МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
імені В. Н. КАРАЗІНА

Відновлювальні джерела енергії

Навчально-методичний посібник
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю G3 «Електрична інженерія»
освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи»

Електронний ресурс



Харків – 2026

УДК 621.7(075.8)
В-42

Рецензенти:

Антоненко Н. С. – к. т. н., доцент, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна;

Єгоров О. Б. – к. т. н., доцент, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки ХНУМГ імені О. Бекетова.

Затверджено до розміщення в мережі Інтернет рішенням Науково-методичної ради Харківського національного університету імені В. Н. Каразіна (протокол № 9 від 25 травня 2026 року)

В-42 **Відновлювальні** джерела енергії : навчально-методичний посібник для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за спеціальністю G3 «Електрична інженерія» освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи» [Електронний ресурс] / уклад. К. Ю. Бровко, С. М. Войтенко, Н. Д. Винокурова. – Харків : Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026. – (PDF 77 с.)

Навчально-методичний посібник розроблено відповідно до програми дисципліни «Відновлювальні джерела енергії» як однієї з важливих у циклі підготовки студентів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи». У посібнику розглянуто теоретичні основи та практичні аспекти використання сонячної, вітрової та гідроенергії. Особливу увагу приділено сучасним технологіям перетворення відновлюваних ресурсів на електричну та теплову енергію, питанням енергоефективності, екологічної безпеки та економічної доцільності їх застосування. Матеріали посібника структуровані відповідно до навчальної програми дисципліни. Викладений матеріал сприяє формуванню у здобувачів освіти системного уявлення про роль відновлюваних джерел енергії в сучасній енергетиці та їх значення для сталого розвитку суспільства.

УДК 621.7(075.8)

© Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна, 2026
© Бровко К. Ю., Войтенко С. М., Винокурова Н. Д., укл., 2026

ЗМІСТ

ВСТУП……..….. 5
ТЕМА № 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОНОМНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ…….….. 6
1.1. Поняття та класифікація джерел енергії…….. 6
1.2. Світові запаси і динаміка їх освоєння……..…… 8
Питання до теми №1…… 14
ТЕМА № 2. СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА……..…… 15
2.1. Фізичні основи процесів перетворення сонячної енергії….. 23
2.2. Системи сонячного теплопостачання…….…. 23
2.3. Теплова акумуляція енергії…….…. 28
2.4. Класифікація акумуляторів тепла…… 31
Питання до теми №2…… 38
ТЕМА № 3. ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА…….……..... 39
3.1. Енергія вітру і можливості її використання…… 39
3.2. Класифікація вітродвигунів за принципом роботи……..….. 41
3.3. Теорія ідеального вітряка……..……... 48
Питання до теми №3…… 53
ТЕМА № 4. МАЛА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА…….. 55
4.1 Переваги та недоліки малої гідроенергетики……. 55
4.2 Малі ГЕС…… 56
4.3 Особливості малих ГЕС…… 57
4.4 Переваги та недоліки малих ГЕС……. 59
4.5 Створення напору та основне обладнання ГЕС……. 60
4.6 Енергія та потужність ГЕС……... 64
4.7 Гідроакумулюючі електростанції…… 65
Питання до теми №4…… 67
ТЕМА № 5. ЦЕНТРАЛІЗОВАНА ТА РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ……. 68

5.1. Структура та склад технологій розподіленої генерації енергії……. 69
5.2. Нові умови та тенденції розвитку електроенергетики на базі РГЕ……. 70
5.3. Чинники, що впливають на масштаби використання малої розподіленої генерації…….. 72
5.4. Нові виклики розвитку РДЕ……. 73
5.5. Системне зіставлення технологій розподіленої генерації та їх проникнення на ринок…….. 73
Питання до теми №5…… 75
РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА…… 76

ВСТУП

Навчально-методичний посібник з дисципліни «Відновлювальні джерела енергії» розроблений відповідно до навчального плану та робочої програми і призначений для студентів спеціальності G3 «Електрична інженерія» освітнього рівня «бакалавр». Посібник містить систематизований виклад теоретичних положень та практичних рекомендацій щодо використання альтернативних, відновлюваних і нетрадиційних джерел енергії. Основна увага приділяється сучасним тенденціям розвитку енергетики, актуальності впровадження систем розподіленої генерації в Україні, а також методам оцінювання енергоефективності агрегатів сонячних, вітрових та інших установок нетрадиційної енергетики.

Мета дисципліни: Надання студентам фундаментальних знань і практичних навичок у галузі використання відновлюваних енергоресурсів. Цей курс спрямований на формування розуміння ключових принципів роботи різних видів відновлюваних джерел енергії, таких як сонячна, вітрова, гідроенергетика, біоенергетика та геотермальна енергія. Також, він охоплює питання ефективного використання ресурсів, екологічних та економічних аспектів впровадження цих технологій, а також інтеграції відновлюваних джерел енергії в існуючі енергетичні системи.

Завдання дисципліни

1. Ознайомлення студентів з основними видами відновлюваних джерел енергії, їх фізичними основами, принципами роботи та технічними характеристиками.

2. Розвиток умінь аналізувати ефективність різних видів відновлюваних джерел енергії, а також оцінювати їхню конкурентоспроможність у порівнянні з традиційними джерелами енергії.

3. Формування розуміння екологічних переваг та викликів, пов'язаних із впровадженням відновлюваних джерел енергії, а також їх впливу на довкілля.

4. Вивчення існуючих законодавчих і регуляторних вимог щодо використання відновлюваних джерел енергії на національному та міжнародному рівнях.

5. Набуття навичок проектування та оптимізації систем, що базуються на використанні відновлюваних джерел енергії, з урахуванням економічних, технічних та екологічних факторів.

6. Аналіз сучасних тенденцій та прогнозування розвитку технологій у сфері відновлюваної енергетики, а також розгляд інноваційних підходів до їх використання.

ТЕМА № 1. СТАН ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ АВТОНОМНИХ ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

1.1 Поняття та класифікація джерел енергії

Усі енергетичні ресурси на Землі, що є продуктами безперервної діяльності Сонця, можуть бути поділені на дві основні групи: на акумульовані природою й у більшості випадків невідновлювальні та на неакумульовані, але постійно поновлювані (табл.1.1). До першої групи належать запаси паливних копалин: нафта, кам'яне та буре вугілля, спанні, торф і підземні гази, а також термоядерна і ядерна енергія. До другої групи належать сонячне випромінювання, вітер, потоки рік, морські хвилі та припливи, внутрішнє тепло Землі.

Таблиця 1.1

Потенціальні запаси джерел енергії на Землі

Види енергії	**Запаси енергії**
Невідновлювальні (кВт · год)	
1. Термоядерна енергія	$1\ 00000000 \cdot 10^{12}$
2. Ядерна енергія	$574000 \cdot 10^{12}$
3. Енергія паливних копалин	$55364 \cdot 10^{12}$
Відновлювальні (кВт ·год/рік)	
1. Енергія сонячних променів	$667800 \cdot 10^{12}$
2. Енергія морів і океанів	$70000 \cdot 10^{12}$
3. Енергія вітру	$17369 \cdot 10^{12}$
4. Енергія внутрішнього тепла Землі	$134 \cdot 10^{12}$
5. Енергія річок	$18 \cdot 10^{12}$

Існує багато схем розподілу природних джерел енергії, в основу яких покладені різні принципи.

На рис. 1.1 приведена одна з схем, де виділяються дві основні групи: невідновлювальні і відновлювальні, альтернативні джерела енергії. У свою чергу, невідновлювальні ресурси представлені двома типами - традиційні і нетрадиційні. До першого типу відносяться рідкі і газоподібні вуглеводні, вугілля і високоякісні уранові руди. Серед нетрадиційних природних джерел енергії до деякої міри умовно виділено два види: придатні до освоєння в XXI ст. і перспективні джерела енергії, широке освоєння яких можливе лише в наступному столітті.

Поновлюваними джерелами енергії називаються ресурси енергії, що

постійно циклічно поновлюють енергетичну цінність і можуть бути перетворені на корисну роботу. Іншими словами, відновлювальні джерела енергії поновлюються постійно, без часових обмежень, тоді як використання традиційних палив обмежене наявними запасами.

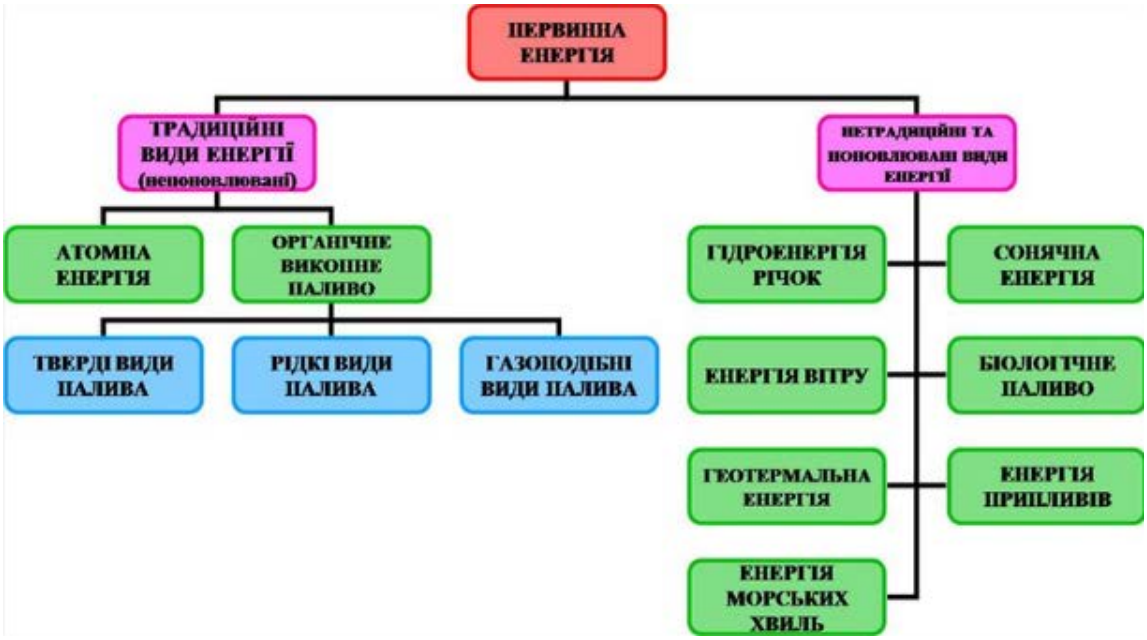

Рис. 1.1. Основні природні джерела енергії

Сонячна діяльність характеризується приблизними показниками, наведеними на рис. 1.2, які загалом утворюють схему теплового балансу Землі.

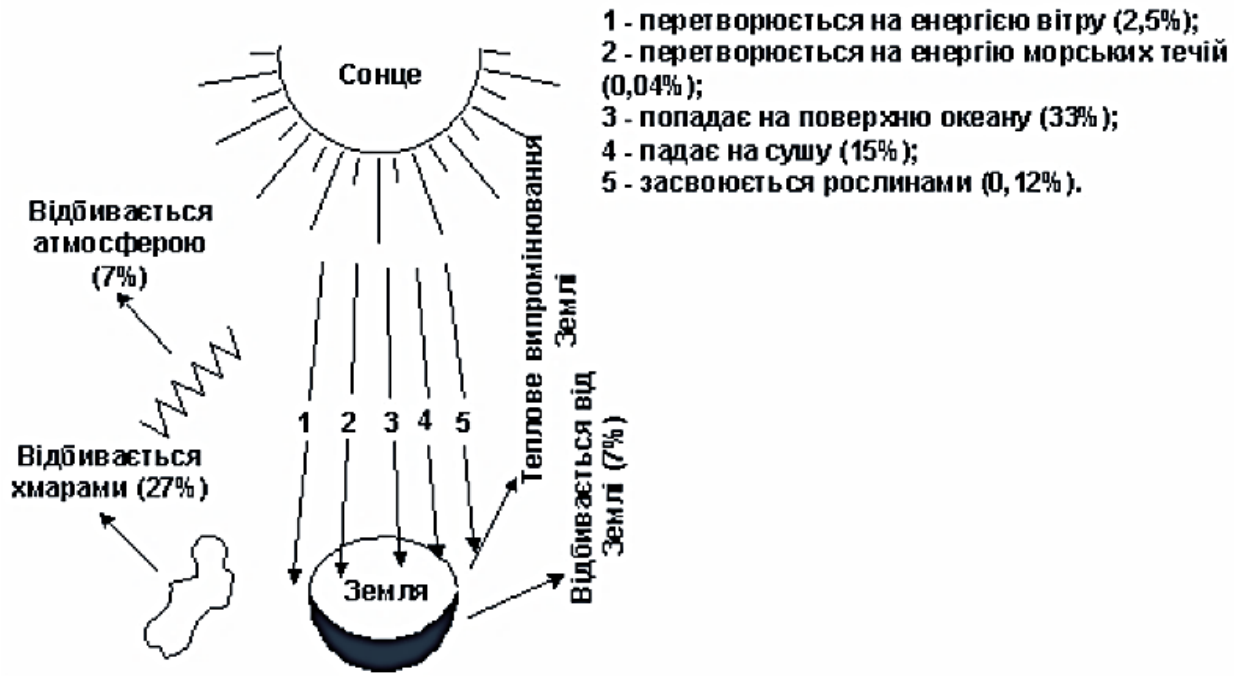

Рис. 1.2. Розподіл променистої енергії сонця

1.2 Світові запаси і динаміка їх освоєння

Нафта.

Накопичена світова здобич нафт за станом на 01.01.10 р. оцінюється в140,0 млрд. т. При цьому дуже важливо, що в останні 5 років (починаючи з 2005 р.) вона стала близькою до 4,0 млрд. т/рік і росте трохи, незважаючи на високий рівень світових цін. При цьому в накопиченій здобичі провідну роль зіграли традиційні нафтовидобувні країни. На долю країн Близького і Середнього Сходу доводиться близько 28%, Північної Америки - 24% і країн СНД - 15%.

