6. Пристрій регуляції температури й контролю.

7. Джерело додаткової енергії. Воно необхідне, якщо на вулиці негода або ніч.

Геліосистема має замкнутий цикл роботи, це означає, що теплоносії віддає тепло й знову переміщається до колектора для нагрівання.

Геліосистема може мати три основних види геліоколекторів: відкриті, плоскі сонячні колектори та вакуумні трубчасті колектори.

У **відкритих установках** використовується панель, що поглинає світло, без корпусу, яка виробляється з гумових або пластикових матеріалів. Дані панелі виділяються стійкістю до ультрафіолету, тому їх можна встановлювати безпосередньо на даху. Подібний тип колекторів широко застосовується для підігріву води в країнах, які характеризуються теплим кліматом і значним числом сонячних днів у році.

Переваги відкритих установок: простота пристрою, невелика вага, легкий монтаж. Істотним недоліком, який обмежує їх застосування це невеликий термін експлуатації.

Найбільш поширені **плоскі колектори**, оскільки мають оптимальне співвідношення ефективності, вартості й надійності. До плюсів подібних колекторів можна віднести:

- можливість ефективного застосування круглий рік;
- надійність та ефективність;
- універсальність;



- тривалий термін експлуатації.

Однак в порівнянні з вакуумними пристроями у них може спостерігатися зниження ККД в період низького випромінювання Сонця.

**Вакуумні геліоколектори** бувають плоскими та трубчастими. Основна проблема використання даних пристроїв полягає в підтримці вакууму на необхідному рівні в період їх служби. Тому в плоских вакуумних пристроях додатково встановлюють спеціальні насоси. Перевагою вакуумних колекторів є: висока ефективність, універсальність, високий ККД в зимовий період. Недолік – низька надійність, що пов'язана з великим ризиком побиття градом або приведення в непридатність іншими погодними явищами.

### 1. Розрахунок кількості трубок для вакуумного сонячного колектора Атаба.

Необхідно забезпечити гарячою водою сім'ю з  $n$  чоловік, що проживають в певному місті, при середньодобовій потребі кожного з них  $V_x$ , л/люд. Середня температура води, що входить, складає  $t_n$ , °С, необхідна кінцева температура –  $t_k$ , °С; здатність поглинання енергії сонця сонячним колектором Атаба складає  $Y$  %, площа поглинання –  $S_{тр}$ , м<sup>2</sup>. Розрахунок проводиться за наступним алгоритмом:

- визначення об'єму ємності нагрівача:

$$V_n = 1,5 \cdot (n \cdot V_x) \quad (2.1)$$

де  $V_n$  – об'єм ємності колектора, м<sup>3</sup>;

$n$  – кількість людей в сім'ї, люд.

$V_x$  – середньодобова потреба у воді кожного члена сім'ї, л/люд.

- визначення температурного перепаду:

$$T_T = t_k - t_n, \text{ } ^\circ\text{C} \quad (2.2)$$

де  $t_k$  – кінцева температура води, °С;

$t_n$  – початкова температура води, °С.

Розраховуємо кількість енергії, необхідної для нагрівання потрібної кількості води з урахуванням того, що для нагріву одного літра води на один градус потрібно витратити енергію рівну 1 ккал.

$$G = V_n \cdot T_T \quad (2.3)$$



Для переведення цієї енергії в кВт·год скористаємося наступною формулою:

$$GB = \frac{G}{859,8} \quad (2.4)$$

(1 кВт·год = 859,8 ккал)

Визначимося з кількістю енергії, яка може поглинатися й перетворюватися в тепло сонячними колекторами Атаба.

Визначаємо середньомісячне значення сонячної радіації ( $G_x$ ) для вказаного міста (Додаток 1).

Розраховуємо кількість енергії, здатну акумулюватися однією трубкою сонячного колектора за формулою:

$$G_{mp} = G_x \cdot Y \cdot S_{mp} \quad (2.5)$$

де  $Y$  – кількість сонячної енергії, що здатна поглинатися цією маркою колектора, %;

$S_{тр}$  – площа поглинання вакуумної трубки цього колектора, м<sup>2</sup>.

Визначаємо необхідну кількість трубок:

$$N = \frac{GB}{G_{mp}} \quad (2.6)$$

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Вихідні данні для розрахунку кількості трубок для вакуумного сонячного колектора

Варіант	Кількість людей в сім'ї, люд	Місто проживання	Добова потреба у воді, л/люд	$t_n$ , °C	$t_k$ , °C	$Y$ , %	$S_{тр}$ , м <sup>2</sup>
1	2	Київ	30	12	55	80	0,08
2	3	Вінниця	40	14	57	79,5	0,076
3	4	Дніпро	50	16	58	79,3	0,082
4	5	Суми	50	11	65	80,2	0,081
5	4	Черкаси	45	13	63	81	0,079
6	3	Херсон	30	12	62	78,9	0,078
7	2	Чернівці	35	16	65	75,4	0,077
8	2	Одеса	50	15	55	79,2	0,083
9	5	Тернопіль	45	14	57	80,5	0,084

10	4	Полтава	45	12	59	80,8	0,081
11	6	Миколаїв	60	13	62	82	0,08
12	3	Рівно	50	14	65	80,1	0,076
13	5	Харків	35	11	58	79,5	0,082
14	4	Херсон	35	12	53	78,4	0,081
15	4	Дніпро	40	15	56	77,6	0,079
16	5	І.Франківськ	25	17	64	77,5	0,078
17	7	Запоріжжя	40	13	58	79,2	0,077
18	2	Одеса	50	14	56	80,5	0,083
19	3	Київ	50	12	61	80,8	0,084
20	4	Тернопіль	45	15	59	79,1	0,081
21	1	Миколаїв	37	18	65	83,4	0,076
22	3	Херсон	40	12	59	79,6	0,080
23	4	Суми	30	10	57	80,6	0,083
24	2	Дніпро	45	12	60	77,2	0,082
25	5	Рівно	32	11	54	76,5	0,076
26	3	Полтава	54	14	63	80,3	0,078
27	4	Одеса	69	15	57	79,8	0,081
28	6	Харків	34	14	60	70,5	0,079
29	1	Черкаси	51	13	62	79,7	0,083
30	2	Тернопіль	46	14	57	77,4	0,077

**Приклад розрахунку.** Приймаємо наступні умови: сім'я складається з  $n=6$  чоловік, що проживають в місті Хмельницький, при середньодобовій потребі кожного з них  $V_x=70$  л. Середня температура води, що входить, складає  $t_n=12^\circ\text{C}$ , необхідна кінцева температура –  $t_k=60^\circ\text{C}$ ; здатність поглинання енергії сонця сонячним колектором Атаба складає  $\gamma=80\%$ , площа поглинання –  $S_{\text{TP}}=0,08 \text{ м}^2$ .

Визначаємо об'єм ємності нагрівача:

$$V_n = 1,5 \cdot (n \cdot V_x) = 1,5 \cdot (6 \cdot 70) = 630 \text{ л}$$

Визначаємо температурний перепад:

$$T_T = t_k - t_n = 60 - 12 = 48, \text{ } ^\circ\text{C}$$

Розраховуємо кількість енергії, яка необхідна для нагрівання потрібної кількості води з урахуванням того, що для нагріву одного літра води на один градус потрібно витратити енергію рівну 1 ккал.

$$G = V_n \cdot T_T = 630 \cdot 48 = 30240 \text{ ккал}$$



Для переведення цієї енергії в кВт-год скористаємося наступною формулою:

$$GB = \frac{G}{859,8} = \frac{30240}{859,8} = 35,17 \text{ кВт - год}$$

Визначимося з кількістю енергії, яка може поглинатися і перетворюватися в тепло сонячними колекторами Атаба.

Середньомісячне значення сонячної радіації для міста Хмельницький згідно додатка складає  $G_x=3,06$  кВт-год/м<sup>2</sup>/доб.

Розраховуємо кількість енергії, здатну акумулюватися однією трубкою сонячного колектора за формулою:

$$G_{mp} = G_x \cdot Y \cdot S_{mp} = 3,06 \cdot 0,8 \cdot 0,08 = 0,196 \text{ кВт - год/доб}$$

Визначаємо необхідне число трубок:

$$N = \frac{GB}{G_{mp}} = \frac{35,17}{0,196} = 180 \text{ шт}$$

## 2 Розрахунок параметрів геліоелектростанції типу вежа

На сонячній електростанції типу вежі встановлено  $n$  геліостатів, кожен з яких має поверхню  $F_r$  м<sup>2</sup>. Визначити площу поверхні приймача  $F_{пр}$  і теплові втрати в приймачеві, які викликані випромінюванням і конвекцією, якщо робоча температура теплоносія складає  $t^\circ\text{C}$ . Міра чорноти приймача  $\epsilon_{пр}=0,95$ . Конвективні втрати удвічі менше втрат від випромінювання.

Електростанція баштового типу призначена для використання сонячної енергії на вироблення електричної енергії. Геліостати (концентратори) сонячної енергії направляють сонячне випромінювання на поверхню теплоприймача, в якому відбувається випаровування води і перегрів водяної пари, що утворився. Потім пар направляється в парову турбіну, яка використовується для приводу електрогенератора.

Енергія, що отримана приймачем від сонця через геліостати (Вт), може бути визначена за формулою:

$$Q = R_r \cdot A_{np} \cdot F_r \cdot H_r \cdot n \quad (2.7)$$

де  $H_r$  – опроміненість дзеркала геліостата у Вт/м<sup>2</sup> (для типових умов  $H_r=600$  Вт/м<sup>2</sup>);

$F_r$  – площа поверхні геліостата, м<sup>2</sup>;



$n$  – кількість геліостатів;

$R_r$  – коефіцієнт віддзеркалення дзеркала концентратора,  $R_r=0,7\div 0,8$ ;

$A_{пр}$  – коефіцієнт поглинання приймача,  $A_{пр}<1$ .