Доля 10 країн, що досягли найбільшого рівня витягання нафти з надр, сьогодні, досягає 65% від загальної світової річної її здобичі. Ці ж країни мають і найбільші розвідані доведені запаси нафти. Проте приведені нижче дані (таблиця. 1.2) про їх рівні здобичі і розвідані запаси свідчать про широкий діапазон коливань відношення - розвідані запаси/річна здобич. Це відношення прямо не відбиває забезпеченість ресурсами нафтовидобувної промисловості в літах. Його зменшення найчастіше вказує на недостатній розмах геолого-дослідницьких робіт, зниження якості нафти, вичерпання ресурсів великих родовищ і системні помилки державного управління ресурсним потенціалом надр.

В цілому розвідані доведені світові запаси, включаючи важкі нафти і бітумінозні піщаники Атабаски (Канада), близькі до 200,0 млрд. т. Крім того, не менше 200 млрд. т є в заздалегідь оцінених відомих родовищах і прогнозних геологічних ресурсах в нафтоносних зонах і басейнах, включаючи шельфи Північного Льодовитого океану. При прогнозованому максимальному зростанні рівнів річного нафтовидобутку в 30-40-і роки XXI століття - 4,2-4,5 млрд. т/рік розвідані сьогодні світові запаси нафти іпрогнозні ресурси дозволяють у кінці поточного століття можливість видобутку нафти на рівні 3,5-2,5 млрд. т/рік.

Природні горючі гази.

Накопичений світовий видобуток природного горючого газу (вільного і попутного) оцінюється в 90,0 трлн. $м^3$. При цьому важливо підкреслити, що за останні 20 років видобуток природного газу зріс в 1,7 разу і перевищив в 2009 році 3,0 трлн. $м^3$. На Росію і США, при цьому доводиться майже 40% світової його здобичі. Розвідані доведені запаси природного газу у світі складають близько 190 трлн. $м^3$. Сумарні витягувані світові ресурси газу оцінюються в 460-480 трлн. $м^3$, з яких більше 45% доводиться на Росію, 17- 18% - на Близький і Середній Схід, 6-7% на Африку і 4-5% на Північну Америку.

Таблиця 1.2

Рівень здобичі і розвіданих запасів нафти у світі

Країна	**Здобич (млн.т./рік)**	**Розвідані запаси (млрд.т.)**
Саудівська Аравія	525	36,0
Росія	500	10,0
США	310	<4,0
Іран	210	19,0
Китай	190	2,0
Мексика	180	1,5
Канада	160	>24,0
Венесуела	150	14,0
Кувейт	140	>14,0
ОАЕ	140	>13,0

Намічене збільшення світового видобутку природного газу цілкомзабезпечене його ресурсами до кінця поточного століття. При цьому потрібно мати на увазі, що прогнозні ресурси горючого газу (вільного і попутного) істотно перевищують ресурси нафт. У зв'язку з успішним розвитком газохімічних технологій найближчими роками стане можливим і ефективним отримання з газу (включаючи і попутний нафтовий газ) бензину і інших палив для транспортних засобів за цілком прийнятними цінами. Вирішення цієї проблеми допоможе надійно забезпечити паливом транспортні і інші технічні засоби принаймні до кінця поточного століття.

При істотному зниженні споживання газу для виробництва електроенергії природний газ, поза сумнівом, міг би істотно посилити свою роль в забезпеченні потреб в паливі транспортних засобів і в наступному столітті.

Кам'яне вугілля.

Накопичена здобич кам'яного і бурого вугілля для енергетики, на жаль, може бути оцінена лише за непрямими даними, оскільки системний облік об'ємів їх здобичі був організований лише в післявоєнний період, в другій половині XX століття. За останні 20 років (з 1990 до 2010 рр.) у світі було здобуто більше 1,0 трлн. т кам'яного і бурого вугілля (без тих, що коксуються).

У таблиці. 1.3 приведені основні країни, що видобувають сьогоднівугілля, використовуване в енергетиці.

Таблиця 1.3

Перелік основних країн, що видобувають вугілля,використовуване в енергетиці

Країна	**Здобич**	**Запаси**
Китай	>2,5 млрд. т./ рік	115,0 млрд. т (розвідані)
США	>1,0 млрд. т/рік	130,0 млрд. т (розвідані)
Індія	500 млн. т/рік	5,0 млрд. т (розвідані) >40,0 млрд. т (загальні)
Австралія	400 млн. т/рік	>75,0 млрд. т (розвідані)
Росія	300 млн. т/рік	>200 млрд. т (розвідані)
ЮАР	250 млн. т/рік	30 млрд. т (розвідані)
Німеччина	200 млн. т/рік	>20,0 млрд. т (загальні)

В цілому розвідані підтверджені запаси вугілля у світі перевищують 850,0 млрд. т, при загальних розвіданих запасах 3,6 трлн. т.

Поза сумнівом, що запаси вугілля для забезпечення намічених рівнів виробництва електроенергії цілком достатні не лише на XXI століття, але і на триваліший час. Як добре відомо, розвиток електроенергетики, що базується на використанні вугілля, стримується високим рівнем викидів парникових газів, сильним забрудненням довкілля, а також високими витратами на здобич і транспорт вугілля. Радикальні науково-технічні рішення, що знімають ці проблеми, навіть при успішному залученні альтернативних джерел виробництва електроенергії не знімуть в порядки денні швидке зростання долі вугілля в балансі природних енергетичних джерел в XXI столітті.

Ресурси ядерної енергетики.

З двох можливих природних джерел ядерної енергетики - урану і торія, поки в практичному використанні знаходиться лише уран. В майбутньому можливо буде потрібно і торій.

Сумарні ресурси урану, використані в атомній енергетиці, не можутьоцінюватися по кількості його здобичі з надр. Як відомо, деяка його частина була використана і для інших цілей, зокрема для виробництва зброї. Проте основна частина здобутого урану сьогодні знаходиться в сховищахопроміненого ядерного палива (ОЯП), оскільки ККД використання енергії ув'язненим в урані, на жаль не перевищує 1%. У світі доки використовуються в основному легководні реактори на теплових нейтронах у відкритому паливному циклі, без використання технологій рециклинга ОЯП.

Нові технології сучасного етапу розвитку атомної енергетики іменуються ренесансними і пов'язані з її переведенням на замкнутий паливний цикл з використанням реакторів на швидких нейтронах. Проте цей процес відбувається на тлі прискореного введення в дію легководних реакторів. За даними МАГАТЕ у кінці 2010 р. знаходилося в експлуатації 441 енергетичний реактор, будувалося 60 нових блоків. Вже сьогодні Франція, Литва Словаччина, Бельгія, Швеція і Україна на АЕС виробляють більше половини електроенергії. До 2030 р. настановна потужність АЕС може скласти 1000 ГВт при 370 ГВт в 2010 р.

Світове виробництво урану, почате в середині 40-х років минулого століття не було стабільним. До 1957 р. воно швидко розвивалося і досягло 48,0 тис. т в рік. Потім до 1964 р. впало до 30,0 тис. т/рік. З середини 60-х років динамічно росло і на початок 80-х досягло 68,0 тис. т/рік. Потім на початку 1990-х воно знизилося до 30,0 тис. т/рік і лише останнє 10-річчя стало повільно наростати до 40,0 тис. т/рік.

Як видно на рис. 1.3 добре виявлено два "піки" максимального зльоту виробництва первинного урану.

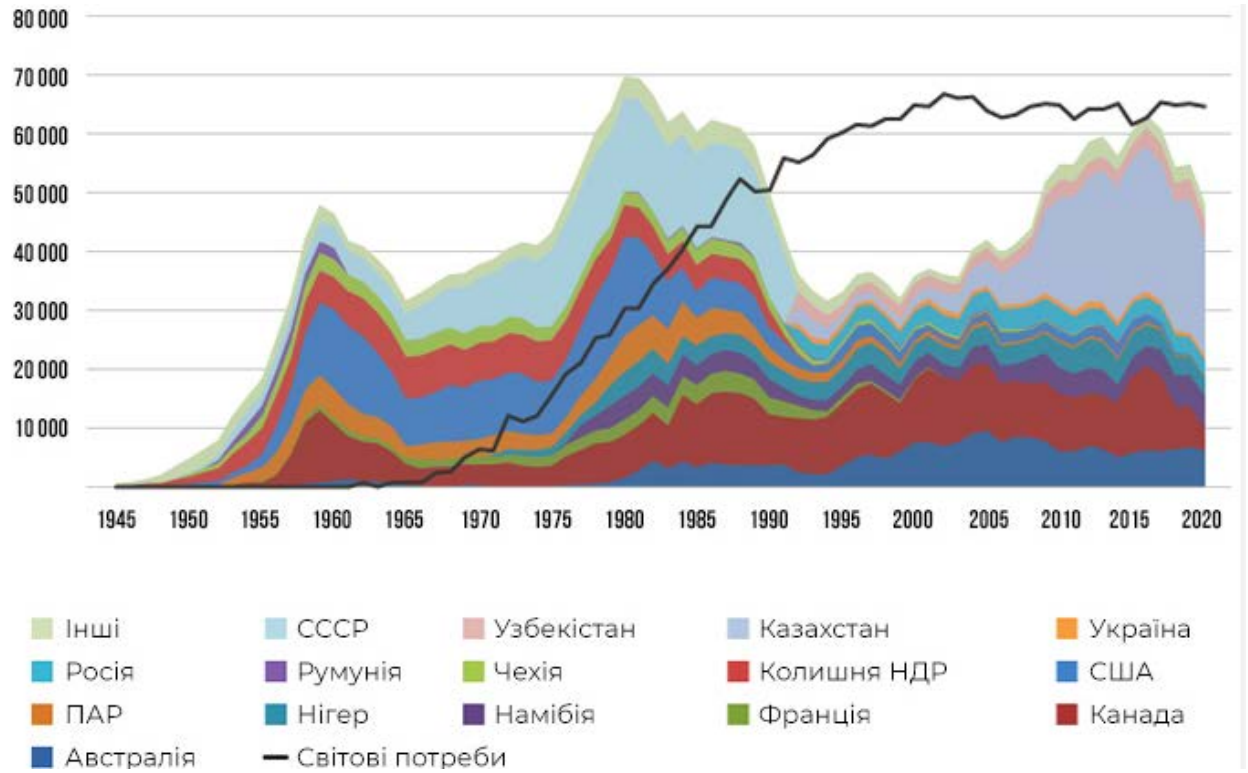

Рис. 1.3. Динаміка виробництва урану і його використання в атомній енергетиці (1945-2020 рр.)

Перший пік підйому його здобичі пов'язаний з гонкою ядерних озброєнь, а другий - з "дочорнобильським етапом" розвитку атомної

енергетики. Наслідки цієї технологічної катастрофи в енергетиці були здолані лише на початок нового XXI століття. Саме останні 10 років відбувається помітний прогрес в рішенні багатьох проблем подальшого розвитку атомної енергетики.

Провідне місце в здобичі урану до 1991 р. займав СРСР. Після його розпаду в Росії залишилося лише одне гірничодобувне підприємство. Здобич урану в нашій країні, починаючи з 1992 р., знизилася до 2,5-3,5 тис. т в рік, що складає 7-8% від світового рівня. До 2005 р. половину світового уранового концентрату виробляли Канада і Австралія. Починаючи з 2008 р. до трійки лідерів увійшов Казахстан і в 2010 р., з рівнем здобичі урану, що перевищив 10,0 тис. т/рік, вийшов на перше місце у світі. Здобич урану в цій країні прогресивними методами підземного вилуговування ("ПВ"), розробленими і освоєними ще в СРСР, росте швидкими темпами і до 2015 р. планується на рівні 15,0 тис. т/рік. Розвідані тут підтверджені запаси за собівартістю здобичі урану <80 доларів США за 1 кг урану, складають близько 350,0 тис. т, що забезпечує подальше нарощування його виробництва.

Світові загальні запаси урану сьогодні досягають 5,0 млн. т. Сумарне виробництво урану за весь час існування атомної промисловості перевищило 2,5 млн. т. У реакторах використано 1,9 млн. т. У складських запасах є не менше 600 тис. т урану. Майже 500,0 тис. т його є в хвостах ізотопного збагачення. Значна доля урану зосереджена в сховищах ОЯП, хоча частина його перероблена. При введенні в дію вдосконалених теплових реакторів, організації рециклінга ОЯП, використанні МОХ-палива і збалансованому розвитку атомної енергетики на швидких нейтронах до 2050 р. можливо збільшити ядерні потужності до 2000 ГВт за рахунок наявних сумарних встановлених і прогнозних ресурсів природного урану.

Класифікацію поновлюваних джерел енергії наведено на рис. 1.4.

Результатами прямої сонячної діяльності є тепловий ефект і фотоефект, внаслідок чого Земля отримує теплову енергію та світло. Результатомпобічної діяльності Сонця є відповідні ефекти в атмосфері, гідросфері та геосфері, що викликають появлення вітру, хвиль, зумовлюють течію річок, створюють умови для збереження внутрішнього тепла Землі.

Переваги поновлюваних джерел енергії порівняно з традиційними є:

- вони практично невичерпними;
- не забруднюється навколишнє середовище;
- відпадає необхідність у добуванні, переробці та доставці палива;

- немає потреби використовувати воду для охолодження, вилучати залові відходи або продукти розпаду;

- немає необхідності у дефіцитних високотемпературних матеріалах, за винятком сонячних концентраторів тепла;

- можуть працювати без обслуговування; - немає потреби в транспортуванні енергії.

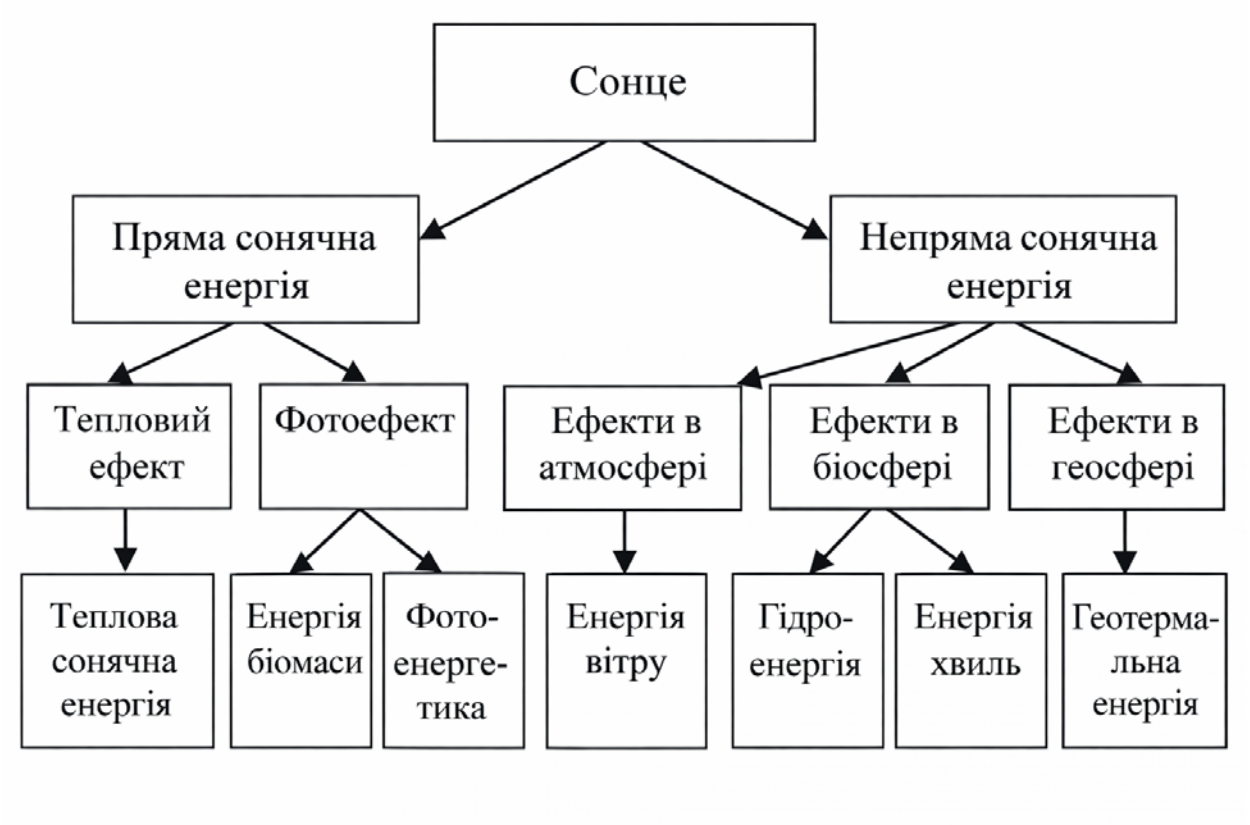

Рис. 1.4. Класифікація відновлювальних джерел енергії

Основним недоліком більшості поновлюваних джерел енергії є непостійність їхнього енергетичного потенціалу.

Необхідність використання поновлюваних джерел енергії визначається такими факторами:

- швидким зростанням потреби в електричній енергії, споживання якої через 50 років, за деякими оцінками, зросте в середньому в 3-4 рази, а в розвинутих країнах - в 5-бразів;

- вичерпуванням у найближчому майбутньому розвіданих запасів органічного палива;

- забрудненням навколишнього середовища оксидами азоту та сірки, вуглекислим газом, пилоподібними останками від згорання видобувного палива, радіоактивним забрудненням і тепловим перегрівом при використанні ядерного палива.

Необхідність і можливість розвитку енергетики України на базі поновлюваних джерел зумовлені такими причинами:

- дефіцитом традиційних для України паливно-енергетичних ресурсів;

- дисбалансом у розвитку енергетичного комплексу України, орієнтованого на значне виробництво електроенергії на атомних електростанціях (до 25-30%) за фактичної відсутності виробництв 1 отримання ядерного палива, утилізації та переробки відходів, а також виробництв з модернізації обладнання діючих АЕС (ядерних реакторів, котельного обладнання тощо);

- сприятливими клімато-метеорологічними умовами для використанняосновних видів поновлюваних джерел енергії;

- наявністю промислової бази, придатної для виробництва практично всіх видів обладнання для поновлюваної енергетики.

Питання до теми 1

1. Основні природні джерела енергії;
2. Розподіл променистої енергії сонця;
3. Світові запаси і динаміка їх освоєння
4. Динаміка виробництва урану і його використання в атомній енергетиці;
5. Класифікація відновлювальних джерел енергії;
6. Основні недоліки відновлювальних джерел енергії.

ТЕМА № 2. СОНЯЧНА ЕНЕРГЕТИКА

2.1. Фізичні основи процесів перетворення сонячної енергії

Інтенсивність сонячного випромінювання.

Джерелом енергії сонячного випромінювання служить термоядернареакція на Сонці. Основна частина цієї енергії випускається у вигляді електромагнітного випромінювання в діапазоні довжин хвиль λ = 0,2 − 3 мкм. При проходженні через атмосферу сонячне світло ослабляється, в основному за рахунок поглинання інфрачервоного випромінювання парами води, ультрафіолетового випромінювання - озоном і розсіяння випромінювання молекулами газів і частками пилу, що знаходяться в повітрі, і аерозолями. Параметром, що відбиває вплив атмосфери на інтенсивність і спектральний склад сонячного випромінювання, що доходить до земної поверхні, являється атмосферна (чи повітряна) маса (АМ).

При нульовій повітряній масі AM_0 у верхньої межі атмосфери інтенсивність випромінювання рівна ЕС =1360 Вт/м2. Величина АМ1 відповідає проходженню сонячного випромінювання через безхмарну атмосферу до рівня моря при зенитальном розташуванні Сонця. Повітряна маса для будь-якого рівня земної поверхні у будь-який момент дня визначається по формулі (2.1):

$$AM\left(x\right)=\frac{x}{x_0}\frac{1}{\sin\Theta} \qquad (2.1)$$

де *x*– атмосферний тиск, Па;

x_0– нормальний атмосферний тиск ($1{,}013\cdot10^5$ Па);

Θ– кут висоти Сонця над горизонтом.

Найбільш характерною в земних умовах є величина АМ 1,5 (Θ = 41°49′). Вона прийнята за стандартну при інтегральній поверхневій щільності сонячного випромінювання ЕС =835 Вт/м^2. Це необхідно для забезпеченні порівнянності результатів досліджень різних сонячних елементів. На рис. 2.1 приведений спектральний розподіл потоку фотонів позаатмосферного (AM_0) і наземного стандартизованого ($AM_{1,5}$) сонячного випромінювання при перпендикулярному падінні променів на приймальний майданчик.

Енергія фотонів, еВ, у випромінюванні з довжиною хвилі λ визначається із співвідношення (2.2):

$$h\nu = h\frac{c}{\lambda} = \frac{1,24}{\lambda} \qquad (2.2)$$

де h - постійна Планка, $6,626196(50)\cdot10^{-34}$ Дж·с; c - швидкість світла, $2,9979250(10)\cdot10^{8}$ м/с; λ - довжина хвилі, мкм.

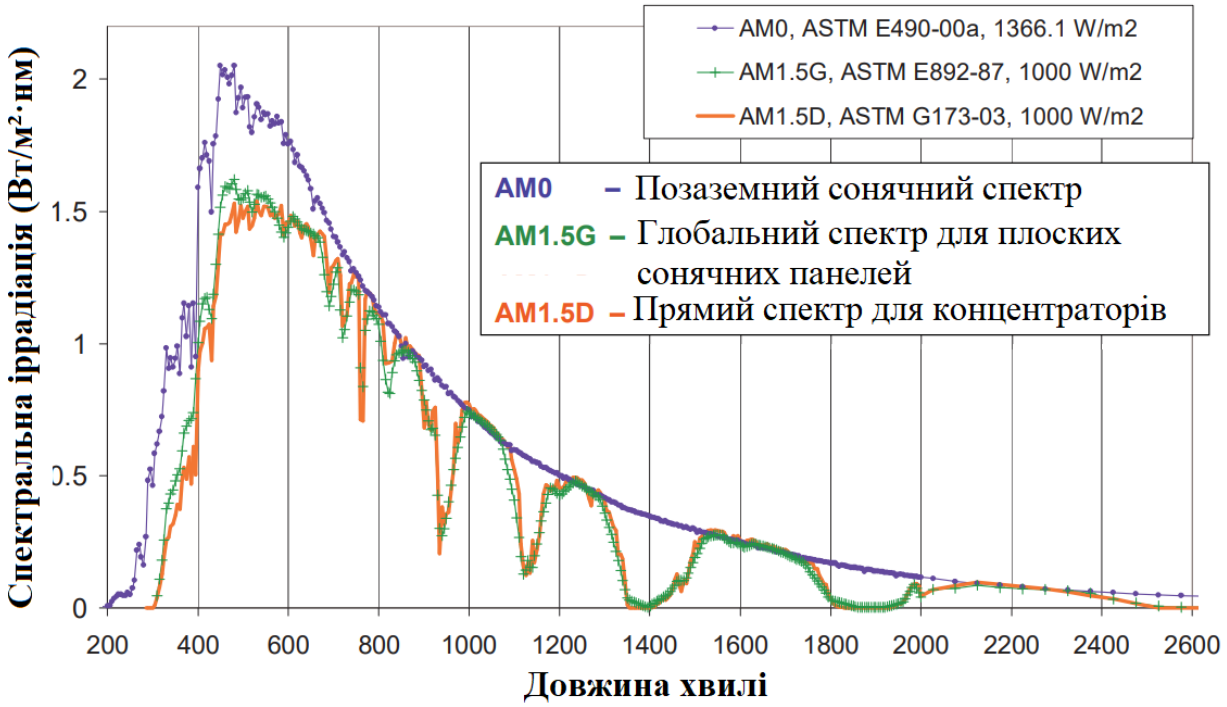

Рис. 2.1. Спектральний розподіл потоку фотонів сонячного випромінювання : 1 - позаатмосферне випромінювання (AM0); 2 - наземне стандартизованное випромінювання (AM1, 5); 3 - спектр випромінювання абсолютно чорного тіла при ТС = 5800 К. На вставці заштрихована доля корисно використовуваних фотонів.

Електронвольт - робота, яку необхідно зробити, щоб перемістити електрон між двома точками з різницею потенціалів 1 В. 1еВ = $1,6\cdot10^{-19}$ Дж.

Гранична довжина хвилі, починаючи з якої фотони поглинатимуться в матеріалі сонячного елементу з шириною забороненої зони (характеризується відсутністю енергетичних рівнів, різна по ширині для різних матеріалів) E_g.

$$\lambda_c = \frac{1,24}{E_g} \qquad (2.3)$$

Більш довгохвильове випромінювання не поглинається в напівпровіднику і, отже, марно з точки зору фотоелектричного перетворення.

Фотоелектричні властивості p - n переходу

Сонячний фотоелемент виготовляється на основі пластини, виконаної з напівпровідникового матеріалу, наприклад кремнію (рис. 2.2.). У пластині створюються області з p - і n - типами провідності. Отримують різні типи провідності шляхом зміни типу введених в напівпровідник домішок. Наприклад, атоми III групи Періодичної системи Д. І. Менделєєва, введені в кристалічну решітку кремнію, надають останньому діркову (позитивну) провідність, а домішки V групи - електронну (негативну).

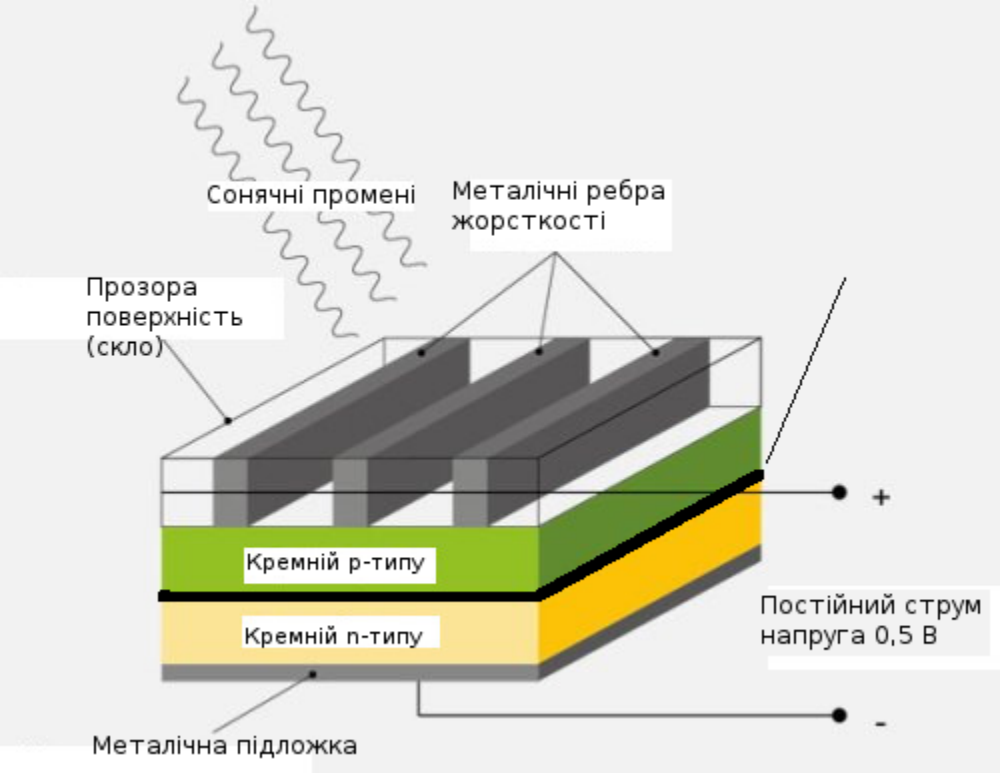

Рис. 2.2. Конструкція простого сонячного елементу

Потім виготовляється нижній і верхній електроконтакти, причому нижній контакт - суцільний, а верхній виконується у вигляді гребінчастої структури (тонкі смуги, сполучені відносно широкою шиною). Контакт *p*– або*n*– напівпровідників призводить до освіти між ними контактного електричного поля, що грає важливу роль в роботі сонячного фотоелемента.