Площа поверхні приймача може бути визначена, якщо відома енергетична освітленість на ньому  $H_{пр}$  Вт/м<sup>2</sup>:

$$F_{пр} = \frac{Q}{H_{пр}} \quad (2.8)$$

У загальному випадку температура на поверхні приймача може досягати  $t_{пов}=1160^\circ\text{C}$ , що дозволяє нагрівати теплоносії до  $700^\circ\text{C}$ . Втрати тепла за рахунок випромінювання в теплоприймачі можна вчислити за законом Стефана-Больцмана:

$$Q_{пр} = e_{пр} \cdot C_o \cdot \left(\frac{T}{100}\right)^4, \text{ Вт/м}^2 \quad (2.9)$$

де  $T$  – абсолютна температура теплоносія, К; (для переведення температури зі шкали Цельсія в шкалу Кельвіна використовують вираз  $T=t+273,15$ ;

$e_{пр}$  – міра чорноти сірого тіла приймача;

$C_o$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла, дорівнює  $5,67 \cdot 10^{-8}$  Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>)

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Вихідні данні для розрахунку параметрів геліоелектростанції

Варіант	$n$	$F_r, \text{ м}^2$	$t, ^\circ\text{C}$	$R_r$	$A_{пр}$	$H_{пр}, \text{ МВт/м}^2$	$e_{пр}$
1	243	64	690	0,8	0,95	2,5	0,95
2	253	61	695	0,7	0,95	2,5	0,95
3	263	58	705	0,8	0,95	2,5	0,95
4	277	55	700	0,7	0,95	2,5	0,95
5	245	52	680	0,7	0,95	2,5	0,95
6	296	49	660	0,8	0,95	2,5	0,95
7	268	46	643	0,7	0,95	2,5	0,95
8	303	43	706	0,8	0,95	2,5	0,95
9	313	40	615	0,7	0,95	2,5	0,95
10	294	37	620	0,8	0,95	2,5	0,95
11	311	43	607	0,8	0,95	2,5	0,95
12	316	51	625	0,7	0,95	2,5	0,95
13	313	38	643	0,8	0,95	2,5	0,95
14	246	53	642	0,7	0,95	2,5	0,95
15	263	40	665	0,7	0,95	2,5	0,95

16	257	44	687	0,8	0,95	2,5	0,95
17	269	39	676	0,7	0,95	2,5	0,95
18	254	45	639	0,8	0,95	2,5	0,95
19	309	39	654	0,7	0,95	2,5	0,95
20	304	52	628	0,8	0,95	2,5	0,95
21	310	53	665	0,8	0,95	2,5	0,95
22	294	50	710	0,7	0,95	2,5	0,95
23	283	47	684	0,8	0,95	2,5	0,95
24	289	45	720	0,7	0,95	2,5	0,95
25	309	59	719	0,7	0,95	2,5	0,95
26	291	63	673	0,8	0,95	2,5	0,95
27	307	41	675	0,7	0,95	2,5	0,95
28	293	58	695	0,8	0,95	2,5	0,95
29	301	46	687	0,7	0,95	2,5	0,95
30	305	54	681	0,8	0,95	2,5	0,95

**Приклад розрахунку.** На сонячній електростанції типу вежі встановлено 250 геліостатів, кожен з яких має поверхню  $F_r=62 \text{ м}^2$ , а робоча температура теплоносія складає  $t=650^\circ\text{C}$ . Геліостати відбивають сонячні промені на приймач, на поверхні якого зареєстрована максимальна енергетична освітленість  $H_{np}=2,5 \text{ МВт/м}^2$ . Коефіцієнт віддзеркалення геліостата  $R_r=0,8$ . Коефіцієнт поглинання приймача  $A_{np}=0,95$ . Максимальна опроміненість дзеркала геліостата  $H_r=600 \text{ Вт/м}^2$ . Міра чорноти приймача  $\epsilon_{np}=0,95$ . Визначити площу поверхні приймача  $F_{np}$  і теплові втрати в приймачеві, які викликані випромінюванням і конвекцією. Енергія, отримана приймачем від сонця через геліостати:

$$Q = 0,8 \cdot 0,95 \cdot 62 \cdot 650 \cdot 250 = 7,66 \cdot 10^6 \text{ Вт}$$

Площа поверхні приймача:

$$F_{np} = \frac{7,66 \cdot 10^6}{2,5 \cdot 10^6} = 3,06 \text{ м}^2$$

Втрати тепла за рахунок випромінювання в теплоприймачі:

$$Q_{np} = 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{650 + 273,15}{100}\right)^4 = 3,91 \cdot 10^{-4} \text{ Вт/м}^2$$

**Середній місячний рівень сонячної радіації(сонячна постійна) в містах України (кВт/м<sup>2</sup>/день)**

**Середній показник за останні 22 року (За даними NASA)**

Регіони / Місяці	січ	лют	берез	квіт	трав	черв	лип	серп	верес	жовт	лист	груд	Середн
Сімферополь	1,27	2,06	3,05	4,30	5,44	5,84	6,20	5,34	4,07	2,67	1,55	1,07	3,58
Вінниця	1,07	1,89	2,94	3,92	5,19	5,3	5,16	4,68	3,21	1,97	1,10	0,9	3,11
Луцьк	1,02	1,77	2,83	3,91	5,05	5,08	4,94	4,55	3,01	1,83	1,05	0,79	2,99
Дніпропетровськ	1,21	1,99	2,98	4,05	5,55	5,57	5,70	5,08	3,66	2,27	1,20	0,96	3,36
Донецьк	1,21	1,99	2,94	4,04	5,48	5,55	5,66	5,09	3,67	2,24	1,23	0,96	3,34
Житомир	1,01	1,82	2,87	3,88	5,16	5,19	5,04	4,66	3,06	1,87	1,04	0,83	3,04
Ужгород	1,13	1,91	3,01	4,03	5,01	5,31	5,25	4,82	3,33	2,02	1,19	0,88	3,16
Запоріжжя	1,21	2,00	2,91	4,20	5,62	5,72	5,88	5,18	3,87	2,44	1,25	0,95	3,44
Івано-Франківськ	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94
Київ	1,07	1,87	2,95	3,96	5,25	5,22	5,25	4,67	3,12	1,94	1,02	0,86	3,10
Кіровоград	1,20	1,95	2,96	4,07	5,47	5,49	5,57	4,92	3,57	2,24	1,14	0,96	3,30
Луганськ	1,23	2,06	3,05	4,05	5,46	5,57	5,65	4,99	3,62	2,23	1,26	0,93	3,34
Львів	1,08	1,83	2,82	3,78	4,67	4,83	4,83	4,45	3,00	1,85	1,06	0,83	2,92
Миколаїв	1,25	2,10	3,07	4,38	5,65	5,85	6,03	5,34	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Одеса	1,25	2,11	3,08	4,38	5,65	5,85	6,04	5,33	3,93	2,52	1,36	1,04	3,55
Полтава	1,18	1,96	3,05	4,00	5,40	5,44	5,51	4,87	3,42	2,11	1,15	0,91	3,25
Рівно	1,01	1,81	2,83	3,87	5,08	5,17	4,98	4,58	3,02	1,87	1,04	0,81	3,01
Суми	1,13	1,93	3,05	3,98	5,27	5,32	5,38	4,67	3,19	1,98	1,10	0,86	3,16
Тернопіль	1,09	1,86	2,85	3,85	4,84	5,00	4,93	4,51	3,08	1,91	1,09	0,85	2,99
Харків	1,19	2,02	3,05	3,92	5,38	5,46	5,56	4,88	3,49	2,10	1,19	0,9	3,26
Херсон	1,30	2,13	3,08	4,36	5,68	5,76	6,00	5,29	4,00	2,57	1,36	1,04	3,55
Хмельницький	1,09	1,86	2,87	3,85	5,08	5,21	5,04	4,58	3,14	1,98	1,10	0,87	3,06
Черкаси	1,15	1,91	2,94	3,99	5,44	5,46	5,54	4,87	3,40	2,13	1,09	0,91	3,24
Чернігів	0,99	1,80	2,92	3,96	5,17	5,19	5,12	4,54	3,00	1,86	0,98	0,75	3,03
Чернівці	1,19	1,93	2,84	3,68	4,54	4,75	4,76	4,40	3,06	2,00	1,20	0,94	2,94

**ЛІТЕРАТУРА:**

1 Енергоощадність та альтернативні джерела енергії : навчальний посібник / М. Й. Олійник, В. Г. Лисяк, О. Б. Дудурич. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 184 с.

Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч.

2 посібник / Дмитро Дудюк, Святослав Мазепа, Ярослав Гнатишин. Львів : Магнолія 2011. 187 с.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА 3. ВІТРОЕНЕРГЕТИКА. РОЗРАХУНОК ВІТРОГЕНЕРАТОРА

**МЕТА:** ознайомитися з будовою вітрогенераторів і методикою їх розрахунку.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

**Вітрогенератор** – являє собою пристрій, який шляхом перетворення вітрового потоку виробляє електричну або механічну енергію, для її подальшого використання споживачами.

Вітрогенератори використовуються в різних місцях, зазвичай це відкриті території, оскільки там потенціал вітру найбільший. Станції альтернативних джерел енергії встановлюють в горах, на мілководді, островах і полях. Сучасні установки можуть виробляти енергію навіть при невеликій силі вітру. Завдяки такій можливості вітрогенератори використовують для постачання електричною енергією об'єктів різної потужності.

До числа основних переваг конструкцій, які застосовують в якості енергії швидкість вітру, відносять:

- **Екологічність.** Споруди використовують поновлюване джерело електроенергії, яке можна використовувати багаторазово, не впливаючи ніяким чином на екологію. Електроенергія, яка виробляється вітрогенераторами, замінює енергію традиційних електростанцій, тим самим знижуючи ймовірність виникнення глобального потепління.

- **Багатофункціональність.** Вітроелектростанції можна будувати на всіх територіях. Такі установки важливі в тих місцях, де неможливо протягнути електрику традиційним шляхом.

- **Ефективність застосування.** Сучасні конструкції перетворюють енергію навіть малих за швидкістю вітрів, але не менше 3,5 м/с.

- **Альтернатива традиційним джерелам отримання електроенергії.** Стаціонарні вітроелектростанції здатні забезпечити електричною енергією цілий будинок або маленьке виробництво. В такому випадку велотурбіна буде накопичувати в акумуляторі необхідний запас електрики, який буде застосовуватися в безвітряну погоду.

- **Економічність.** У порівнянні з традиційними електричними станціями, велотурбіни дозволяють істотно зменшити витрати. Як правило, на будівництво вітрової електростанції йде менше грошових коштів, ніж на під'єднання до вже наявних систем.

Вітряні електричні станції мають також і недоліки:

- Дізнатися заздалегідь швидкість вітру практично неможливо, оскільки вона весь час змінюється. З цієї причини краще підстрахувати



себе і зробити допоміжне джерело енергії. Це можуть бути, наприклад, сонячні панелі, приєднані до електричної мережі.

- Вертикальні конструкції більш схильні до небезпеки, оскільки такі установки можуть зруйнуватися через вплив сили інерції при обертанні лопатей навколо осі. В результаті, важливі компоненти споруди через певний проміжок часу піддаються змінам і потім руйнуються, а сам пристрій стає непридатним для роботи.

- Вітроелектростанції краще розміщувати на відстані від інших будівель, оскільки будинки, що розташовані поруч, будуть зменшувати швидкість вітру, а через це величина вироблення електроенергії буде менше.

- Під час роботи вітрогенератори утворюють сильний шум, який може доставляти незручності людям.

Крім того, лопаті конструкції можуть стати причиною смерті птахів, що підлітають до них.

До мінусів вітряних установок можна також віднести маленький ККД і їх значну ціну, однак, подібні агрегати з часом окупають свою вартість.

На даний момент відомі два основних типи вітрогенераторів, конструктивні відмінності яких полягають у розташуванні осі обертання елемента, що вловлює енергію вітру.

Вітряні генератори бувають:

- з горизонтальною віссю обертання (рис.3.1, а);
- з вертикальною віссю обертання (рис.3.1., б).