Розглянемо причину виникнення контактної різниці потенціалів. При з'єднанні в одному монокристалі напівпровідників *p* - та*n* -типа виникає дифузійний потік електронів з напівпровідника *n* -типа в напівпровідник *p*– типу і, навпаки, потік дірок з *p*– в *n*– напівпровідник. В результаті такогопроцесу прилегла до *p*–*n* переходу частина напівпровідника *p*– типу заряджатиметься негативно, а прилегла до *p* – *n* переходу частину напівпровідника *n*– типу, навпаки, придбає позитивний заряд. Таким чином, зблизька *p* – *n* переходу утворюється подвійний заряджений шар, який

протидіє процесу дифузії електронів і дірок. Дійсно, дифузія прагне створити потік електронів з *n*– області в *p*– область, а поле зарядженого шару, навпаки, - повернути електрони в *n*– область. Аналогічним чином поле в *p* – *n* переході протидіє дифузії дірок з *p* – в *n*– область. В результаті встановлюється рівноважний стан: в області *p* – *n* переходу виникає потенційний бар'єр, для подолання якого електрони з n -полупроводника і дірки з *p* -напівпровідника повинні витратити певну енергію.

Розглянемо роботу *p* – *n* переходу у фотоелементах. При поглинанні світла в напівпровіднику збуджуються електронно-діркові пари. У однорідному напівпровіднику фотозбудження збільшує тільки енергію електронів і дірок, не розділяючи їх в просторі, тобто електрони і дірки розділяються в "просторі енергій", але залишаються поруч в геометричному просторі. Для розподілу носіїв струму і появи фотоелектрорушійної сили (ФОТОЕРС) повинна існувати додаткова сила. Найбільш ефективний розподіл нерівноважних носіїв має місце саме в області *p* – *n* переходу (рис. 2.2). Що генеруються зблизька *p* – *n* переходу "неосновні" носії (дірки в *n*– напівпровіднику і електрони в *p*– напівпровіднику) дифундують до *p* – *n* переходу, підхоплюються полем *p* – *n* переходу і викидаються в напівпровідник, в якому вони стають основними носіями, : електрони локалізуватимуться в напівпровіднику *n*– типу, а дірки - в напівпровіднику *p* – типу. В результаті напівпровідник *p* – типу отримує надлишковий позитивний заряд, а напівпровідник *n*–типу - негативний. Між *n*– і *p* – областями фотоелемента виникає різниця потенціалів – ФОТОЕРС, або напруга в режимі холостого ходу. Полярність ФОТОЕРС відповідає "прямому" зміщенню *p* – *n* переходу, яке знижує висоту потенційного бар'єру і сприяє інжекції дірок з *p* – області в *n*– область і електронів з *n*– області в *p* – область. В результаті дії цих двох протилежних механізмів – накопичення носіїв струму під дією світла і їх відтоку із-за пониження висоти потенційного бар'єру - при різній інтенсивності світла встановлюється різна величина ФОТОЕРС. При цьому величина ФОТОЕРС в широкому діапазоні освітленостей росте пропорційно логарифму інтенсивності світла.

При короткому замиканні освітленого *p* – *n*переходу в електричному ланцюгу потече струм, пропорційний за величиною інтенсивності освітлення і кількістю електронно-діркових пар, що генеруються світлом. При включенні в електричний ланцюг корисного навантаження, величина струму в ланцюзі декілька зменшиться. Звичайний електричний опір корисного навантаження в ланцюзі сонячного елементу вибирають таким, щоб отримати що максимальну віддається цьому навантаженню електричну потужність.

Вольт-амперна характеристика сонячного елементу

Потік носіїв, що генеруються світлом, утворює фотострум I_ϕ. Величина I_ϕ дорівнює числу носіїв, що фотогенеруються, пройшли через p – nперехід в одиницю часу (2.4):

$$I_\phi = q\frac{P_i}{h\nu} \tag{2.4}$$

де q– величина заряду електрона; P_i– потужність поглиненого монохроматичного випромінювання.

Тут передбачається, що в напівпровіднику кожен поглинений фотон з енергією $h\nu \geq Eg$ створює одну електронно-діркову пару. Ця умова добре виконується для сонячних елементів на основі Si і GaAs (у кремнії внутрішній фотоефект має місце для хвиль з довжиною $\lambda \leq 1{,}1$ мкм, тобто для видимого, ультрафіолетового і ближнього інфрачервоного випромінювань).

При нульових внутрішніх омічних втратах в сонячному елементі режим короткого замикання еквівалентний нульовій напрузі зміщення p – n переходу, тому струм короткого замикання $I_{к.з}$дорівнює фотоструму (2.5):

$$I_{к.з} = I_\phi \tag{2.5}$$

У режимі холостого ходу фотострум урівноважується "темновим" током $I_т$ - прямим струмом через p – nперехід, що виникає при напрузі зміщення $U = U_{х.х.}$ При цьому через p – nперехід протікають наступні струми: неосновних носіїв, основних носіїв і первинний фотострум. Абсолютне значення "темнового" струму (2.6):

$$I_m = I_0\left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right) = I_\phi \tag{2.5}$$

де k - постійна Больцмана, $1{,}38\cdot10^{-23}$ Дж/К=$0{,}86\cdot10^{-4}$еВ/К;

T - абсолютна температура, К;

I_0 - струм насичення (представляє суму струмів неосновних носіїв);

Повний струм через p – nпереход рівний (2.6)

$$I = I_0\left(e^{\frac{qU}{kT}} - 1\right) - I_\phi \tag{2.6}$$

Ця формула описує вольт-амперну характеристику освітленого p –

*n*перехода.

Напруга зміщення

$$U = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_\phi + I}{I_0} + 1\right) \tag{2.7}$$

звідки напруга холостого ходу.

$$U_{x.x.} = \frac{kT}{q}\ln\left(\frac{I_\phi}{I_0} + 1\right) \tag{2.7}$$

Розглянемо підключення до p – n переходу варійованого опору навантаження. Напрям струму в навантаженні завжди співпадає з напрямом I_ϕ, а сам струм навантаження $I_н$ дорівнює результуючому струму через p – *n*перехід (2.6). Приймаючи напрям струму I_ϕ за позитивне, для $I_н$ можна записати

$$I_н = I_\phi - I_0\left(e^{\frac{qU_н}{kT}} - 1\right) \tag{2.8}$$

де$U_н$– напруга на навантаженні, дорівнює напрузі на p – *n*переході.

Вираз(2.8) описує вольт-амперну характеристику навантаження освітленого p – *n*переходу. Вольт-амперна характеристика навантаження арсенид-галлиевого p – n переходу для значення фотоструму I_ϕ =1 А зображена на рис. 2.3.

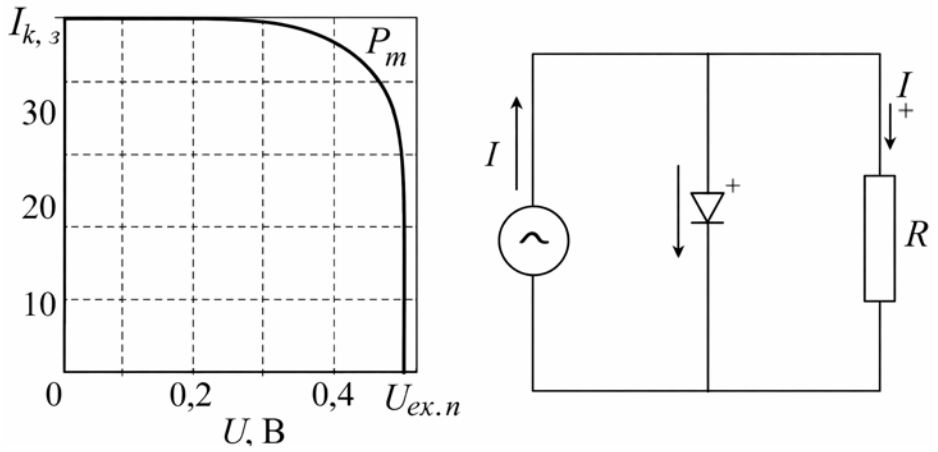

Рис. 2.3. Навантаження ВАХ p – *n*переходу в і еквівалентна схема освітленого p – *n*переходу з опором навантаження

Електрична потужність, що виділяється в навантаженні, визначається по формулі (2.9):

$$P = I_н U_н = U_н \left(I_ф - I_0 e^{\frac{qU_н}{AkT}} \right) \qquad (2.9)$$

У режимах короткого замикання і холостого ходу $P = 0$, оскільки або$U_н$, або $I_н$ дорівнюють нулю.

Конструкції і матеріали сонячних елементів

Виробництво структур на основі монокристалічного кремнію - процес технологічно складний і дорогий. Тому увага була звернена на такі матеріали, як сплави на основі аморфного кремнію (а - Si: H), арсенід галію і полікристалічні напівпровідники.

Аморфний кремній виступив дешевшою альтернативоюмонокристалічному. Перші СЕ на його основі були створені в 1975 році. Оптичне поглинання аморфного кремнію в 20 разів вище, ніж кристалічного. Тому для істотного поглинання видимого світла досить плівки а- Si :H товщиною 0,5-1,0 мкм замість дорогих кремнієвих 300-мкм підкладок. Крім того, завдяки існуючим технологіям отримання тонких плівок аморфного кремнію великої площі не вимагається операції різання, шліфовки і поліровки, необхідних для СЕ на основі монокристалічного кремнію. В порівнянні з полікристалічними кремнієвими елементами виробу на основі а - Si:H виробляють при нижчих температурах (300°С) : можна використовувати дешеві скляні підкладки, що скоротить витрату кремнію в 20 разів.

Поки максимальний ККД експериментальних елементів на основі а-Si:H - 12% - дещо нижче ККД кристалічних кремнієвих СЕ (~15%). Проте не виключено, що з розвитком технології ККД елементів на основі а- Si:H досягне теоретичної стелі – 16 %.

Арсенід галію– один з найбільш перспективних матеріалів для створення високоефективних сонячних батарей. Це пояснюється наступними його особливостями:

- майже ідеальна для однопереходних сонячних елементів ширина за-прещенной зони 1,43 еВ;
- підвищена здатність до поглинання сонячного випромінювання : вимагається шар завтовшки всього в декілька мікрон;
- висока радіаційна стійкість, що спільно з високою ефективністю робить цей матеріал надзвичайно привабливим для використання в космічних

апаратах;

- відносна нечутливість до нагріву батарей на основі GaAs;
- характеристики сплавів GaAs з алюмінієм, миш'яком, фосфором або індієм доповнюють характеристики GaAs, що розширює можливості при проектуванні сонячних елементів.

Головне достоїнство арсеніду галію і сплавів на його основі – широкийдіапазон можливостей для дизайну СЕ. Фотоелемент на основі GaAs може складатися з декількох шарів різного складу. Це дозволяє розробникові з великою точністю управляти генерацією носіїв заряду, що в кремнієвих сонячних елементах обмежено допустимим рівнем легування. Типовий сонячний елемент на основі GaAs складається з дуже тонкого шару AlGaAs як вікно.

Основний недолік арсеніду галію - висока вартість. Для здешевлення виробництва пропонується формувати СЕ на дешевших підкладках; вирощувати шари GaAs на підкладках, що видаляються, або підкладках багатократного використання.

Полікристалічні тонкі плівки також дуже перспективні для сонячної енергетики. Надзвичайно висока здатність до поглинання сонячного випромінювання у диселенида міді і індію ($CuInSe_2$) - 99 % світла поглинається в першому мікроні цього матеріалу (ширина забороненої зони - 1,0 еВ)[2,5]. Найбільш поширеним матеріалом для виготовлення вікна сонячної батареї на основі $CuInSe_2$ являється CdS. Іноді для поліпшення прозорості вікна в сульфід кадмію додають цинк. Трохи галію в шарі $CuInSe_2$ збільшує ширину забороненої зони, що призводить до зростання напруги холостого ходу і, отже, підвищенню ефективності пристрою. Один з основних способів отримання $CuInSe_2$ - електрохімічне осадження з розчинів $CuSO_4$, In2#023 і SeO_2 в деіонізованої води при співвідношенні компонентів Cu : In: Se як 1:5:3 і pH>>1,2-2,0.

Теллурид кадмію (CdTe) - ще один перспективний матеріал для фотовольтаики. У нього майже ідеальна ширина забороненої зони (1,44 еВ) і дуже висока здатність до поглинання випромінювання. Плівки CdTe досить дешеві у виготовленні. Крім того, технологічно нескладно отримувати різноманітні сплави CdTe с Zn, Hg і іншими елементами для створення шарів із заданими властивостями.

Подібно до $CuInSe_2$, найкращі елементи на основі CdTe включають гетероперехід з CdS як віконний шар. Оксид олова використовується як прозорий контакт і прояснююче покриття. Серйозна проблема на шляху застосування CdTe - високий опір шару p - CdTe, що призводить до великих внутрішніх втрат. Але вона вирішена в *p – n*структурі з гетеропереходом

CdTe/ZnTe. Плівки CdTe мають високу рухливість носіїв заряду, а сонячні елементи на їх основі - високими значеннями ККД, від 10 до 16%.

Серед сонячних елементів особливе місце займають батареї, що використовують органічні матеріали. Коефіцієнт корисної дії сонячних елементів на основі діоксиду титану, покритого органічним барвником, дуже високий - ~11 %. Основа сонячні елементів цього типу - широкозонний напівпровідник, зазвичай TiO2, покритий моношаром органічного барвника. Принцип роботи елементу заснований на фотозбудженні барвника і швидкої інжекції електрона в зону провідності TiO_2. При цьому молекула барвника окислюється, через елемент йде електричний струм і на платиновому електроді відбувається відновлення триіодида до іодида. Потім іодид проходить через електроліт до фотоелектроду, де відновлює окислений барвник.

2.2 Системи сонячного теплопостачання

Класифікація і основні елементи геліосистем.

Системами сонячного теплопостачання називаються системи, щовикористовують як джерело теплової енергії сонячну радіацію. Їххарактерною відмінністю від інших систем низькотемпературного опалювання є застосування спеціального елементу - геліоприймача, призначеного для уловлювання сонячної радіації і перетворення її в теплову енергію.

За способом використання сонячної радіації системи сонячного низькотемпературного опалювання підрозділяють на пасивні і активні.

Пасивними називаються системи сонячного опалювання, в яких як елемент, що сприймає сонячну радіацію і що перетворює її в теплоту, служать само будівля або його окремі обгороджування (будівля-колектор, стіна-колектор, покрівля-колектор і тому подібне (рис. 2.4)).

Активними називаються системи сонячного низькотемпературного опалювання, в яких геліоприймач є самостійним окремим пристроєм, що не відноситься до будівлі. Активні геліосистеми можуть бути підрозділені:

- за призначенням (системи гарячого водопостачання, опалювання, комбіновані системи для цілей теплохолодопостачання);
- за видом використовуваного теплоносія (рідинні - вода, антифриз і повітря);
- за тривалістю роботи (цілорічні, сезонні);
- по технічному рішенню схем (одно-, двух-, багатоконтурні).

Повітря є широко поширеним незамерзаючим в усьому діапазоні

робочих параметрів теплоносієм. При застосуванні його як теплоносій можливе поєднання систем опалювання з системою вентиляції. Проте повітря - малотепломісткий теплоносій, що веде до збільшення витратиметалу на пристрій систем повітряного опалювання в порівнянні з водяними системами.

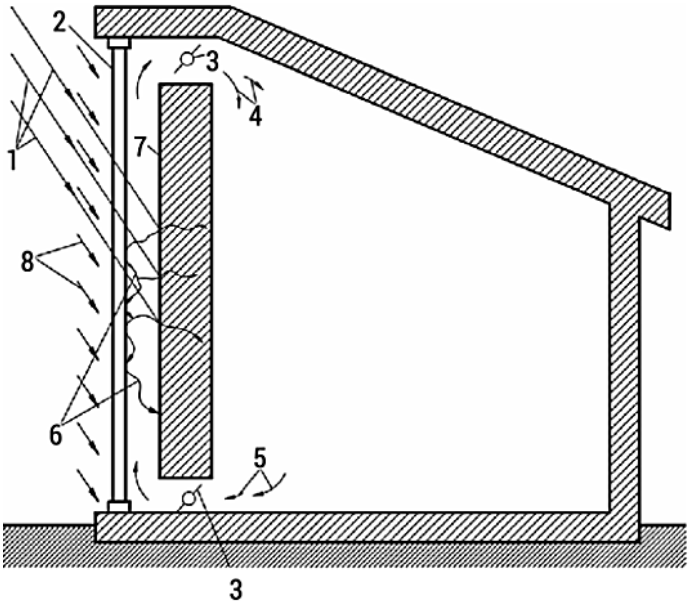

Рис. 2.4. Пасивна низькотемпературна система сонячного опалювання "стіна-колектор": 1 - сонячні промені; 2 - променепрозорий екран; 3 - повітряна заслінка; 4 - нагріте повітря; 5 - охолоджене повітря з приміщення; 6 - власне довгохвильове теплове випромінювання масиву стіни; 7 - чорна променеприймаюча поверхня стіни; 8 - жалюзі.

Вода є тепломістким і широкодоступним теплоносієм. Проте при температурах нижче 0°С в неї необхідно додавати незамерзаючі рідини. Крім того, треба враховувати, що вода, насичена киснем, викликає корозію трубопроводів і апаратів. Але витрата металу у водяних геліосистемах значно нижча, що великою мірою сприяє ширшому їх застосуванню.

Сезонні геліосистеми гарячого водопостачання зазвичай одноконтурні і функціонують в літні і перехідні місяці, в періоди з позитивною температурою зовнішнього повітря. Вони можуть мати додаткове джерело теплоти або обходитися без нього залежно від призначення обслуговуваного об'єкту і умов експлуатації.

Геліосистеми опалювання будівель зазвичай двоконтурні або найчастіше багатоконтурні, причому для різних контурів можуть бути застосовані різні теплоносії (наприклад, в геліоконтурі - водні розчини незамерзаючих рідин, в проміжних контурах - вода, а в контурі споживача -

повітря).

Комбіновані геліосистеми цілорічної дії для цілей теплохолодопостачання будівель багатоконтурні і включають додаткове джерело теплоти у вигляді традиційного теплогенератора, що працює на органічному паливі, або трансформатора теплоти.

Принципова схема системи сонячного теплопостачання приведена на рис. 2.5. Вона включає три контури циркуляції:

- перший контур, що складається з сонячних колекторів 1, циркуляційного насоса 8 і рідинного теплообмінника 3;

- другий контур, що складається з бака-акумулятора 2, циркуляційного насоса 8 і теплообмінника 3;

- третій контур, що складається з бака-акумулятора 2, циркуляційного насоса 8, водоповітряного теплообмінника (калорифера) 5.

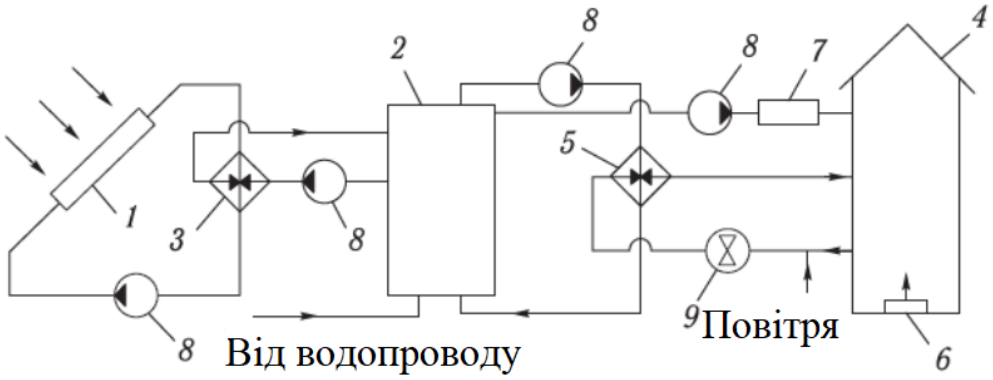

Рис. 2.5. Принципова схема системи сонячного теплопостачання: 1 - сонячний колектор; 2 - бак-акумулятор; 3 - теплообмінник; 4 - будівля; 5 - калорифер; 6 - дублер системи опалювання; 7 - дублер системи гарячого водопостачання; 8 - циркуляційний насос; 9 - вентилятор.

Функціонує система сонячного теплопостачання таким чином. Теплоносій (антифриз) теплоприймального контуру, нагріваючись в сонячнихколекторах 1, поступає в теплообмінник 3, де теплота антифризу передається воді, циркулюючій в міжтрубному просторі теплообмінника 3 під дією насоса 8 другого контуру. Нагріта вода поступає в бак-акумулятор 2. З бака-акумулятора вода забирається насосом гарячого водопостачання 8, доводиться при необхідності до необхідної температури в дублерові 7 і поступає в систему гарячого водопостачання будівлі. Підживлення бака-акумулятора здійснюється з водопроводу.

Для опалювання вода з бака-акумулятора 2 подається насосом третього контуру 8 в калорифер 5, через який за допомогою вентилятора 9

пропускається повітря і, нагрівшись, поступає в будівлю 4. У разі відсутності сонячної радіації або нестачі теплової енергії, що виробляється сонячними колекторами, в роботу включається дублер 6.

Вибір і компонування елементів системи сонячного теплопостачання у кожному конкретному випадку визначаються кліматичними чинниками, призначенням об'єкту, режимом теплоспоживання, економічними показниками.

Концентруючі геліоприймачі

Концентруючі геліоприймачі є сферичними або параболічними дзеркалами (рис. 2.6), виконаними з полірованого металу, у фокус яких поміщають теплосприймаючий елемент (сонячний котел), через який циркулює теплоносій. Як теплоносій використовують воду або незамерзаючі рідини. При використанні як теплоносій води вночі і в холодний період систему обов'язково спорожняють для запобігання її замерзання.

Для забезпечення високої ефективності процесу уловлювання іперетворення сонячної радіації концентруючий геліоприймач має бути постійно спрямований строго на Сонці. З цією метою геліоприймач забезпечують системою стеження, що включає датчик напряму на Сонце, електронний блок перетворення сигналів, електродвигун з редуктором для повороту конструкції геліоприймач в двох площинах.

Перевагою систем з концентруючими геліоприймачами є здатність вироблення теплоти з відносно високою температурою (до 100 °С) і навіть пара. До недоліків слід віднести високу вартість конструкції; необхідність постійного очищення відзеркалювальних поверхонь від пилу; роботу тільки у світлий час доби, а отже, потреба в акумуляторах великого об'єму; великі енерговитрати на привід системи стеження за ходом Сонця, сумірні з енергією, що виробляється. Ці недоліки стримують широке застосування активних низькотемпературних систем сонячного опалювання з концентруючими геліоприймачами. Останнім часом найчастіше для сонячних низькотемпературних систем опалювання застосовують плоскі геліоприймачі.

Плоскі сонячні колектори

Плоский сонячний колектор - пристрій з поглинаючою панеллю плоскої конфігурації і плоскою прозорою ізоляцією для поглинання енергії сонячного випромінювання і перетворення її в теплову.

Плоскі сонячні колектори (рис. 2.7) складаються із скляного абопластикового покриття (одинарного, подвійного, потрійного),

теплосприймаючої панелі, забарвленої з боку, зверненої до сонця, в чорний колір, ізоляції на зворотному боці і корпуси (металевого, пластикового, скляного, дерев'яного).

В якості теплосприймаючої панель можна використовувати будь-який металевий або пластмасовий лист з каналами для теплоносія. Виготовляються тепло сприймаюча панельз алюмінію або сталі двох типів: лист-труба і штамповані панелі (труба в листі). Пластмасові панелі із-за недовговічності і швидкого старіння під дією сонячних променів, а також із-за малої теплопровідності не знаходять широкого застосування.

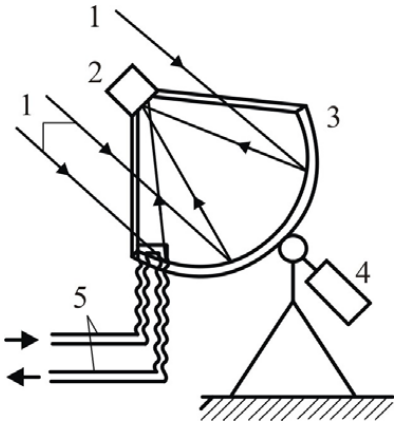



Рис. 2.6 Концентруючі геліоприймачі: а - параболічний концентратор; би - параболоциліндричний концентратор; 1 - сонячні промені; 2 - теплосприймальний елемент (сонячний колектор); 3 - дзеркало; 4 - механізм приводу системи стеження; 5 - трубопроводи, що підводять і відводять теплоносій.

Під дією сонячної радіації теплосприймаючі панелі розігріваються до температур 70-80 °С, що перевищують температуру довкілля, що веде до зростання конвективної тепловіддачі панелі в довкілля і її власного випромінювання на небозвід. Для досягнення вищих температур теплоносія поверхню пластини покривають спектрально-селективними шарами, що активно поглинають короткохвильове випромінювання сонця і що знижують її власне теплове випромінювання в довгохвильовій частині спектру. Такі конструкції на основі "чорного нікелю", "чорного хрому",окисли міді на алюмінії, окислі міді на мідь і інші дорогокоштуючих. Іншим способом поліпшення характеристик плоских колекторів являється створення вакууму між теплосприймаючою панеллю і прозорою ізоляцією для зменшення теплових втрат (сонячні колектори четвертого покоління).

Досвід експлуатації сонячних установок на основі сонячних колекторів

виявили ряд істотних недоліків подібних систем. Передусім це висока вартість колекторів. Збільшення ефективності їх роботи за рахунок селективних покриттів, підвищення прозорості скління, вакуумування, а також пристрої системи охолодження виявляються економічно нерентабельними. Істотним недоліком є необхідність частого очищення стекол від пилу, що практично виключає застосування колектора в промислових районах. При тривалій експлуатації сонячних колекторів, особливо в зимових умовах, спостерігається частий вихід їх з ладу із-за нерівномірності розширення освітлених і затемнених ділянок скла за рахунок порушення цілісності скління. Відзначається також великий відсоток виходу з ладу колекторів при транспортуванні і монтажі. Значним недоліком роботи систем з колекторами є також нерівномірність завантаження впродовж року і доби. Досвід експлуатації колекторів в умовах Європи і європейської частини Росії при високій долі дифузної радіації (до 50%) показав неможливість створення цілорічної автономної системи гарячого водопостачання і опалювання. Усе геліосистеми з сонячними колекторами в середніх широтах вимагають пристрою великих за об'ємом баків-акумуляторів і включення в систему додаткового джерела енергії, що знижує економічний ефект від їхзастосування. У зв'язку з цим найбільш доцільне їх використання в районах з високою середньою інтенсивністю сонячної радіації (не нижче 300 Вт/м^2).