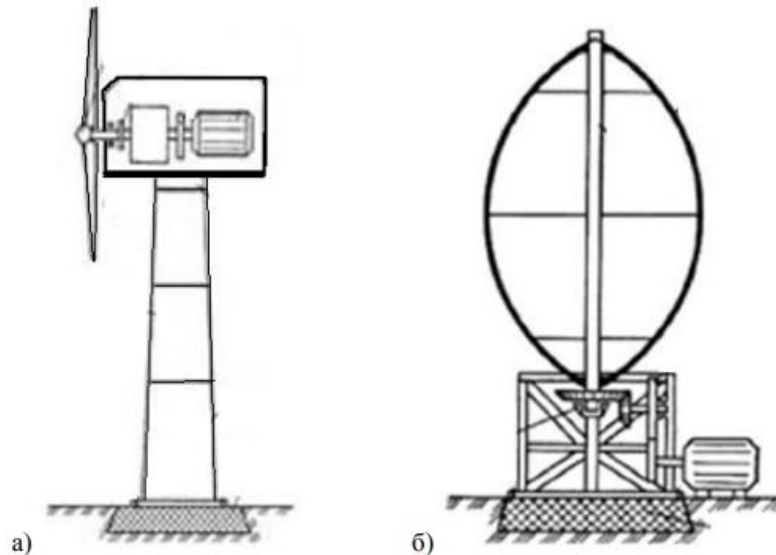
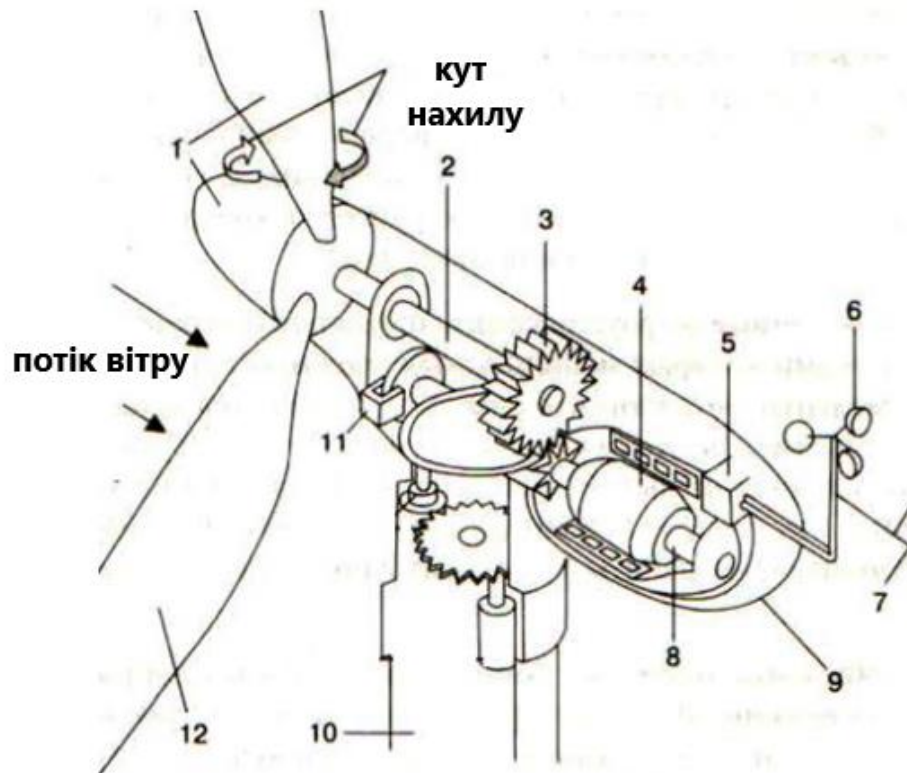


Рисунок 3.1 – Вітрогенератор з горизонтальною віссю обертання (а) та з вертикальною віссю (б)

Принцип роботи вітрогенератора дуже простий. Потік вітру чинить тиск на лопаті (12) вітрового колеса. Ротор (1) вітрового колеса закріплений на низькошвидкісному валу (2). Під впливом вітру вітряне колесо (ротор з лопатями та низькошвидкісний вал) починає обертатися, здійснюючи перетворення вітряної енергії в механічну. Від низькошвидкісного валу через редуктор (3) механічний рух передається на вал (8) електричного генератора (4). При обертанні ротора електрогенератора здійснюється перетворення механічної енергії в електричну.



1 – ротор, 2 – низькошвидкісний вал, 3 – редуктор, 4 – генератор, 5 – контролер, 6 – анемометр, 7 – флюгер, 8 – високошвидкісний вал, 9 – гондола, 10 – щогла, 11 – гальма, 12 – лопать

Рисунок 3.2 – Конструктивна схема вітроустановки

Потужність, що виробляється горизонтальною ВЕУ, залежить від траєкторії руху повітряного потоку, на яку впливає швидкість вітру, рельєф місцевості, а також щільність та висота забудови. Природні або будівельні об'єкти, розташовані на шляху вітрового потоку, можуть утворювати вітрові тіні різної висоти та конфігурації. Це може значно впливати на ефективність роботи ВЕУ. Тому при виборі висоти вежі ВЕУ слід пам'ятати, що нижній край лопатей вітроколеса повинен розташовуватися



на висоті, як мінімум, на 10 метрів вище найвищої перешкоди в межах 150 метрів (а у разі протяжної перешкоди – 1000 м).

### Основні параметри ВЕУ

**Номінальна потужність  $P_{\text{ном}}$  [Вт, кВт]** – потужність, що розвивається вітроустановкою при розрахунковій швидкості вітру;

**Розрахункова швидкість вітру  $V_p$  [м/с]** – швидкість, яку приймають для розрахунку вітрового навантаження на споруди при проектуванні. Залежно від класу споруди враховується швидкість із заданою повторюваністю – 1 раз на рік, в 5, 10, 15, 20, 50 і 100 років;

**Діаметр вітротурбіни  $D$  [м]** – відрізок, що сполучає пару найбільш віддалених одна від однієї точок вітротурбіни, що проходить через її центр.

**Вироблення енергії  $W_m$  [кВт-год]** – кількість енергії, що виробляється вітротурбіною за певний проміжок часу (місяць, рік), величина, залежна від середньої швидкості вітру;

**Середня потужність  $P_{\text{ср}}$  [кВт]** – потужність, при безперервній підтримці якої, вироблення енергії за місяць буде дорівнювати реальній.

### 3.1 Розрахунок потужності вітрогенератора (пряма задача)

Розрахунок вітрогенератора здійснюють за алгоритмом:

1. Потужність вітроустановки дорівнює:

$$P = \eta_{\text{ред}} \cdot \eta_{\text{ген}} \cdot P_T, \text{Вт} \quad (3.1)$$

де  $P_T$  – потужність вітротурбіни;

$\eta_{\text{ред}}$  – ККД редуктора;

$\eta_{\text{ген}}$  – ККД генератора.

2. Потужність турбіни складає:

$$P_T = \xi \cdot P_{\Pi}, \text{Вт} \quad (3.2)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт вітровикористання. Реальний коефіцієнт вітровикористання добре спроектованої турбіни складає 0,4-0,55;

$P_{\Pi}$  – потужність вітрового потоку, що проходить через площу лопатей вітроустановки.

3. Потужність потоку обчислюється за формулою

$$P_{\Pi} = \frac{\rho \cdot V^3}{2} \cdot S, \text{Вт} \quad (3.3)$$

де  $\rho$  – щільність повітря (стандартне значення 1,225 кг/м<sup>3</sup>);



$V$  – швидкість незбуреного вітрового потоку, м/с;  
 $S = \pi D^2/4$  – площа;  
 $D = 4$

**Завдання.** Розрахувати потужність вітроустановки з радіусом ротора  $R$  м при стартовій швидкості вітру  $V$  м/с, коефіцієнтом використання вітру  $\xi$ , ККД редуктора –  $\eta_{ред}$ ; ККД генератора –  $\eta_{ген}$ .  
Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Вихідні данні для розрахунку вітрогенератора

Варіант	R, м	V, м/с	$\xi$	$\eta_{ред}$	$\eta_{ген}$
1	2,3	5,3	0,41	0,84	0,88
2	2,1	4,2	0,43	0,8	0,86
3	2,0	5,7	0,47	0,88	0,91
4	1,8	4,8	0,51	0,84	0,85
5	2,1	6,3	0,5	0,81	0,89
6	3,7	4,5	0,45	0,82	0,9
7	3,3	6,6	0,55	0,87	0,88
8	5,0	5,4	0,45	0,8	0,87
9	2,2	6,9	0,46	0,83	0,9
10	4,8	5,0	0,43	0,81	0,87
11	2,0	4,4	0,51	0,82	0,88
12	1,9	5,9	0,46	0,84	0,85

**Приклад розрахунку.** Приймаємо наступні умови: вітроустановка з радіусом ротора  $R=2,0$  м при стартовій швидкості вітру  $V=5$  м/с, коефіцієнт використання вітру  $\xi = 0,45$ , ККД редуктора –  $\eta_{ред} = 0,82$ ; ККД генератора –  $\eta_{ген} = 0,85$

1. Потужність потоку обчислюється за формулою:

$$P_{п} = \frac{1,225 \cdot 5^3}{2} \cdot \frac{3,14 \cdot 4^2}{4} = 962, \text{ Вт}$$

2. Потужність турбіни складає:

$$P_{т} = 0,45 \cdot 962 = 433, \text{ Вт}$$

3. Потужність вітроустановки дорівнює:

$$P = 0,82 \cdot 0,85 \cdot 433 = 302, \text{ Вт}$$

### 3.2 Розрахунок вітрогенератора (зворотна задача)

При якій швидкості вітру вітроустановка генеруватиме кількість енергії, достатню для забезпечення енергією середнього котеджного будиночка при радіусі ротора  $R$  м, коефіцієнті використання вітру –  $\xi$ ; ККД редуктора –  $\eta_{ред}$ ; ККД генератора –  $\eta_{ген}$ .

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Вихідні данні для розрахунку вітрогенератора (зворотна задача)

Варіант	R, м	P, кВт	$\xi$	$\eta_{ред}$	$\eta_{ген}$
1	2,3	3,2	0,41	0,84	0,88
2	2,1	4,9	0,43	0,8	0,86
3	2,0	4,0	0,47	0,88	0,91
4	1,8	4,7	0,51	0,84	0,85
5	2,1	4,3	0,5	0,81	0,89
6	3,7	5,0	0,45	0,82	0,9
7	3,3	3,3	0,55	0,87	0,88
8	5,0	4,9	0,45	0,8	0,87
9	2,2	3,4	0,46	0,83	0,9
10	4,8	3,9	0,43	0,81	0,87
11	2,0	4,8	0,51	0,82	0,88
12	1,9	4,4	0,46	0,84	0,85

**Приклад розрахунку.** Приймаємо наступні умови: вітроустановка з радіусом ротора  $R=2,2$  м та її потужність дорівнює  $P=3$  кВт, з коефіцієнтом використання вітру  $\xi=0,5$ , ККД редуктора –  $\eta_{ред}=0,83$ ; ККД генератора –  $\eta_{ген}=0,9$ .

1. Потужність турбіни складає:

$$P_T = \frac{P}{\eta_{ред} \cdot \eta_{ген}} = \frac{3}{0,83 \cdot 0,9} = 4 \text{ кВт}$$

2. Потужність потоку обчислюється за формулою:

$$P_{II} = \frac{P_T}{\xi} = \frac{4}{0,5} = 8 \text{ кВт}$$

3. Необхідна швидкість вітру:

$$V = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{II}}{\pi \cdot \rho \cdot R^2}} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot 8}{3,14 \cdot 1,225 \cdot 2,2^2}} = 0,95 \text{ м/с}$$



### 3.3 Розрахунок параметрів горизонтальної вітроенергетичної установки

Енергія вітрового потоку, що проходить в одиницю часу через площу, що відкидається лопатями вітроколеса, визначається за формулою:

$$E = \frac{m \cdot \omega^2}{2}, \text{ Bm} \quad (3.4)$$

де  $\omega$  – швидкість вітру, м/с;  
 $m$  – масова витрата повітря, кг/с.

Зі збільшенням висоти вежі вплив природних чи будівельних об'єктів, розташованих на шляху вітрового потоку зменшується, а швидкість вітру, як правило, збільшується. Це збільшення швидкості може бути описано наступною залежністю:

$$\frac{\omega}{\omega_o} = \left( \frac{h_2}{h_1} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

де  $\omega_o$  – швидкість вітру, виміряна на висоті  $h_1$ ;  
 $h_1$  – висота, де відомо значення швидкості вітру, м;  
 $h_2$  – висота вежі ВЕУ, де буде розташовано вітроколесо, м;  
 $\alpha$  – коефіцієнт градієнта (збільшення) швидкості вітру зі збільшенням висоти.

Найменшу допустиму висоту вежі рекомендується вибирати з урахуванням наведених вище міркувань:

$$h_{\min} = h_{об} + l + 10, \text{ м} \quad (3.6)$$

де  $l$  – Довжина лопаті вітроколеса (половина діаметра);  
 $h_{об}$  – висота перешкоди, м.

Величина коефіцієнта  $\alpha$  визначається за табл.5.3 в залежності від висоти об'єктів, розташованих у радіусі 150 м.

Таблиця 3.3 – Рекомендовані значення коефіцієнта  $\alpha$

Опис місцевості у радіусі 150 м	$\alpha$
Ідеально гладка поверхня, наприклад поверхня водойми	0,1
Плоскі пасовища або низькі чагарники заввишки до 2 м	0,2
Дерева, пагорби, будівлі на відстані 120 – 150 м	0,3
Дерева або будівлі розташовані на відстані менше 120 м	0,4
Дерева або будівлі розташовані на відстані менше 50 м	0,5
Дерева або будівлі розташовані на відстані менше 10 м	0,6



Масова витрата повітря через площу, що відкидається лопатями вітроколеса, розраховується за формулою:

$$m = \rho \cdot \omega \cdot F \quad (3.7)$$

де  $\rho$  – щільність повітря,  $\text{кг/м}^3$ ;

$F$  – площа, що відкидається лопатями вітроколеса,  $\text{м}^2$ .

Щільність повітря за експлуатаційних умов визначається за формулою:

$$\rho = \rho_0 \cdot \frac{288 \cdot B}{760 \cdot T} \quad (3.8)$$

де  $\rho_0$  – номінальна щільність повітря,  $\rho_0 = 1,226 \text{ кг/м}^3$ ;

$B$  – барометричний тиск,  $\text{мм.рт.ст}$  (при виконанні розрахунків прийняти  $B = 760 \text{ мм. рт. ст}$ );

$T$  – температура повітря,  $\text{К}$ .

Площа, що відкидається лопатями вітроколеса, розраховується за формулою:

$$F = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot l^2, \text{ м}^2 \quad (3.9)$$

де  $r$  – радіус кола, що відкидається лопатями вітроколеса,  $\text{м}$ . За радіус приймається довжина лопаті вітроколеса  $l$ .

Електрична потужність, що розвивається ВЕУ, розраховується за формулою:

$$N = \eta \cdot \xi \cdot E, \text{ Вт} \quad (3.10)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт використання енергії вітру;

$\eta$  – ККД горизонтальної ВЕУ;

Величина  $\xi$  залежить від швидкості вітру та змінюється від 0,05 до 0,6; при виконанні розрахунку рекомендується прийняти  $\xi = 0,45$ ;

ККД горизонтальної ВЕУ визначається за формулою:

$$\eta = \eta_v \cdot \eta_e \quad (3.11)$$

де  $\eta_v$  – механічний ККД вітроколеса;

$\eta_e$  – електричний ККД ВЕУ.

**Завдання.** Визначити швидкість вітру та потужність горизонтальної вітроенергетичної установки (ВЕУ) при різних значеннях висоти вежі ВЕУ ( $h = 10; 40; 80; 120$  м). Інші вихідні дані вибрати з таблиці 1 відповідно до варіанта, запропонованого викладачем. Побудувати графік залежності потужності горизонтальної ВЕУ від висоти вежі. Розрахувати найменшу допустиму висоту вежі ВЕУ та визначити швидкість вітру та потужність установки при цьому значенні висоти. За результатами розрахунків побудувати графік залежності  $N = f(h)$ .

Для варіантів значення вихідних величин наведено у табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Вихідні дані для розрахунку параметрів горизонтальної вітроенергетичної установки

№	Швидкість вітру на висоті 10 м, м/с.	Температура повітря, °С	Діаметр вітроколеса, м	Механічний ККД вітроколеса	Електричний ККД	Тип найвищої перешкоди	Висота перешкоди, м	Відстань до перешкоди, м
1	12	15	6,0	0,79	0,81	дерево	6	65
2	6	18	4,0	0,75	0,83	будівля	17	20
3	8	12	8,5	0,84	0,89	поверхня води	-	45
4	14	19	7,0	0,85	0,84	пагорб	12	70
5	11	27	9,0	0,88	0,90	будівля	18	40
6	9	21	10,0	0,76	0,88	чагарник	1,2	65
7	10	25	4,5	0,90	0,94	дерево	9	90
8	12	14	11,0	0,80	0,82	чагарник	1,6	100
9	15	28	6,5	0,82	0,78	будівля	20	110
10	13	20	5,5	0,77	0,84	чагарник		95
11	8	22	9,0	0,84	0,93	пагорб	10	55
12	11	15	7,5	0,87	0,79	поверхня води	-	80

**Приклад розрахунку.** Розрахувати швидкість вітру і потужність вітроенергетичної установки (ВЕУ) при значеннях висоти вежі  $h_2 = 10; 30; 43, 60; 100$  метрів. Розрахувати найменшу допустиму висоту вежі ВЕУ і визначити швидкість вітру й потужність установки при цьому значенні висоти. Побудувати графік залежності  $N = f(h_2)$ .

Швидкість вітру на висоті 10 м, м/с.	Температура повітря, °С	Діаметр вітроколеса, м	Механічний ККД вітроколеса	Електричний ККД	Тип найвищої перешкоди	Висота перешкоди, м	Відстань до перешкоди, м
8	23	6,0	0,9	0,9	будівля	30	150



## Розв'язання

Площа, що відкидається лопатями вітроколеса ВЕУ, при довжині лопаті 3 метри:

$$F = 3,14 \cdot 3^2 = 28,26, \text{ м}^2$$

Щільність повітря при робочій температурі повітря 23 °С:

$$\rho = 1,226 \cdot \frac{288 \cdot 760}{760 \cdot (273 + 23)} = 1,193 \text{ кг/м}^3$$

Мінімальна висота вежі ВЕУ, виходячи із загальних положень розрахунку ВЕУ, розраховується з урахуванням висоти найвищої перешкоди в радіусі 150 метрів і діаметра вітроколеса:

$$h_{\min} = 30 + 3 + 10 = 43, \text{ м}$$

Швидкості вітру на різній висоті розраховуються за формулою 5.5. Оскільки найбільш висока перешкода є поодинокую, має висоту понад 2 м і знаходиться на відстані 150 м від ВЕУ, коефіцієнт градієнта швидкості вітру по табл. 5.3 становить 0,3. Тоді:

- при  $h_2=10$  м

$$\frac{\omega}{8} = \left(\frac{10}{10}\right)^{0,3} \quad \omega = 8 \text{ м/с.}$$

- при  $h_2=30$  м

$$\frac{\omega}{8} = \left(\frac{30}{10}\right)^{0,3} \quad \omega = 11,12 \text{ м/с.}$$

- при  $h_2=43$  м

$$\frac{\omega}{8} = \left(\frac{43}{10}\right)^{0,3} \quad \omega = 12,39 \text{ м/с.}$$

- при  $h_2=60$  м

$$\frac{\omega}{8} = \left(\frac{60}{10}\right)^{0,3} \quad \omega = 13,69 \text{ м/с.}$$

- при  $h_2=100$  м

$$\frac{\omega}{8} = \left(\frac{100}{10}\right)^{0,3} \quad \omega = 15,96 \text{ м/с.}$$



Масова витрата повітря через площу, що відкидається лопатями вітроколеса, визначається для кожного значення швидкості вітру:

$$m = 1,193 \cdot 8 \cdot 28,26 = 269,71 \text{ кг/с}$$

$$m = 1,193 \cdot 11,12 \cdot 28,26 = 374,9 \text{ кг/с}$$

$$m = 1,193 \cdot 12,39 \cdot 28,26 = 417,72 \text{ кг/с}$$

$$m = 1,193 \cdot 13,69 \cdot 28,26 = 461,55 \text{ кг/с}$$

$$m = 1,193 \cdot 15,96 \cdot 28,26 = 538,08 \text{ кг/с}$$

Енергія вітрового потоку на різній висоті вітроколеса визначається за формулою

$$E = \frac{269,71 \cdot 8^2}{2} = 8630,72 \text{ Вт}$$

$$E = \frac{374,9 \cdot 11,12^2}{2} = 23179,02 \text{ Вт}$$

$$E = \frac{417,72 \cdot 12,39^2}{2} = 32062,54 \text{ Вт}$$

$$E = \frac{461,55 \cdot 13,69^2}{2} = 43250,95 \text{ Вт}$$

$$E = \frac{538,08 \cdot 15,96^2}{2} = 68530,30 \text{ Вт}$$

ККД установки становитиме:

$$\eta = 0,9 \cdot 0,9 = 0,81$$

Потужність, що розвивається ВЕУ при різній висоті башти:

$$N = 0,81 \cdot 0,45 \cdot 8630,72 = 3145,9 \text{ Вт}$$

$$N = 0,81 \cdot 0,45 \cdot 23179,02 = 8448,75 \text{ Вт}$$

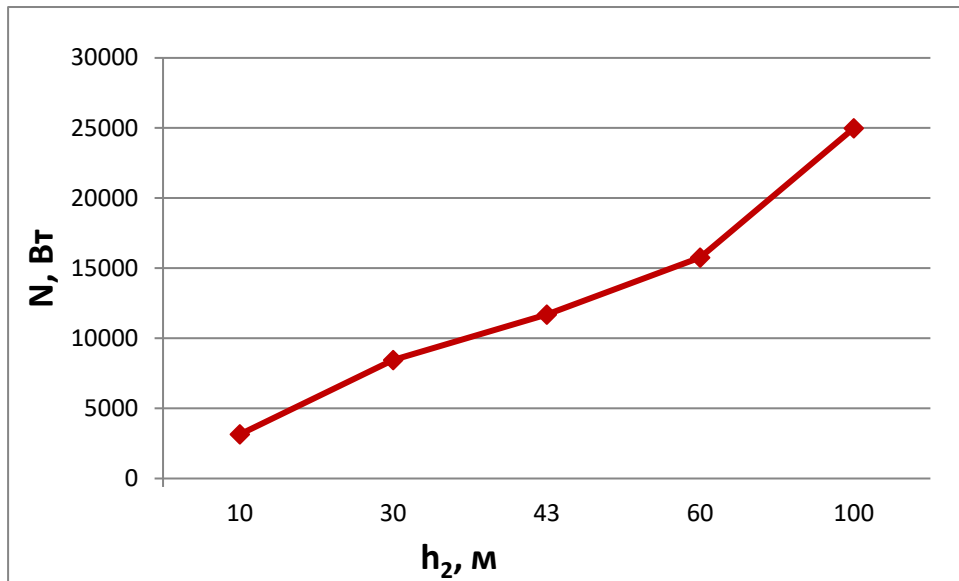
$$N = 0,81 \cdot 0,45 \cdot 32062,54 = 11686,8 \text{ Вт}$$

$$N = 0,81 \cdot 0,45 \cdot 43250,95 = 15764,97 \text{ Вт}$$

$$N = 0,81 \cdot 0,45 \cdot 68530,3 = 24979,29 \text{ Вт}$$



Будуємо графік залежності  $N = f(h_2)$



**Висновок:** Потужність вітроенергетичної установки зростає зі збільшенням висоти вежі. Потужність установки при мінімальній висоті вежі (43 метри) становитиме  $N = 11686,8 \text{ Вт} = 11,7 \text{ кВт}$ .