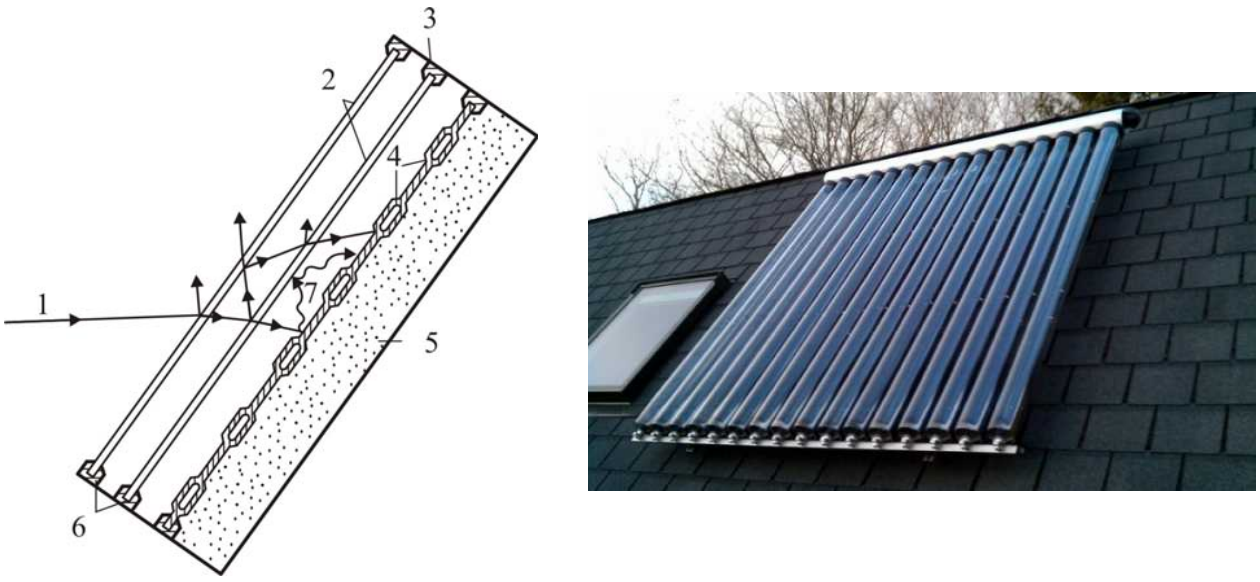

Рис. 2.7. Плоский сонячний колектор: 1 - сонячні промені; 2 - скління; 3 - корпус; 4 - теплосприймаюча поверхня; 5 - теплоізоляція; 6 -ущільнювач; 7 – власнедовгохвильовевипромінюваннятеплосприймаючої пластини.

2.3 Теплова акумуляція енергії

Енергетичний баланс теплового акумулятора

Теплова акумуляція – це фізичні або хімічні процеси, за допомогою яких відбувається накопичення тепла в тепловому акумуляторі енергії (ТАЕ).

Акумулятор складається з резервуару для зберігання (зазвичай теплоізольованого), акумулюючого середовища (робочого тіла), пристроїв для зарядки і розрядки і допоміжного устаткування.

Акумулююча система характеризується способами, якими енергія для зарядки акумулятора відбирається від джерела, трансформується (при необхідності) в необхідний вид енергії і віддається споживачеві.

На рис. 2.8 показаний процес теплового акумуляція з використанням посудини-акумулятора. Баланс енергії для цього процесу в загальному вигляді можна записати (2.10):

$$E_{вх} - E_{вих} = E_{ак} \tag{2.10}$$

де $E_{вх}$– підведена енергія, $E_{вих}$– відведена енергія, $E_{ак}$– закумульована енергія.

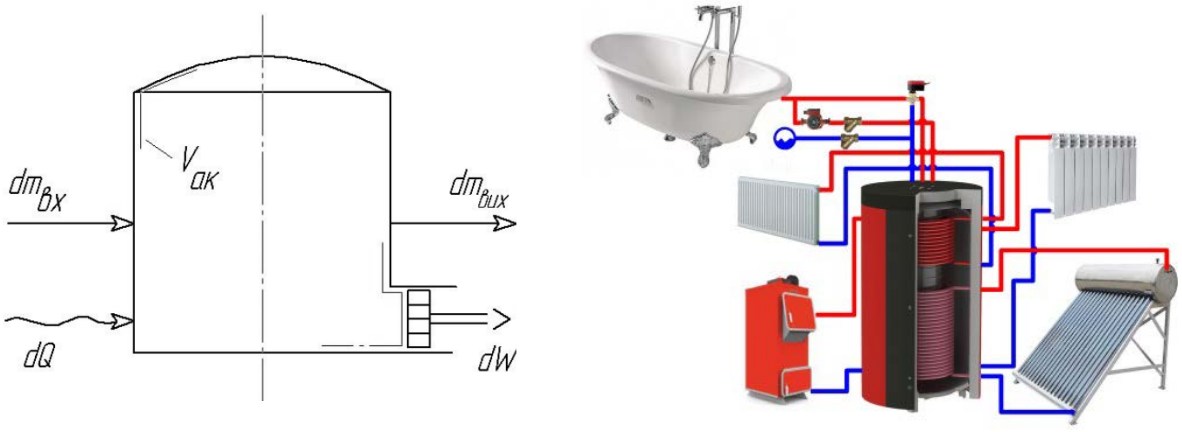

Рис. 2.8. Енергетичний баланс акумулятора

Застосовуючи перший закон термодинаміки для підведеної і відведеної енергії до цієї відкритої системи, отримаємо основне рівняння акумуляції енергії для відкритих систем в диференціальній формі (3.11):

$$\left(u + pv + gH + \frac{c^2}{2}\right)_{вх} dm_{вх} + dQ - \left(u + pv + gH + \frac{c^2}{2}\right)_{вих} dm_{вих} + \\ + dW = d\left(\left(u + pv + gH + \frac{c^2}{2}\right)_{ак} m_{ак}\right) \tag{3.11}$$

де $m_{ак}$- маса акумулюючого середовища; u - внутрішня енергія(відлічувана від довільного нульового рівня); p– тиск; v– питомий об'єм; g–пр.искорення сили тяжіння; H - висота (відлічувана від довільного нульового рівня); gH– питома потенційна енергія; c– швидкість течії; c^2– питома кінетична енергія; dQ– тепло, підведене до системи; dW– робота системи, не залежна від перенесення маси (наприклад, при русі стінок системи, електрична енергія, енергія валу двигуна).

Дослідження загального рівняння (2.11) показує, що акумуляція енергії може здійснюватися в результаті зміни: а) питомої внутрішньої енергії; б) питомої потенційної енергії; в) питомої кінетичної енергії; г) маси системи. До теплової акумуляції енергії зазвичай відносять випадок (а), а також випадок (б), якщо питома внутрішня енергія робочого тіла вища, ніж довкілля.

Якщо накопичення і кінетичній, і потенційній енергії виключено ($c_{ак}$ = 0, H = 0) і якщо, крім того, члени рівняння (2.11), відповідні кінетичною і потенційною енергіям що підводиться і відводиться мас, нехтує малі, а робота обмежена рухом поверхонь, що обмежують систему, тобто якщо:

$$dW = p_{ак} dV_{ак} \tag{2.12}$$

де $V_{ак}$– об'єм акумулятора; $p_{ак}$– тиск в акумуляторі, т0 рівняння (2.11) перетвориться до виду, справедливого для акумулятора тепла (2.13):

$$\left(u + pv\right)_{вх} dm_{вх} + dQ - \left(u + pv\right)_{вих} dm_{вих} = d\left(um\right)_{ак} + p_{ак} dV_{ак} \tag{2.13}$$

Використовуючи визначення ентальпії, маємо (2.14):

$$h = u + pv \tag{2.14}$$

і, отже, енергетичний баланс набирає вигляду (2.15):

$$h_{вх} dm_{вх} + dQ - h_{вих} dm_{вих} = d\left(um\right)_{ак} + p_{ак} dV_{ак} \tag{2.15}$$

Відповідно баланс маси запишеться як (2.16):

$$dm_{вх} - dm_{вих} = dm_{ак} \tag{2.16}$$

У простих випадках можливе аналітичне рішення. У інших, складніших випадках можуть бути отримані чисельні рішення (особливо це відноситься до процесу розрядки).

2.4 Класифікація акумуляторів тепла

Відповідно до прийнятих вище визначень і виводів можна провести класифікацію акумуляторів тепла.

Акумулююче і теплообмінне середовище:

а) Пряма акумуляція: акумулює і теплообмінною є одне і те ж середовище. Акумулююче середовище може бути твердим, рідким, газоподібним або двофазним (рідина плюс газ).

б) Непряма акумуляція: енергія акумулюється тільки за допомогою теплообміну (наприклад, теплопровідністю через стінки резервуару) або в результаті масообміну спеціального теплообмінного середовища (у рідкому, двофазному або газоподібному стані). Власне акумулююче середовище може бути твердим, рідким або газоподібним (процес може протікати без фазового переходу, з фазовим переходом тверде тіло - тверде тіло, тверде тіло - рідина або рідина - пара).

в) Напівпряма акумуляція: процес протікає як у разі б), за винятком того, що акумулююча місткість теплообмінного середовища грає важливішу роль (наприклад, акумуляція гарячої нафти з твердою насадкою).

г) Сорбційна акумуляція: в цьому випадку використовується властивість деяких акумулюючих середовищ абсорбувати гази з виділенням тепла (і поглинанням тепла при десорбції газу). Передача енергії може відбуватися безпосередньо у формі тепла або за допомогою газу

Маса акумулюючого середовища.

а) Постійна маса ($dm_{ак} \neq 0$) : звичайно це випадок непрямої акумуляції. Проте може мати місце і пряму акумуляцію, якщо переміщувана частина маси після охолодження (при розрядці) або нагріву (при зарядці) повністю повертається в акумулятор (витіснювальна акумуляція).

б) Змінна маса ($dm_{ак} \neq 0$) : це завжди випадок прямоїакумуляції.

Об'єм акумулятора.

а) Постійний об'єм ($dV_{ак} = 0$) : цей випадок відповідає акумуляції в закритих (чи з малою зміною об'єму) резервуарах.

б) Змінний об'єм ($dV_{ак} \neq 0$) : цей випадок відповідає акумуляціїпри

атмосферному тиску або із спеціальним компресійним устаткуванням.

Тиск в акумуляторі.

а) Постійний тиск ($dp_{ак} = 0$).

б) Змінний (що ковзає) тиск ($dp_{ак} \neq 0$).

Системи акумуляції

Для виконання своїх функцій акумулююча система повинна матиокрім акумулюючих посудин і їх внутрішніх устроїв також і зовнішнє устаткування. При тепловій акумуляції (як у теплових процесах промислових установок, так і в районних опалювальних системах) для зарядки і розрядки можуть знадобитися насоси, теплообмінники, випарники, клапани, трубопроводи.

Основні варіанти систем акумуляції для енергетичних установок показані на рис. 2.9. У основу класифікації покладено ділення на безнасосные і насосні системи акумуляції енергії.

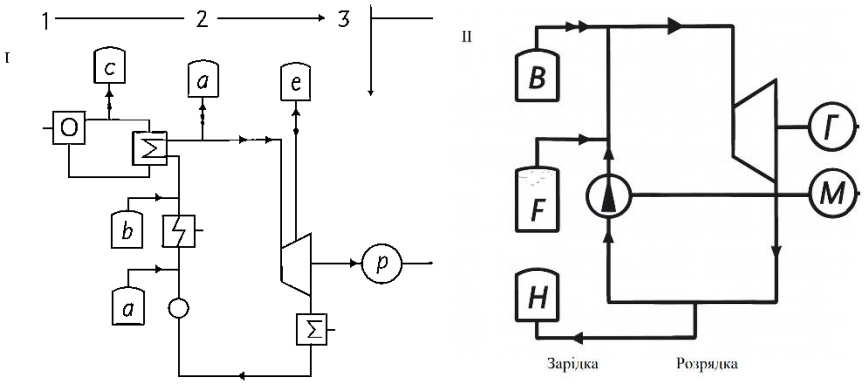

Рис. 2.9. Основні варіанти систем теплової акумуляції для енергоустановок: I - безнасосні системи акумуляції; II - насосна системи акумуляція; 1 - первинна енергія; 2 - перетворення енергії; 3 - механічна енергія; 4 - електрична енергія.

Безнасосні системи акумуляції отримують енергію для зарядки з теплового циклу енергетичної установки. У верхній частині мал. 3.9 показані чотири безнасосні системи акумуляції:

а) система акумуляції енергії за допомогою стислих газів, зокрема,для газотурбінних циклів;

b) система акумуляції з регенеративним підігріванням поживної водипарових циклів;

c) система акумуляції тепла первинного циклу для тепловихенергетичних установок з роздільними теплообмінним і робочим цикл-мі (аналогічно тому, як це робиться в сонячних теплоенергетичних

установках);

d, e) системи акумуляції тепла в робочому циклі за допомогою акумуляції насиченої або перегрітої пари і високотемпературної акумуляції тепла в газових турбінах.

Подальша класифікація безнасосних систем акумуляції пов`язана з виділенням двох груп:

– включена в енергоустановку системи акумуляція з установкою базисного навантаження, яка здатна покрити таке навантаження без використання систем акумуляції, або з основною турбіною для базисного навантаження і окремою піковою турбіною, або з основною турбіною, здатною нести підвищене навантаження, яке покриває також і пікове навантаження);

– безнасосні системи акумуляції з окремим перетворювачем енергії (парогенератором) і окремим двигуном (турбіною для пікового навантаження).

Крім того, слід відрізняти акумуляцію з постійними параметрами, при якій акумулююче середовище відбирається з процесу і вводиться в нього з акумулятора в одній і тій же точці циклу (так звана "оборотна акумуляція"), від акумуляції із змінними параметрами, при якій введення середовища здійснюється в іншій точці (нижче по потоку), або зі значно нижчими параметрами.

Насосні системи акумуляції заряджаються з допомогою електричної або механічній енергії. У нижній частині рис. 2.9 показані насосні системи акумуляції:

f) система пневматичної акумуляції з окремим акумулятором теплоти стискування або без нього;

g, h) системи акумуляції з використанням процесу теплового насоса (наприклад, з паровим компресором), з верхнім (g) і нижнім (h) акумуляторами; один з них, наприклад нижній, може бути замінений довкіллям.

Насосні системи акумуляції заряджаються зазвичай від електричної мережі і тому можуть бути підключені в будь-якому місці мережі. Таким чином, вони можуть і не входити до складу енергетичної установки. Були запропоновані насосні системи, що також входять до складу енергоустановки, акумуляція, що заряджається механічною енергією від газової або парової турбіни.

Верхній акумулятор зазвичай має параметри (тиск, температуру) вище за параметри довкілля, тоді як параметри нижнього приблизно такі ж, як і у довкілля, яке, таким чином, може служити нижнім акумулятором (системи

акумуляції з тепловим джерелом). Насосні системи акумуляції можуть бути спроектовані і так, що довкілля використовується як верхній акумулятор, тоді як параметри нижнього акумулятора вибираються багато нижче, ніж у довкілля (системи акумуляції з низькотемпературним теплоприймачем). В цьому випадку тепло для процесу відбирається здовкілля, а нижній (низькотемпературний) акумулятор відбирає відпрацьоване тепло і нагрівається. Як відзначалося раніше, щільність ексергії таких систем, що запасається, з "негативною ексергією" може бути дуже висока (у межі нескінченна при 0 °К). Розглянута вище класифікація важлива для оцінки ефективності системи акумуляції, потужності і швидкості зарядки і розрядки, для вибору режиму роботи, а також для контролю функціонування.

Теплова акумуляція для сонячного обігріву і охолодження приміщень

Типова схема активної системи з тепловою акумуляцією енергії для отримання гарячої води (рис. 3.10) включає первинний контур на антифризі, теплообмінник в нижній частині акумулюючого бака і додатковий нагрівач у верхній його частині. Оскільки ефективність сонячного колектора знижується із збільшенням різниці температур первинного контуру і довкілля, температуру первинного контуру слід підтримувати на можливо нижчому рівні. Для цього слід забезпечити невеликий перепад температур в теплообміннику, перешкодити перемішуванню в баку і забезпечити підведення тепла тільки в найхолоднішу частину бака.

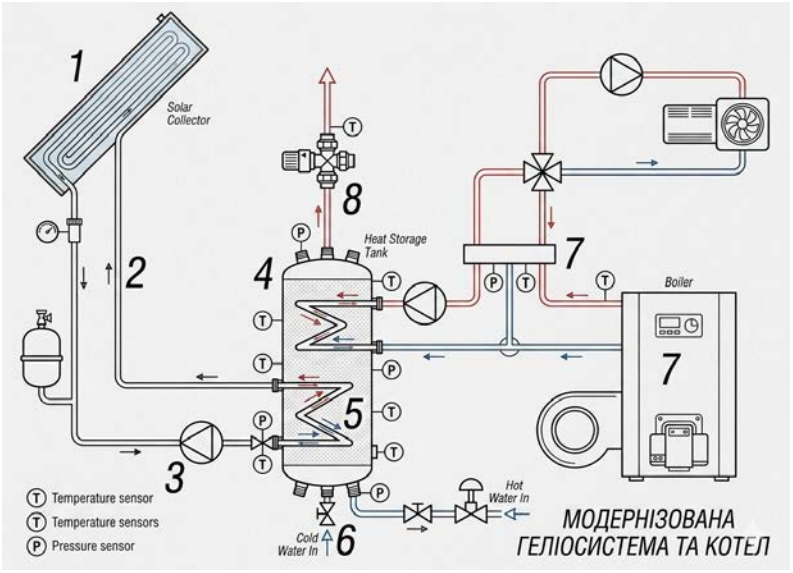

Рис. 2.10. Схема отримання гарячої води для побутових потреб з використанням сонячної енергії: 1 - сонячні колектори; 2 - первинний цикл (антифриз); 3 - циркуляційний насос; 4 - акумулюючий бак; 5 - сонячний теплообмінник; 6 - подача холодної води; 7 - додатковий нагрівач; 8 - лінія подачі.

Вибір співвідношення між розмірами сонячного колектора і акумулятора для короткочасної (гаряча побутова вода) і довготривалої (обігрів) акумуляції - цікаве оптимізаційне завдання. Загальний оптимум виходить, коли оптимальні характеристики як колектора, так і акумулятора. Питомі місткості акумуляторів для короткочасної акумуляції зазвичай складають 50-100 кг води на 1 м^2 площі колектора, а для довготривалої акумуляції в кліматичних умовах Центральної Європи потрібні значення питомої місткості 1000 кг/м^2. Сонячний басейн, де колектор і акумулятор поєднані, є часткою злучаємо акумуляцію з використанням гарячого теплоносія (рис. 2.11). Сонячна радіація поглинається донною поверхнею басейну. У теплоносії створюється і підтримується градієнт концентрації солі (концентрація збільшується з глибиною) між верхнім конвективним шаром (під дією вітру) і нижнім конвективним шаром (в результаті відведення тепла). Завдяки цьому конвекція і пов'язаний з нею тепловідвід до поверхні пригнічуються, і шар завтовшки ~ 1 м, в якому немає конвекції, служить тепловою ізоляцією.

У такий спосіб можна досягти температури води 100°С, а 90°С є звичайним розрахунковим значенням в зонах з жарким кліматом.

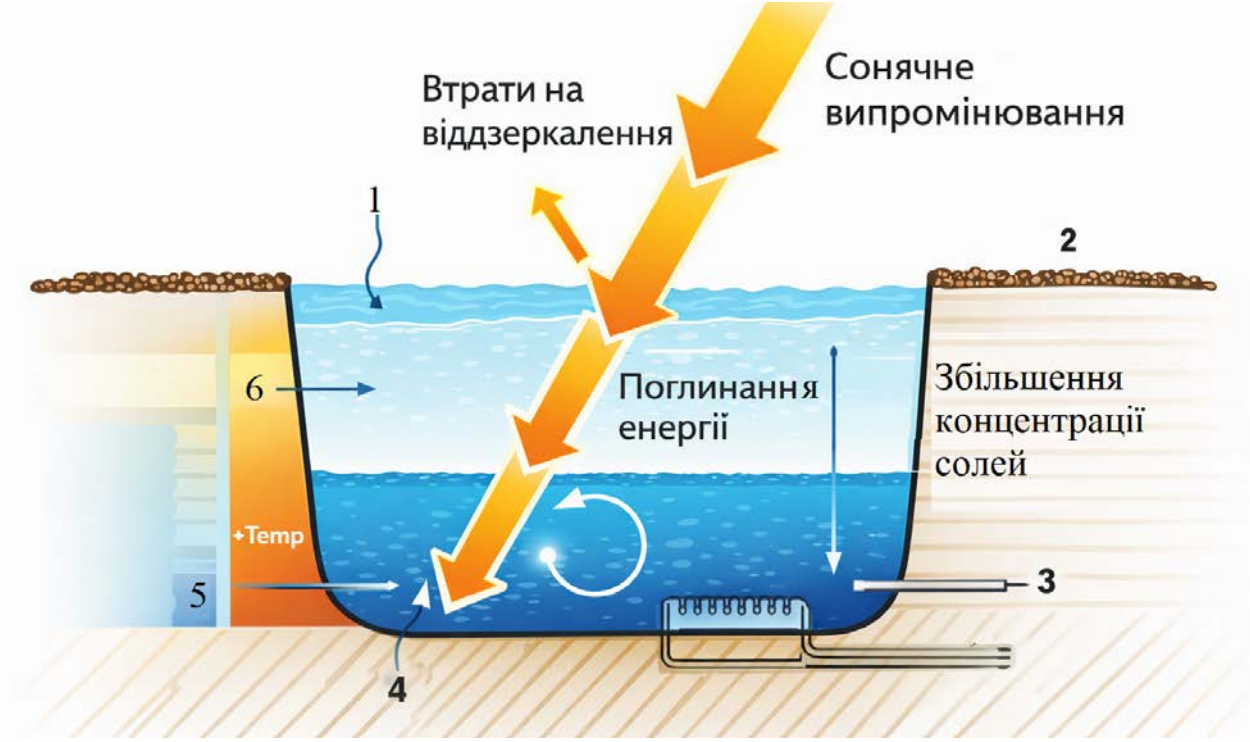

Рис. 3.11. Схема сонячного басейну з градієнтом концентрації солі : 1 - поверхневий шар води; 2 - поверхня землі; 3 - вихід гарячого соляногорозчину до споживача тепла або до теплообмінника; 4 - конвективна (що акумулює) область; 5 - повернення холодного соляного розчину; 6 - неконвективний (що ізолює) шар.

Були запропоновані і розроблені системи акумуляції на основі використання теплоти фазового переходу для зарядки і розрядки повітрям (рис. 2.12) або водою (рис. 2.13). На рис. 2.14 показаний варіант тепло обмінника з обребреними кільцевими каналами з роздільними контурами зарядної і розрядної середовищ. Таким чином, теплообмінник дозволяє проводити одночасно зарядку і розрядку. Кожен теплообмінний елемент складається з внутрішньої і зовнішньої трубок, тепловий контакт між якими забезпечується подовжніми ребрами з матеріалу з хорошою теплопровідністю (наприклад, алюмінію). Кільцевий простір між ребрами заповнений матеріалом, що акумулює енергію фазового переходу (рівну теплоті плавлення). У цьому варіанті система теплової акумуляції працює як гібридний акумулятор, в якому використовуються теплота фазового переходу і теплота нагріву робочого тіла.

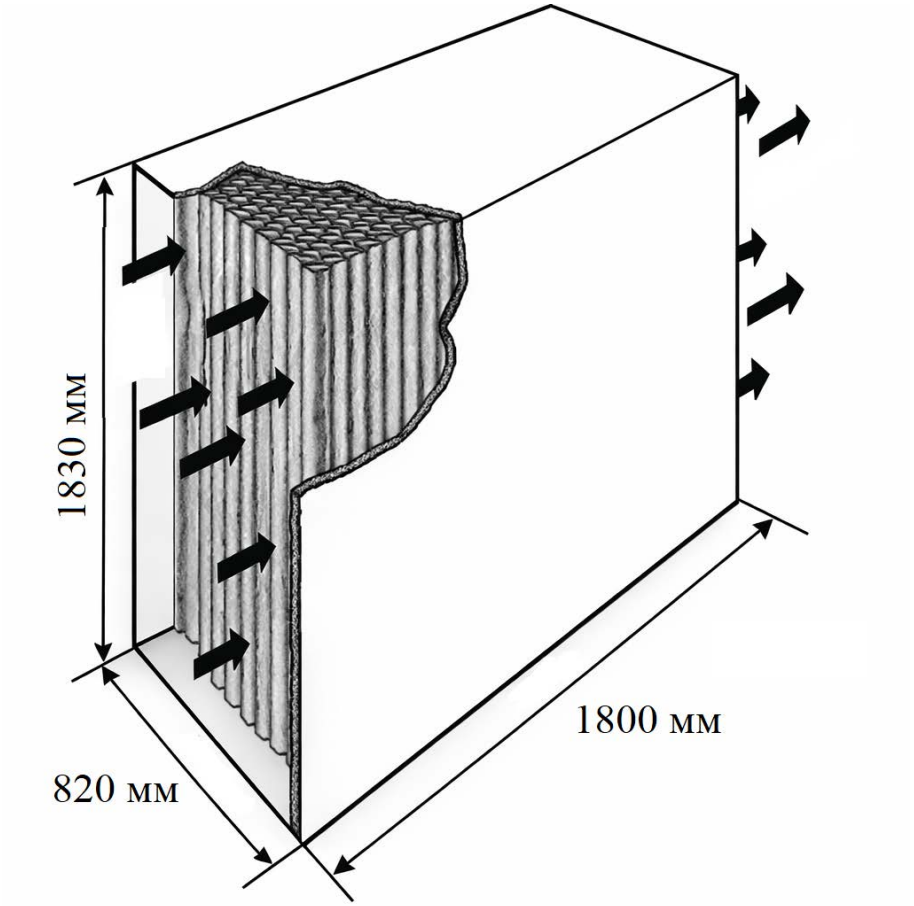

Рис. 2.12. Блок сонячних енергоакумулюючих стержнів з 2400 кг $CaCl_2 \cdot 6H_2O$ ($T_ф$=27,2 °С) в поліетиленових циліндрах для опалювання квартири.

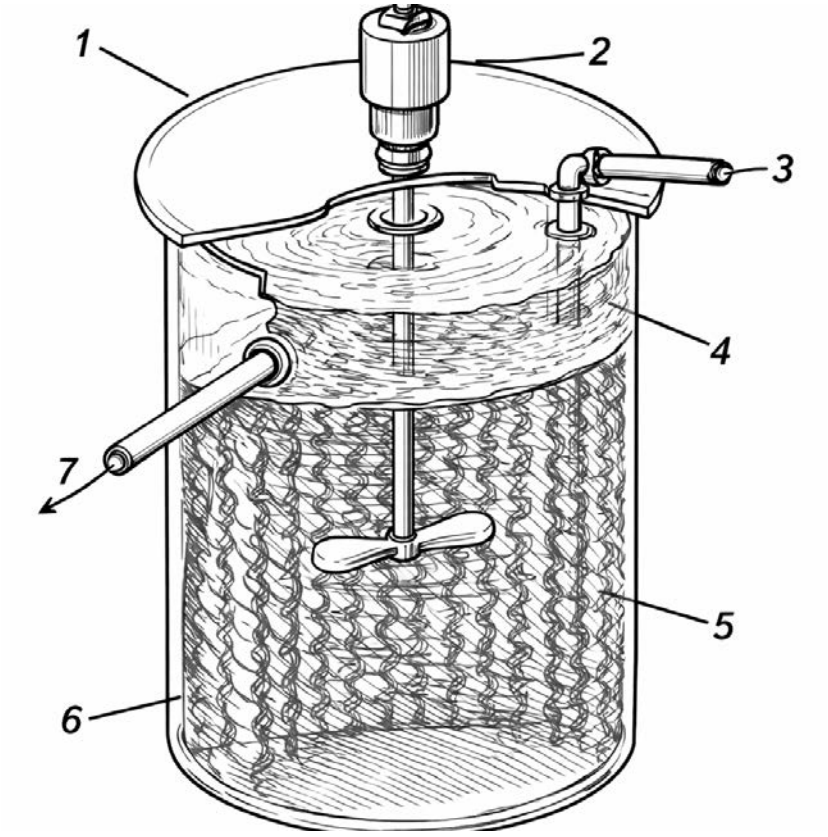

Рис. 2.13. Агрегат CALMAC для акумуляції теплоти фазового переходу на$Na_2S_2O_3$ - $5H_2O$ або $MgCl_2$ -$6H_2O$: 1 - знімна кришка; 2 - двигун для перемішування; 3 - вхід води; 4 - гідрат солі; 5 - пластиковий теплообмінник; 6 - бак; 7 - вихід води.