#### ЛІТЕРАТУРА:

1 Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / В. В. Клименко та ін. ; ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2023. 268 с.

2 Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч. посібник / Дмитро Дудюк, Святослав Мазепа, Ярослав Гнатишин. Львів : Магнолія 2011. 187 с.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА 4. ГЕОТЕРМАЛЬНА ЕНЕРГЕТИКА

**МЕТА:** ознайомитись з основними напрямками використання геотермальних вод, навчитись розраховувати витрату геотермальної води зі свердловини на опалення та гаряче водопостачання.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

Тепловий режим поверхневих шарів землі (до глибини приблизно 40 м) схильний до добових і сезонних коливань. Зі збільшенням глибини діапазон коливань температури зменшується і вона стає більш стабільною. Теплову енергію земної кори найбільш доцільно використовувати в місцях, де мають місце геотермальні водоносні горизонти.

Найбільш ефективні способи використання геотермальних вод – гаряче й технічне водопостачання (температура води 50-70°C), опалення (70-115 °C), електроенергетика (150-200°C). Найбільш раціонально використовувати геотермальні води в наступній послідовності: електроенергетика – опалення – гаряче водопостачання (ГВП). Якщо температура води менш ніж 120°C, то область її використання – тільки система опалення та ГВП.

Можливість застосування геотермальних вод визначаються їх складом і характеристиками водоносних джерел.

За **хімічним складом** геотермальні води поділяють на:

- гідрокарбонатно-натрієві;
- сульфатно-натрієві;
- хлормагнієві;
- хлоркальцієві.

За **газовим складом** геотермальні води поділяють на:

- 1) агресивні (містять діоксид вуглецю та сірководень);
- 2) нейтральні (азотні та метанові).

За **ступенем мінералізації** геотермальні води поділяють на:

- 1) прісні (солевміст менш ніж 1 г/л);
- 2) солонуваті (солевміст 1 – 10 г/л);
- 3) солоні (солевміст 10 – 50 г/л);
- 4) розсоли ( солевміст понад 50 г/л).

Для запобігання відкладення солей при використанні геотермальних вод у системах гарячого водопостачання та опалення до води додають гексаметафосфат натрію (1-3 мг/л).

За ступенем водовіддачі розрізняють свердловини:

- 1) малodeбітні – до 0,005 м<sup>3</sup>/с;
- 2) середньodeбітні – 0,005-0,02 м<sup>3</sup>/с;
- 3) високодебітні – понад 0,02 м<sup>3</sup>/с.

Найбільшого поширення набула відкрита схема використання геотермальних вод з температурою 70 - 120 °С (рис. 4.1).

**Завдання.** Визначити витрату геотермальної води зі свердловини на опалення та гаряче водопостачання котеджного селища. Зробити висновок про клас свердловини за ступенем водовіддачі.

Вихідні дані для розрахунку наведено в таблиці 4.1.

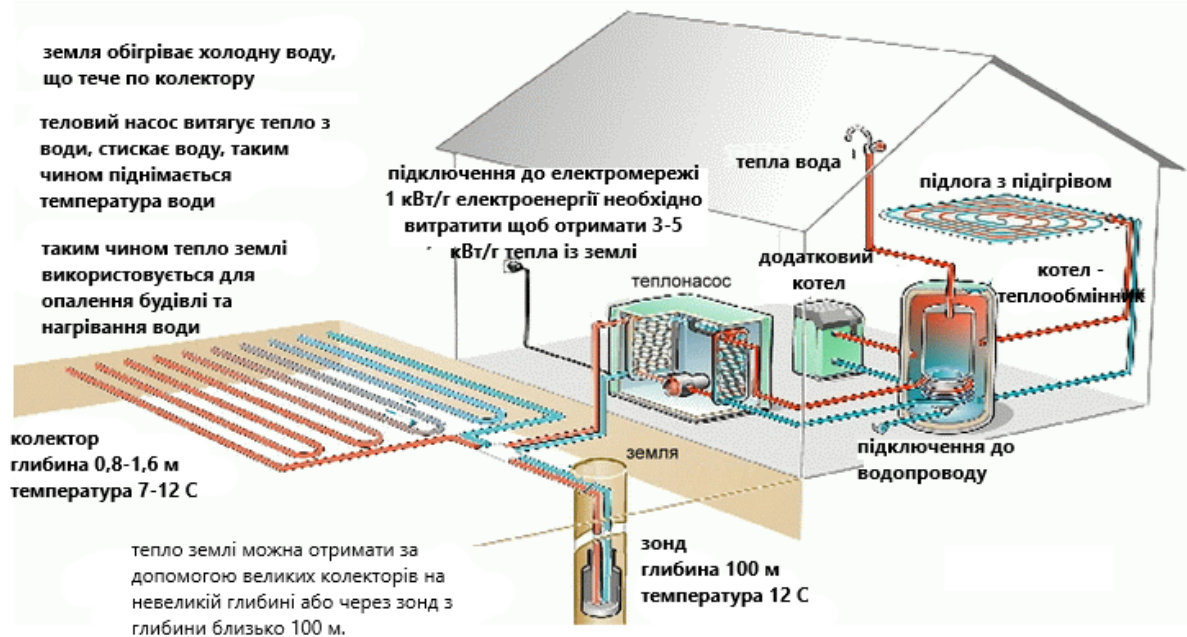


Рисунок 4.1 – Схема опалення та гарячого водопостачання будинку

Таблиця 4.1 – Вихідні дані для розрахунку

№	Кількість житлових будинків	Площа одного житлового будинку, м <sup>2</sup>	Кількість мешканців, чол	Кількість громадських будинків	Площа однієї громадської будівлі, м <sup>2</sup>	ККД установки	Температура геотермальної води, °С	Температура води на виході з установки, °С
1	298	44	984	2	102	0,73	81	56
2	354	51	1069	4	88	0,90	98	52
3	412	67	1360	2	97	0,76	83	45
4	469	71	1600	4	92	0,89	93	51
5	512	38	1650	6	104	0,85	90	50
6	347	94	1000	4	96	0,79	97	45
7	369	74	1021	3	95	0,74	94	47
8	258	58	900	5	102	0,77	84	46
9	147	69	564	2	94	0,88	99	54



10	159	47	540	5	89	0,80	91	48
11	489	58	1460	3	93	0,75	87	55
12	789	96	2105	6	96	0,84	82	49

Визначення теплового навантаження на геотермальну установку, що забезпечує теплом і гарячою водою селище, пов'язано з визначенням необхідної теплової потужності джерела тепlopостачання.

$$Q^{mp} = A \cdot Q_{on} + B \cdot Q_{ГВС}^{max}, Bm \quad (4.1)$$

де  $Q_{on}$  – теплове навантаження системи опалення, Вт;

$Q_{ГВС}^{max}$  – максимальне теплове навантаження системи ГВП житлових будівель, Вт;

A та B – коефіцієнти, що враховують витрати теплоти в системах опалення та ГВП; при розрахунках приймати  $A = 1,018$ ,  $B = 1,0526$ .

$$Q_{on} = q_o^{ykp} \cdot (F_{ж} + F_o \cdot (1 + K)), Bm \quad (4.2)$$

де  $q_o^{ykp}$  – укрупнений показник максимальної витрати теплоти на опалення 1 м<sup>2</sup> загальної площі будівель, Вт/м<sup>2</sup>. Приймаємо  $q_o^{ykp} = 126$  Вт/м<sup>2</sup>.

$F_{ж}$  – площа житлових будинків, м<sup>2</sup>;

$F_o$  – площа громадських будівель, м<sup>2</sup>;

K – поправочний коефіцієнт, що враховує витрати теплоти на опалення громадських будівель,  $K = 0,25$ .

Для визначення теплового навантаження на ГВП житлових будівель визначають середній та максимальний теплові потоки за формулами:

$$Q_{ГВ}^{cp} = g_{зв}^{ykp} \cdot m, Bm \quad (4.3)$$

де m – кількість жителів, осіб;

$g_{зв}^{ykp}$  – укрупнена теплова витрата на забезпечення гарячою водою одного жителя, Вт/чол. Приймаємо  $g_{зв}^{ykp} = 320$  Вт/чол.

$$Q_{ГВ}^{max} = 2,4 \cdot Q_{ГВ}^{cp}, Bm \quad (4.4)$$

де 2,4 – коефіцієнт максимального теплового навантаження.

Визначення витрати гарячої води з геотермальних свердловин на опалення та ГВП проводиться за формулою:



$$G_{ГВС} = \frac{Q^{mp}}{\eta \cdot C \cdot \Delta T}, \text{ кг / с} \quad (4.5)$$

$Q^{mp}$  – теплова потужність джерела теплопостачання, кВт;

$\eta$  – ККД геотермальної установки, частка від 1;

$C$  – питома теплоємність води, кДж/кг·К;  $C=4,19$  кДж/кг·К

$\Delta T$  – перепад температур геотермальної води на вході в систему та на виході з неї, К.

Об'ємна витрата води зі свердловини визначається за формулою:

$$V_{ГВ} = \frac{G_{ГВС}}{\rho}, \text{ м}^3 / \text{с} \quad (4.6)$$

де  $\rho$  – щільність геотермальної води (за довідковою літературою).

**Приклад розрахунку.** Визначити витрату геотермальної води зі свердловини на опалення та гаряче водопостачання котеджного селища. Зробити висновок про клас свердловини за ступенем водовіддачі.

**Вихідні дані:** Кількість мешканців – 1890 осіб; Кількість житлових будинків – 680;

Площа житлового будинку – 45 м<sup>2</sup>; Кількість громадських будівель – 4;

Площа однієї громадської будівлі – 91 м<sup>2</sup>; ККД геотермальної установки –

0,80; Температура води, що надходить з геотермального джерела – 98 °С;

Температура води на виході з системи – 51 °С.

#### Розв'язання

1. Загальна площа житлових будівель складає:

$$F_{ж} = 680 \cdot 45 = 30600 \text{ м}^2$$

2. Загальна площа громадських будівель складає:


$$F_o = 4 \cdot 91 = 364 \text{ м}^2$$

3. Теплове навантаження на опалення житлових та громадських будівель:

$$Q_{on} = 126 \cdot (30600 + 364 \cdot (1 + 0,25)) = 3912930 \text{ Вт} = 3912,93 \text{ кВт}$$

4. Середнє теплове навантаження на гаряче водопостачання житлових будівель:

$$Q_{ГВ}^{cp} = 320 \cdot 1890 = 604800 \text{ Вт} = 604,8 \text{ кВт}$$



5. Максимальне теплове навантаження на гаряче водопостачання житлових будівель з урахуванням підвищуючого коефіцієнта:

$$Q_{ГВ}^{\max} = 2,4 \cdot 604,8 = 1451,52 \text{ кВт}$$

6. Необхідна теплова потужність джерела тепlopостачання:

$$Q^{mp} = 1,018 \cdot 3912,93 + 1,0526 \cdot 1451,52 = 5511,23 \text{ кВт}$$

7. Витрата води з геотермальної свердловини на опалення та гаряче водопостачання:

$$G_{ГВС} = \frac{5511,23}{0,8 \cdot 4,19 \cdot (98 - 51)} = 34,98 \text{ кг / с}$$

8. Щільність води за температури 98 °С становить 960 кг/м<sup>3</sup> [4], тому об'ємна витрата води зі свердловини становить:

$$V_{ГВ} = \frac{34,98}{960} = 0,0364 \text{ м}^3 / \text{с}$$

**Висновок:** оскільки  $V_{ГВ} = 0,0364 \text{ м}^3/\text{с}$ , то свердловину можна віднести за класом водовіддачі до високодебітних.

#### **ЛІТЕРАТУРА:**

3 Кудря С.О. Відновлювані джерела енергії. За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

4 Варламов Г.Б., Любчик Г.М., Маляренко В.А. Теплоенергетичні установки та екологічні аспекти виробництва енергії. К.: ІВЦ "Видавництво "Політехніка", 2019. 232 с.

## ПРАКТИЧНА РОБОТА 5. БІОЕНЕРГЕТИКА

**МЕТА:** ознайомитись з основними поняттями біоенергетики, навчитись розраховувати параметри біогазової установки.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

Біогаз – газоподібний продукт, який отримується в результаті анаеробної ферментації (зброджування) органічних речовин різного походження. Біогаз являє собою суміш метану  $\text{CH}_4$  – 55-70 %; вуглекислого газу  $\text{CO}_2$  – 28-43 %; сірководню  $\text{H}_2\text{S}$  – до 0,1 %, а також інших супутніх газів: толуолу, аміаку, ксилолу, формальдегіду, оксиду вуглецю, оксидів азоту та інших. Біогаз є альтернативою традиційним видам органічного палива та може бути використаний для отримання теплової та електричної енергії.

Біогаз можна отримати з сільськогосподарських відходів, відходів тваринництва, птахівництва (гній, послід, підстилка), при цьому вихід біогазу може досягати  $600 \text{ м}^3/\text{т}$ .

Біогазові реактори називаються метантенками. Реактор являє собою ємність, в яку завантажують відходи. Ємність часто розділяють на секції перегородками, для поділу стадій процесу. Принципова схема біогазової системи представлена на рисунку 5.1.

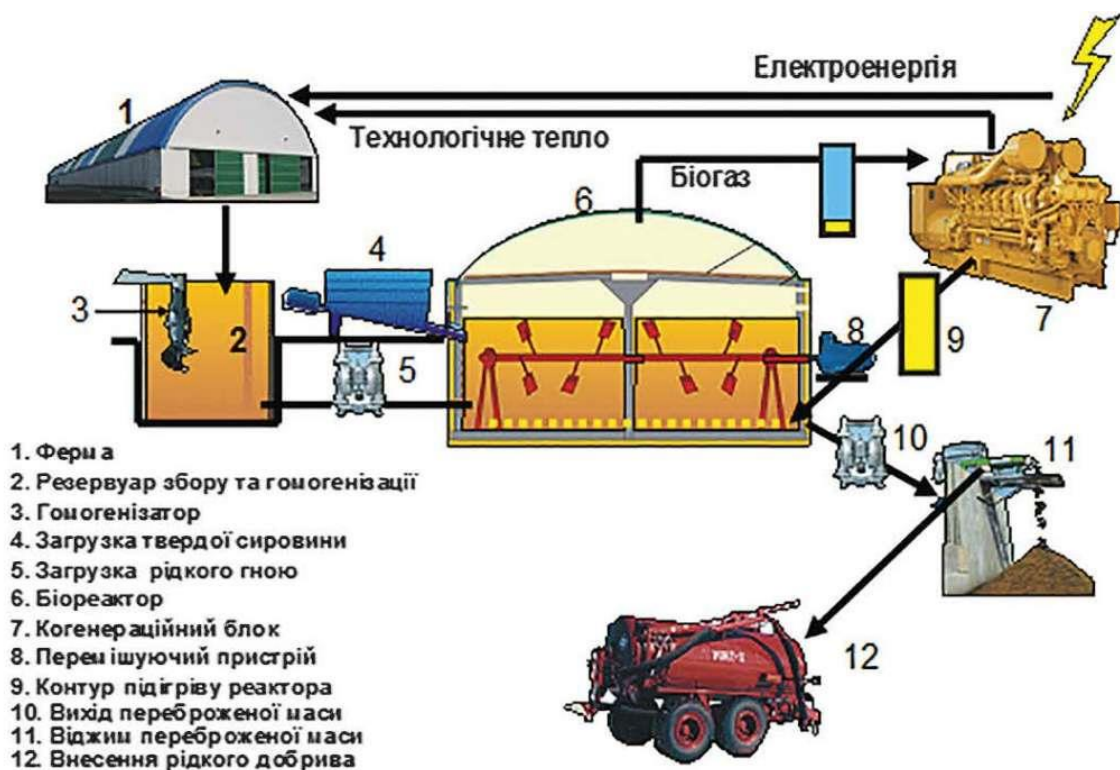


Рисунок 5.1 – Принципова схема біогазової системи

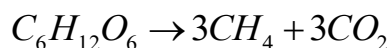
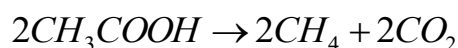
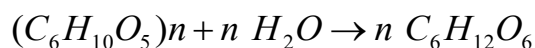
Анаеробне зброджування біомаси відбувається в кілька стадій:

1) гідроліз – складні біополімерні молекули (білки, жири, целюлоза) розщеплюються до більш простих – пептидів, жирних кислот, олігосахаридів;

2) ферментація (кислотна фаза) – мономери руйнуються до органічних кислот (оцтової, мурашиної, молочної та ін.), спиртів, газів (водень, діоксид вуглецю, сірководень, аміак), амінокислот та ін. Процес здійснюють сапрофітні анаеробні бактерії в кислому середовищі рН = 4,5-7;

3) метанова фаза – речовини розкладаються до метану, вуглекислого газу, азоту і водню бактеріями, що утворюють метан (строго анаеробними). Фаза вважається лужною (рН = 6-8). Для бактерій, що утворюють метан, оптимальний діапазон температур – 30-35 °С – мезофільне бродіння; 50-5 °С-термофільне бродіння.

Процес зброджування починається з гідролізу клітковини й подальшого зброджування продуктів її гідролізу:



В процесі зброджування 90 % органічних речовин перетворюються в метан і вуглекислий газ. Для біогазових установок безперервної дії тривалість повного зброджування складає 20 – 22 дні. Реакція є екзотермічної (виділяється 1,5 МДж/кг сух. маси), але теплоти, що виділяється недостатньо для підтримання в реакторі необхідної температури. У зв'язку з цим необхідно здійснювати додатковий обігрів метантенка. Крім того, метантенки оснащуються мішалками, обладнанням для подачі поживних речовин, засобами контролю та управління процесом.

Питомий добовий вихід метану ( $m^3/m^3 \cdot \text{сут.}$ ) визначається за формулою:

$$l_{CH_4} = \frac{B \cdot S}{O} \cdot \frac{1 - K}{O \cdot \mu_{\max} + K - 1} \quad (5.1)$$

де В – граничний вихід метану з 1 кг органічної речовини за добу ( $m^3/kg \cdot \text{добу}$ );

S – концентрація органічної речовини на виході,  $kg/m^3$ ;

O – час повного обміну рідини в реакторі (мінімальний термін витримки гною – 12 діб);



$K$  – кінетичний коефіцієнт;

$\mu_{\max}$  – максимальна швидкість росту мікроорганізмів, доба<sup>-1</sup>.

Концентрація органічної речовини на виході визначається за формулою:

$$S = \frac{G_{\text{сух}} \cdot S_0}{W_{\delta}} \quad (5.2)$$

де  $G_{\text{сух}}$  – добовий вихід сухих речовин, кг/добу;

$S_0$  – вміст органічної речовини;

$W_{\delta}$  – добовий обсяг біомаси, м<sup>3</sup>/доб.

Добовий вихід сухих речовин (кг/добу) визначається за формулою:

$$G_{\text{сух}} = C_{\text{сух}} \cdot G_{\delta} \quad (5.3)$$

де  $G_{\delta}$  – добова кількість біомаси, що надходить на перероблювання, кг/добу;

$C_{\text{сух}}$  – вміст у біомасі сухої речовини.

Добовий обсяг біомаси визначається за формулою:

$$W_{\delta} = \frac{G_{\delta}}{\rho_{\delta}}, \text{ м}^3 / \text{доб} \quad (5.4)$$

де  $\rho_{\delta}$  – щільність біомаси (гною), кг/м<sup>3</sup>.

Величина кінетичного коефіцієнта залежить від типу зброджуваної біомаса:

- для гною великої рогатої худоби (ВРХ)  $K = 0,8 + 0,0016 \cdot e^{0,06 \cdot S}$ ;

- для свинячого гною  $K = 0,5 + 0,0043 \cdot e^{0,091 \cdot S}$ ;

Максимальна швидкість росту мікроорганізмів залежить від температури протікання процесу зброджування:

$$\mu_{\max} = 0,013 \cdot t - 0,129, \text{ доб}^{-1} \quad (5.5)$$

де  $t$  – температура процесу анаеробного зброджування, °С.

Мінімальний обсяг реактора:

$$V_{\min} = W_{\delta} \cdot O, \text{ м}^3 \quad (5.6)$$

Добовий вихід метану (м<sup>3</sup>/добу) визначається за формулою:

$$L_{\text{CH}_4} = \frac{l_{\text{CH}_4} \cdot V_{\min}}{k} \quad (5.7)$$



де  $k$  – коефіцієнт заповнення реактора,  $k = 0,9$ .

Добовий вихід біогазу ( $\text{м}^3/\text{добу}$ ) з реактора визначається за формулою:

$$L_{BG} = \frac{L_{CH_4}}{C_{CH_4}} \quad (5.8)$$

де  $C_{CH_4}$  – концентрація метану в біогазі.

Кількість теплоти (МДж/добу), яке виділиться при спалюванні біогазу за добу:

$$Q_{доб} = L_{BG} \cdot Q_{BG}^H \quad (5.9)$$

де  $Q_{BG}^H$  – нижча теплота згоряння біогазу, МДж/ $\text{м}^3$ .

Обсяг рідкої маси, що проходить через біогазогенератор щодоби:

$$V_j = \frac{m}{\rho}, \text{ м}^3 \quad (5.10)$$

де  $m$  – маса сухого матеріалу в гної тварин за добу;  $m=0,2$  кг/добу;

$\rho$  – вміст сухого матеріалу в  $1 \text{ м}^3$  рідини;  $\rho = 50$  кг/ $\text{м}^3$ .

Обсяг біогазогенератора:

$$V_G = V_j \cdot t, \text{ м}^3 \quad (5.11)$$

де  $t$  – час циклу зброджування, доб.

Маса сухого матеріалу в повному біогазогенераторі:

$$G_c = m \cdot t \cdot 1000, \text{ кг} \quad (5.12)$$

Обсяг біогазу, що виділяється біогазогенератором за добу:

$$V_B = G_c \cdot C_B, \text{ м}^3 / \text{доб} \quad (5.13)$$

де  $C_B$  – вихід біогазу з  $1$  кг сухого матеріалу на добу,  $\text{м}^3 \cdot \text{кг}/\text{добу}$ .

Річне вироблення електроенергії при використанні біогазу в двигун-генераторній установці:

$$W = V_B \cdot \eta \cdot c \cdot 365, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.14)$$



де  $\eta$  – ККД установки, %;

$c$  – сумарна теплотворна здатність біогазу (50% – метан і 50% – вуглекислий газ);  $c = 5,5$  МДж/м<sup>3</sup>.

Номінальна потужність двигун-генератора:

$$P_H = \frac{K_3 \cdot W}{365 \cdot 24}, \text{ кВт} \quad (5.15)$$

де  $K_3$  – коефіцієнт запасу;  $K_3 = 1$

Витрата електроенергії на підігрів маси в біогазогенераторі в холодну пору року (365/2 доби):

$$W_1 = m \cdot C \cdot \Delta T = \frac{\rho \cdot V_j \cdot C \cdot \Delta T \cdot 365}{860 \cdot 2}, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.16)$$

де  $\rho$  – щільність маси;  $\rho = 900$  кг/м<sup>3</sup>;

$C$  – теплоємність маси 1 ккал/кг·°С;

$\Delta T$  – підігрів маси від 5 до 20°С; 1кВт·год = 1 ккал/860.

Витрата електроенергії на рік двигунами насосів і мішалок біогазогенератора:

$$W_2 = P_{уст} \cdot K_{вик} \cdot 8760, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.17)$$

де  $P_{уст}$  – встановлена потужність обладнання, кВт; для розрахунків приймаємо 20 кВт;

$K_{вик}$  – коефіцієнт використання;  $K_{вик} = 0,1$ .

Річна економія електроенергії:

$$\Delta W = W - W_1 - W_2, \text{ кВт} \cdot \text{год} \quad (5.18)$$

Капітальні витрати на установку:

$$K = P_H \cdot Z_{пит}, \text{ млн.грн} \quad (5.19)$$

де  $Z_{пит}$  – питомі витрати, млн.грн.

Річний економічний ефект без урахування додаткових експлуатаційних витрат:

$$E = \Delta W \cdot b, \text{ млн.грн} \quad (5.20)$$

де  $b$  – тариф на електроенергію для виробничих споживачів, грн.

Термін окупності без урахування додаткових експлуатаційних



витрат:

$$T_0 = \frac{K}{E}, \text{ млн.грн} \quad (5.21)$$

**Задача.** Визначити, обсяг реактора біогазової установки, добовий вихід біогазу з реактора та добову кількість теплоти, яку може бути отримано від його спалювання.

Вихідні дані для розрахунків наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Вихідні дані для розрахунку

Варіант	Тип біомаси	Кількість біомаси, що надходить на переробку, т/добу	Щільність біомаси, гною, кг/м <sup>3</sup>	Вид сховища	Температура процесу анаеробного зброджування, °С
1	гній ВРХ	69,74	1035	бетонне	37
2	коров'ячий гній	66,06	1053	земляне	36
3	свинячий гній	44,97	1029	земляне	33
4	гній ВРХ	53,52	1033	бетонне	32
5	свинячий гній	25,63	1037	земляне	35
6	гній ВРХ	36,15	1024	бетонне	34
7	коров'ячий гній	29,55	1026	земляне	33
8	свинячий гній	63,12	1010	бетонне	35
9	гній ВРХ	54,84	1035	земляне	35
10	коров'ячий гній	42,37	1050	земляне	33
11	свинячий гній	24,68	1024	бетонне	32
12	гній ВРХ	35,67	1024	земляне	34

При розрахунку прийняти:

- 1) Вміст органічної речовини у гною – 7 %;
- 2) Вміст сухої речовини – 11%;
- 3) Концентрація метану в біогазі – 60%;
- 4) Граничний вихід метану з 1 кг органічної речовини за добу, м<sup>3</sup>/кг·доб:
  - гній великої рогатої худоби (ВРХ) (бетонне гноєсховище) – 0,35;
  - гній ВРХ (земляне гноєсховище) – 0,08;
  - коров'ячий гній – 0,25;
  - свинячий гній – 0,55;
- 5) Нижча теплота згоряння біогазу – 23 МДж/м<sup>3</sup>.



**Приклад розрахунку задачі** . Визначити, обсяг реактора біогазової установки, добовий вихід біогазу з реактора та добову кількість теплоти, яка може бути отримано від його спалювання, якщо:

- тип біомаси – ВРХ;
- кількість біомаси, що надходить на переробку – 59,34 т/добу;
- щільність біомаси, гною – 1025 кг/м<sup>3</sup>;
- вид сховища – бетонне сховище;
- температура процесу анаеробного зброджування – 33°C;
- вміст органічної речовини у гною – 7 %;
- вміст сухої речовини – 11%;
- концентрація метану в біогазі – 60%;
- граничний вихід метану з 1 кг органічної речовини за добу – 0,35 м<sup>3</sup>/кг·доб;
- нижча теплота згоряння біогазу – 23 МДж/м<sup>3</sup>.

### Розв'язання

1) Мінімальний обсяг реактора:

$$V_{\min} = W_{\bar{o}} \cdot O, \text{ м}^3$$

Добовий обсяг біомаси визначається за формулою:

$$W_{\bar{o}} = \frac{G_{\bar{o}}}{\rho_{\bar{o}}}, \text{ м}^3 / \text{доб}$$

$$W_{\bar{o}} = \frac{59340}{1025} = 57,89 \text{ м}^3 / \text{доб}$$

$$V_{\min} = 57,89 \cdot 12 = 694,68 \text{ м}^3$$

2) Добовий вихід біогазу (м<sup>3</sup>/добу) з реактора визначається за формулою:

$$L_{\text{БГ}} = \frac{L_{\text{CH}_4}}{C_{\text{CH}_4}}$$

$$L_{\text{CH}_4} = \frac{l_{\text{CH}_4} \cdot V_{\min}}{k}$$

$$l_{\text{CH}_4} = \frac{B \cdot S}{O} \cdot \frac{1 - K}{O \cdot \mu_{\max} + K - 1}$$

$$K = 0,8 + 0,0016 \cdot e^{0,06 \cdot S}$$



$$S = \frac{G_{\text{сyx}} \cdot S_o}{W_o}$$

$$G_{\text{сyx}} = C_{\text{сyx}} \cdot G_o$$

$$G_{\text{сyx}} = 0,11 \cdot 59340 = 6527,4 \text{ кг/добу}$$

$$S = \frac{6527,4 \cdot 0,07}{57,89} = 7,89$$

$$K = 0,8 + 0,0016 \cdot e^{0,06 \cdot 7,89} = 0,8$$

$$\mu_{\text{max}} = 0,013 \cdot t - 0,129, \text{ доб}^{-1}$$

$$\mu_{\text{max}} = 0,013 \cdot 33 - 0,129 = 0,3 \text{ доб}^{-1}$$

$$l_{\text{CH}_4} = \frac{0,35 \cdot 7,89}{12} \cdot \frac{1 - 0,8}{12 \cdot 0,3 + (0,8 - 1)} = 0,0135$$

$$L_{\text{CH}_4} = \frac{0,0135 \cdot 694,68}{0,9} = 10,42 \text{ м}^3/\text{добу}$$

$$L_{\text{БГ}} = \frac{10,42}{0,6} = 17,37 \text{ м}^3/\text{доб}$$

3) Кількість теплоти (МДж/добу), яке виділиться при спалюванні біогазу за добу:

$$Q_{\text{доб}} = L_{\text{БГ}} \cdot Q_{\text{БГ}}^H$$

$$Q_{\text{доб}} = 17,37 \cdot 23 = 399,51 \text{ МДж} / \text{доб}$$

**Відповідь:** мінімальний обсяг реактора – 694,68 м<sup>3</sup>, добовий вихід біогазу з реактора – 17,37 м<sup>3</sup>/доб; добова кількість теплоти – 399,51 МДж/доб.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1 Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами і графіками) Харківський національний університет ім. В.Н. Каразіна. 2013. 52 с.

2 Нетрадиційна енергетика: основи теорії та задачі : навч. посібник / Дмитро Дудюк, Святослав Мазепа, Ярослав Гнатишин. Львів : Магнолія 2011. 187 с.



## ПРАКТИЧНА РОБОТА 6. ЕКОЛОГІЧНІ ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ АЛЬТЕРНАТИВНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ

**МЕТА:** ознайомитися з екологічними наслідками використання різних видів альтернативних джерел енергії.

### ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ:

У комплексі наявних екологічних проблем енергетика займає одне з провідних місць. У зв'язку з інтенсивним залученням відновлюваних джерел енергії в практичне використання особлива увага приділяється екологічному аспекту, а саме – їх впливу на навколишнє середовище.

Існує думка, що вироблення електроенергії за рахунок відновлюваних джерел являє собою абсолютно екологічно "чистий" варіант. Це не зовсім вірно, оскільки ці джерела енергії мають принципово інший спектр впливу на навколишнє середовище в порівнянні з традиційними енергоустановками на органічному, мінеральному та гідравлічному паливі, причому в деяких випадках впливи останніх становлять навіть меншу небезпеку. До того ж певні види екологічного впливу альтернативних джерел на навколишнє середовище не з'ясовані до теперішнього часу, особливо в тимчасовому аспекті.

Перетворення енергії нетрадиційних поновлюваних джерел у найбільш придатні форми її використання – електроенергія або тепло – на рівні сучасних знань і технологій обходиться досить дорого. Однак у всіх випадках їх використання призводить до еквівалентного зниженню витрат органічного палива та меншому забрудненню навколишнього середовища.

### Екологічні наслідки використання сонячної енергетики

Сонячні станції є ще недостатньо вивченими об'єктами, тому віднесення їх до екологічно чистих електростанцій не можна назвати повністю обґрунтованим. У кращому випадку, до екологічно чистої можна віднести кінцеву стадію – стадію експлуатації СЕС.

Несприятливі впливи сонячної енергії на навколишнє середовище можуть проявлятися:

- у відчуженні земельних площ, їх можливої деградації (Питомий показник землеємності СЕС змінюється від 0,001 до 0,006 га/кВт з найбільш ймовірними значеннями 0,003-0,004 га/кВт. Це менше, ніж для ГЕС, але більше, ніж для ТЕС чи АЕС);

- у великій матеріаломісткості;
- у можливості витоку робочих рідин, що містять хлорати та нітриту;
- у небезпеці перегріву й загоряння систем, зараження продуктів токсичними речовинами при використанні сонячних систем у сільському господарстві;



- у зміні теплового балансу, вологості, напрямку вітру в районі розташування станції;
- у затемненні великих територій сонячними концентраторами;
- у впливі на клімат космічних СЕС;
- у створенні перешкод телевізійного та радіозв'язку;
- у передачі енергії на Землю у вигляді мікрохвильового випромінювання, що є небезпечним для живих організмів і людини.

### **Вплив вітроенергетики на природне середовище**

Несприятливі фактори вітроенергетики:

- шумові впливи, поява електро-, радіо- і телевізійних перешкод;
- відчуження земельних площ;
- локальні кліматичні зміни;
- небезпека для мігруючих птахів і комах;
- ландшафтна несумісність, непривабливість, візуальне несприйняття, дискомфорт;
- зміна традиційних морських перевезень, несприятливі впливи на морських тварин.

Фактори впливу ВЕС на природне середовище, а також наслідки цього впливу та основні заходи щодо зниження та усунення негативних проявів наведено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Методи усунення негативного впливу ВЕУ на навколишнє середовище

<b>Фактори впливу</b>	<b>Методи усунення</b>
Вилучення земельних ресурсів, зміна властивостей ґрунтового шару	<ul style="list-style-type: none"><li>- Розміщення ВЕУ на землях, що не використовуються.</li><li>- Оптимізація розміщення – мінімізація витрати землі.</li><li>- Цілеспрямований облік змін властивостей ґрунтового шару.</li></ul>
Акустичний вплив (шумові ефекти)	<ul style="list-style-type: none"><li>- Зміна числа обертів вітроколеса.</li><li>- Зміна форм лопаті вітроколеса.</li><li>- Видалення ВЕУ від об'єктів соціальної інфраструктури.</li><li>- Заміна матеріалів лопатей вітроколеса.</li></ul>
Вплив на ландшафт і його сприйняття	<ul style="list-style-type: none"><li>- Урахування особливостей ландшафту при розміщенні ВЕУ.</li><li>- Рекреаційне використання ВЕУ.</li><li>- Дослідження різних форм опорних конструкцій, забарвлення і т. і.</li></ul>
Електромагнітне випромінювання, вплив на телебачення і радіозв'язок	<ul style="list-style-type: none"><li>- Спорудження ретрансляторів.</li><li>- Заміна матеріалів лопатей ВК.</li><li>- Впровадження спеціальної апаратури в конструкцію ВЕУ.</li></ul>

	- розміщення на відстані від комунікацій
Аварійні ситуації та небезпека поломки і відльоту пошкоджених частин ВК	- Розрахунок ймовірності поломок вітроколеса, траєкторії і дальності відльоту. - Оцінка надійності безаварійної роботи ВЕУ. - Зонування виробництва навколо ВЕУ.
Фактори, що поліпшують екологічну ситуацію	- Зменшення сили вітру. - Зниження вітрової ерозії ґрунтів. - Зменшення вітрів з акваторій водойм і водосховищ.

### **Екологічні наслідки використання геотермальної енергетики**

Основний вплив на навколишнє середовище геотермальні електростанції надають в період розробки родовища, будівництва паропроводів і будівель станцій, але воно зазвичай обмежене районом родовища.

Несприятливі екологічні впливи геотермальної енергетики на екологію:

- відчуження земель;
- зміна рівня ґрунтових вод, осідання ґрунту, заболочування;
- зрушення земної кори, підвищення сейсмічної активності;
- викиди газів (метан, водень, азот, аміак, сірководень);
- викид тепла в атмосферу або у поверхневі водні об'єкти;
- скидання отруєних вод і конденсату, забруднених у невеликих кількостях аміаком, ртуттю, кремнеземом;
- забруднення підземних вод і водоносних шарів, засолення ґрунтів;
- викиди великої кількості розсолів при розриві трубопроводів.

### **Екологічні наслідки використання енергії океану**

Несприятливі екологічні наслідки у гідротермальній енергетиці:


- витік в океан аміаку, фреону, хлору та інших шкідливих речовин;
- виділення CO<sub>2</sub> з води;
- зміна циркуляції вод, поява регіональних і біологічних аномалій під впливом гідродинамічних і теплових коливань;
- зміна клімату.

### **Несприятливі екологічні наслідки в приливній енергетиці:**

- періодичне затоплення прибережних територій, зміна землекористування, флори та фауни акваторії, в районі розміщення ПЕС;
- зниження прозорості води, поверхневі скиди забруднених вод.

### **Несприятливі екологічні наслідки у хвильовій енергетиці:**

- ерозія узбережжя, зміна руху прибережних пісків;
- значна матеріаломісткість;
- зміна сформованих судноплавних шляхів уздовж берегів;



- забруднення води в процесі будівництва, поверхневі скиди.

### **Екологічні наслідки використання біоенергетичних установок**

Біоенергетичні станції у порівнянні з традиційними електростанціями та іншими станціями, що використовують альтернативні джерела енергії, є найбільш екологічно безпечними. Вони сприяють позбавленню навколишнього середовища від забруднення всілякими відходами. Так, наприклад, анаеробна ферментація – ефективний засіб не тільки використання відходів тваринництва, а й забезпечення екологічної чистоти, оскільки тверді органічні речовини втрачають запах і стають менш привабливими для гризунів і комах (у процесі перегнивання руйнуються хвороботворні мікроорганізми). Крім того, утворюється додатковий корм для худоби (протеїн) і добрива.

Міські стоки й тверді відходи, відходи при вирубці лісу і деревообробної промисловості, є джерелами сильного забруднення природного середовища, у той же час, вони є сировиною для отримання енергії, добрив, цінних хімічних речовин. Тому широкий розвиток біоенергетики сприятливо впливає на стан навколишнього середовища.

Однак, енергетичне використання біомаси все-таки завдає шкоди довкіллю.

Пряме спалювання деревини дає велику кількість твердих частинок, органічних компонентів, окису вуглецю та інших газів. У концентрації деяких забруднювачів вони перевершують продукти згоряння нафти та її похідних. Іншим екологічним наслідком спалювання деревини є значні теплові втрати.

У порівнянні з деревиною біогаз – більш чисте паливо, яке не утворює шкідливих газів і частинок. Разом з тим необхідні заходи обережності при виробництві та споживанні біогазу, оскільки метан є вибухонебезпечним. Тому при його зберіганні, транспортуванні та використанні слід здійснювати регулярний контроль для виявлення та ліквідації витоків.

При ферментаційних процесах, по перероблюванні біомаси в етанол, утворюється велика кількість побічних продуктів (промивні води й залишки перегонки), що є серйозним джерелом забруднення середовища, оскільки їх вага у кілька разів (до 10) перевищує вагу етилового спирту.

### **Несприятливі впливи біоенергетики на екологію:**

- викиди твердих частинок, канцерогенних і токсичних речовин, окису вуглецю, біогазу, біоспирту;
- викид тепла, зміна теплового балансу;
- збіднення ґрунтової органіки, виснаження та ерозія ґрунтів;
- вибухонебезпечність;



- велика кількість відходів у вигляді побічних продуктів (промивні води, залишки перегонки).

**Завдання: дайте відповіді на контрольні питання:**

1. Як сонячна енергетика впливає на земельні ресурси?
2. Назвіть несприятливі фактори вітроенергетики.
3. Які методи застосовують для зменшення акустичного впливу ВЕУ на довкілля?
4. Які методи застосовують для зменшення впливу ВЕУ на природні ландшафти?
5. Як використання геотермальної енергії впливає на довкілля?
6. Як використання біоенергетичних установок впливає на довкілля?
7. Несприятливі екологічні наслідки у приливній енергетиці.

**ЛІТЕРАТУРА:**

3 Альтернативні джерела енергії та технології їх використання : підручник / В. В. Клименко та ін. ; ред. В. В. Клименка. Кропивницький : ПП Ексклюзив-Систем, 2023. 268 с.

4 Енергоощадність та альтернативні джерела енергії : навчальний посібник / М. Й. Олійник, В. Г. Лисяк, О. Б. Дудурич. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2020. 184 с.

## ПОДАННЯ НА ПЕРЕВІРКУ ПРАКТИЧНИХ РОБІТ ТА КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ

Контроль за виконанням, поданням на перевірку та захистом завершених практичних робіт з дисципліни «Альтернативні та нетрадиційні джерела енергії» здійснюється через освітню платформу Moodle, де розміщується відповідний модуль для завантаження виконаних завдань. Студенти подають готові роботи у визначені терміни згідно з графіком навчального процесу.

Після надходження робіт викладач упродовж одного тижня проводить їх перевірку, надає зауваження, рекомендації та коментарі щодо покращення змісту й оформлення. Враховуючи отримані рекомендації, студент може внести необхідні виправлення та доопрацювання. Остаточна оцінка виставляється після усунення виявлених недоліків.

Кожна практична робота оцінюється за п'ятибальною шкалою. Під час оцінювання враховуються такі критерії (табл. 1):

- Якість виконання - правильність проведених розрахунків, точність результатів і відповідність методичним вимогам;
- Своєчасність подання - дотримання встановлених строків здачі роботи;
- Оформлення роботи - логічність побудови, структурованість матеріалу та відповідність установленим вимогам;
- Обґрунтованість відповідей - повнота розкриття теми, аргументованість висновків і послідовність викладення матеріалу.

Оцінки за практичні роботи є важливою складовою загальної успішності студента та враховуються під час підсумкового оцінювання з дисципліни «Альтернативні та нетрадиційні джерела енергії».

Таблиця 1 - Критерії оцінювання практичної роботи

Кількість балів	Критерії оцінювання
1	2
0 балів	Робота не виконана
1 бал	Робота виконана поверхово, без розкриття суті завдання. Теоретичні основи не відображені, практичне вирішення задачі відсутнє або некоректне. Завдання виконане частково або містить грубі помилки. Оформлення роботи значно відхиляється від встановлених вимог.
2 бали	Робота свідчить про недостатнє розуміння теоретичних основ і практичних аспектів завдання. Висновки нечіткі або нелогічні. Методи виконання роботи вибрані некоректно,



	завдання виконані неповністю або з серйозними помилками. Оформлення роботи не відповідає вимогам.
3 бали	Робота виконується з опорою на теоретичні основи, але є помітні неточності у формулюванні висновків. Методи виконання роботи частково коректні або застосовані непослідовно. Завдання виконані частково, допускаються помилки. Оформлення роботи містить значні недоліки.
4 бали	Текст роботи демонструє розуміння теоретичних основ і здатність до практичного їх застосування. Висновки сформульовані, але допускаються незначні неточності чи неповнота. Методи виконання роботи здебільшого коректні. Завдання виконані з незначними відхиленнями від вимог. Оформлення роботи відповідає вимогам із дрібними зауваженнями.
5 балів	Текст роботи свідчить про узагальнення і творче осмислення теоретичних основ та практичне вирішення поставлених завдань. Висновки сформульовані чітко, логічно та обґрунтовано. Методи виконання роботи підібрані та застосовані коректно. Завдання виконані у повному обсязі, а оформлення відповідає встановленим вимогам.



Додаток А

**ПРИКЛАД ОФОРМЛЕННЯ ТИТУЛЬНОГО ЛИСТА**  
**ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА»**

**«АЛЬТЕРНАТИВНІ ТА НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ»**

Практична робота № \_\_\_\_\_

Варіант № \_\_

Група \_\_\_\_\_

ПІБ \_\_\_\_\_

Перевірив: \_\_\_\_\_  
(ПІБ викладача)

2026

51



*Навчально-методичне видання*

Марина Ігорівна Таврель

**АЛЬТЕРНАТИВНІ ТА НЕТРАДИЦІЙНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ:**

методичні рекомендації  
до виконання практичних завдань

Самостійне електронне мережеве видання

Публікується в авторській редакції