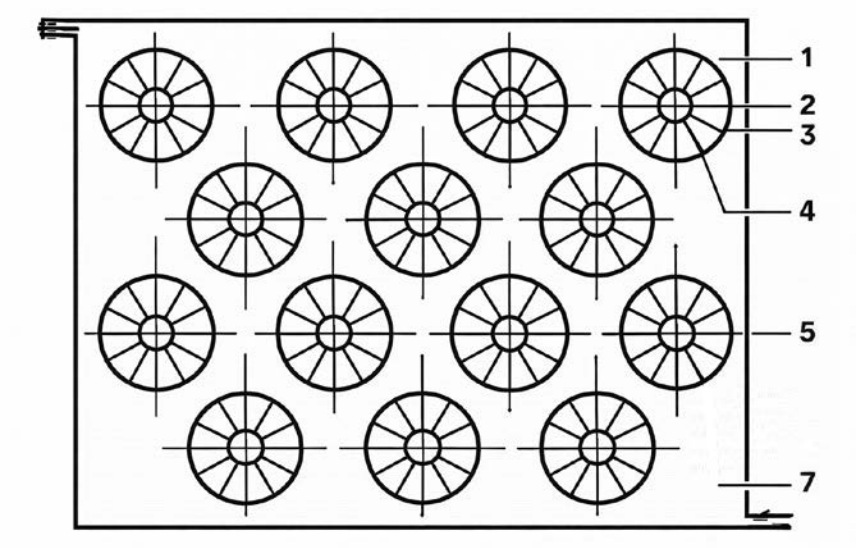

Рис. 2.14. Теплообмінник з обребреними кільцевими каналами для акумуляції енергії з використанням теплоти фазового переходу : 1 - елемент теплообмінного блоку : 2 - термоакумулююча речовина; 3 - подовжнє ребро; 4 - гарячий теплоносій; 5 - резервуар (кожух); 5 - холодний теплоносій для розрядки.

Колектори сонячного тепла розділяються на активні і пасивні; роль останніх часто виконують самі конструкційні деталі будівлі. Такі деталі повинні мати прозорі зовнішні поверхні (у вигляді вікон або прозорих покриттів) і високу ефективну теплоємність.

Правильно вибрані властивості системи ТАЕ сприяють вирівнюванню температури в приміщенні. Якщо такі властивості сонячної системи ТАЕ, як товщина, теплопровідність і теплоємність колектора, вибрані правильно, то сонячні теплові потоки, що проходять через зовнішню поверхню, можуть бути затримані приблизно на 12 год, що внесе, таким чином, сприятливий вклад до теплового балансу приміщення на режимах як нагріву, так і охолодження.

Питання до теми №2

1. Інтенсивність сонячного випромінювання;
2. Фотоелектричні властивості p - n переходу;
3. Конструкція простого сонячного елементу;
4. Вольт-амперна характеристика сонячного елементу;
5. Еквівалентна схема освітленого p – n переходу з опором навантаження;
6. Класифікація і основні елементи геліосистем
7. Принципова схема системи сонячного теплопостачання;
8. Концентруючі геліоприймачі
9. Плоскі сонячні колектори
10. Енергетичний баланс теплового акумулятора;
11. Класифікація акумуляторів тепла;
12. Системи акумуляції
13. Теплова акумуляція для сонячного обігріву і охолодження приміщень.

ТЕМА № 3. ВІТРОВА ЕНЕРГЕТИКА

3.1. Енергія вітру і можливості її використання

Основною причиною виникнення вітру є нерівномірне нагрівання сонцем земної поверхні. Земна поверхня неоднорідна: суша, океани, гори, ліси обумовлюють різне нагрівання поверхні під однією і тією ж широтою. Обертання Землі також викликає відхилення повітряних течій. Усі ці причини ускладнюють загальну циркуляцію атмосфери. Виникає ряд окремих циркуляції, в тій або іншій мірі пов'язаних один з одним.

На екваторі у земної поверхні лежить зона затишшя із слабкими змінними вітрами. На північ і на південь від зони затишшя розташовані зони пасатів, які внаслідок обертання Землі із заходу на схід мають відхилення до заходу. Таким чином, в північній півкулі постійні вітри приходять з північного сходу, в південному з південного сходу, як показано на схемі рис. 3.1. Пасати тягнуться приблизно до 30° північною і південною широт і відрізняються рівномірністю повітряних течій по напряму і швидкості. Середня швидкість південно-східних пасатів північної півкулі у поверхні землі досягає 6-8 м/сек. Ці вітри поблизу великих континентів порушуються сильними річними коливаннями температури і тиску над материками. Висота шару пасатів тягнеться від 1 до 4 км. Вище над пасатами знаходиться шар змінних вітрів, а над цим шаром знаходиться зона антипасатів, що дмуть в напрямі, протилежному до напряму пасатів. Висота шару антипасатів міняється від 4 до 8 км залежно від пори року і від місця.

У субтропічних широтах в поясах високого тиску зони пасатів змінюються штильовими областями. На північ і південь від цих областей приблизно до 70°на усіх висотах дмуть вітри між західним і південно-західним румбами в північній півкулі і між західним і північно-західним – впівденній півкулі. У цих широтах, крім того, в атмосфері безперервно виникають і затухають вихрові рухи, що ускладнюють просту схему загальної циркуляції атмосфери, показану на рис. 3.1.

Місцеві вітри. Особливі місцеві умови рельєфу земної поверхні (моря, гори і тому подібне) викликають місцеві вітри.

Бризи. Внаслідок зміни температур вдень і вночі виникають берегові морські вітри, які називаються бризами.

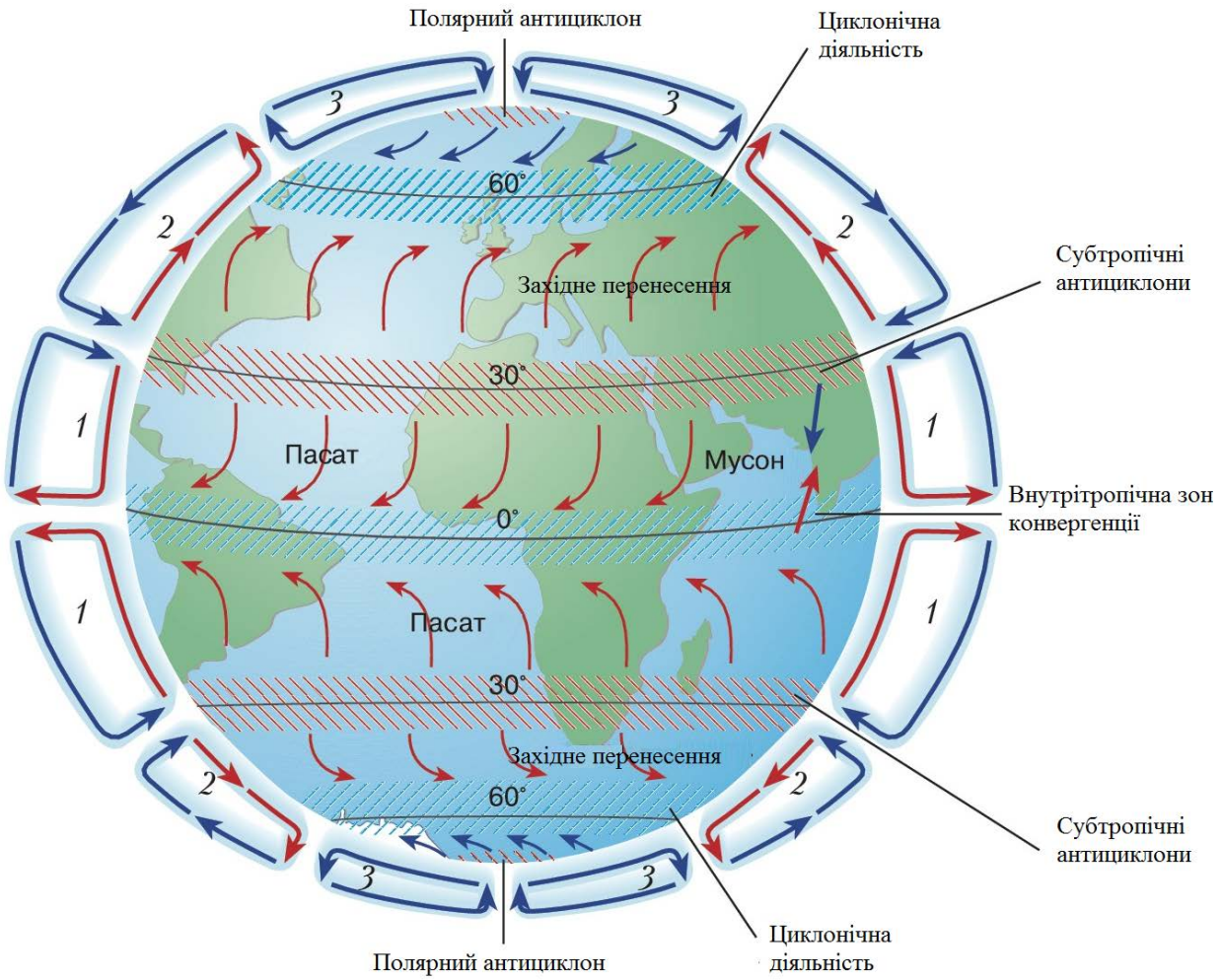

Рис. 3.1. Схема загальної циркуляції земної атмосфери

Вдень при сонячній погоді суша нагрівається сильніше, ніж поверхня моря, тому нагріте повітря стає менш щільним і піднімається вгору. Разом з цим холодніше морське повітря спрямовується на сушу, утворюючи морський береговий вітер. Повітря, що піднімається над сушею, тече у верхньому шарі у бік моря і на деякій відстані від берега опускається вниз.

Таким чином виникає циркуляція повітря з напрямом внизу - на берег моря, вгорі - від суші до моря. Вночі над сушею повітря охолоджується сильніше, ніж над морем, тому напрям циркуляції змінюється: внизу повітря тече на морі, а вгорі з моря на сушу. Зона поширення бризу близько 40 км у бік моря і 40 км у бік суші. Висота поширення бризів в наших широтах досягає від 200 до 300 м. У тропічних країнах бризи спостерігаються майже протягом усього року, а в помірному поясі тільки влітку, при жаркій погоді. У нас бризи можна спостерігати влітку біля берегів Чорного моря.

Мусони. Річні зміни температури в берегових районах великих морів і океанів також викликають циркуляцію, аналогічну бризам, але з річним періодом. Ця циркуляція, більшого розміру, ніж бризы,. називається

мусонами. Виникають мусони з наступних причин. Влітку континент нагрівається сильніше, ніж навколишні його моря і океани; завдяки цьому над континентом утворюється знижений тиск, в повітря внизу спрямовується до континенту від океанів, а вгорі навпаки, тече від континентів до навколишніх океанів. Ці вітри носять назву морських мусонів. Взимку континенти значно холодніші, ніж поверхня моря; над ними утворюється зона підвищеного тиску; внаслідок цього нижні шари повітря прямують від континенту до океанів, а у верхніх шарах - навпаки, від океанів до континентів. Ці вітри називаються материковими мусонами.

Сильні мусони можна спостерігати на південному узбережжі Азії - в Індійському океані і Аравійському морі, де влітку вони мають південно-західний напрям, а взимку - північно-східне. У східних берегів Азії також спостерігаються мусони. Зимою дмуть суворі північнозахідні материкові вітри; влітку південно-східні і південні морські вологі вітри. Ці вітри значно впливають на клімат Далекосхідного краю.

3.2.Класифікація вітродвигунів за принципом роботи

Існуючі системи вітродвигунів за схемою пристрою вітроколеса і його положенням в потоці вітру розділяються на три класи.

Перший клас включає вітродвигуни, у яких вітрове колесо розташовується у вертикальній площині; при цьому площина обертання перпендикулярна напряму вітру, і, отже, вісь вітроколеса паралельна потоку. Такі вітродвигуни називаються крильчатими.

Швидкохідністю називається відношення окружної швидкості кінця лопаті до швидкості вітру (3.1):

$$Z = \frac{wR}{V} \tag{3.1}$$

Крильчаті вітродвигуни, згідно ГОСТ 2656-44, залежно від типу вітроколеса і швидкохідності, розділяються на три групи (рис. 3.2.).

− вітродвигуни багатолопасні, тихохідні, з швидкохідністю $Zn \leq 2$.

− вітродвигуни малолопасні, тихохідні, у тому числі вітряні млини, з швидкохідністю $Zn > 2$.

− вітродвигуни малолопасні, швидкохідні, $Zn \geq 3$.

До другого класу відносяться системи вітродвигунів з вертикальною віссю обертання вітрового колеса. За конструктивною схемою вони розбиваються на групи:

− каруселні, у яких неробочі лопаті або прикриваються ширмой, або розташовуються ребром проти вітру;

− роторні вітродвигуни системи Савониуса.

До третього класу відносяться вітродвигуни, що працюють за принципом водяного млинового колеса і звані барабанними. У цих вітродвигунів вісь обертання горизонтальна і перпендикулярна напряму вітру.

Основні недоліки каруселних і барабанних вітродвигунів витікають з самого принципу розташування робочих поверхонь вітроколеса в потоці вітру, а саме:

1. Оскільки робочі лопаті колеса переміщаються у напряміповітряного потоку, вітрове навантаження діє не одночасно на усі лопаті, а по черзі. В результаті кожна лопать випробовує переривчасте навантаження, коефіцієнт використання енергії вітру виходить дуже низьким і не перевищує 10%, що встановлено експериментальними дослідженнями.

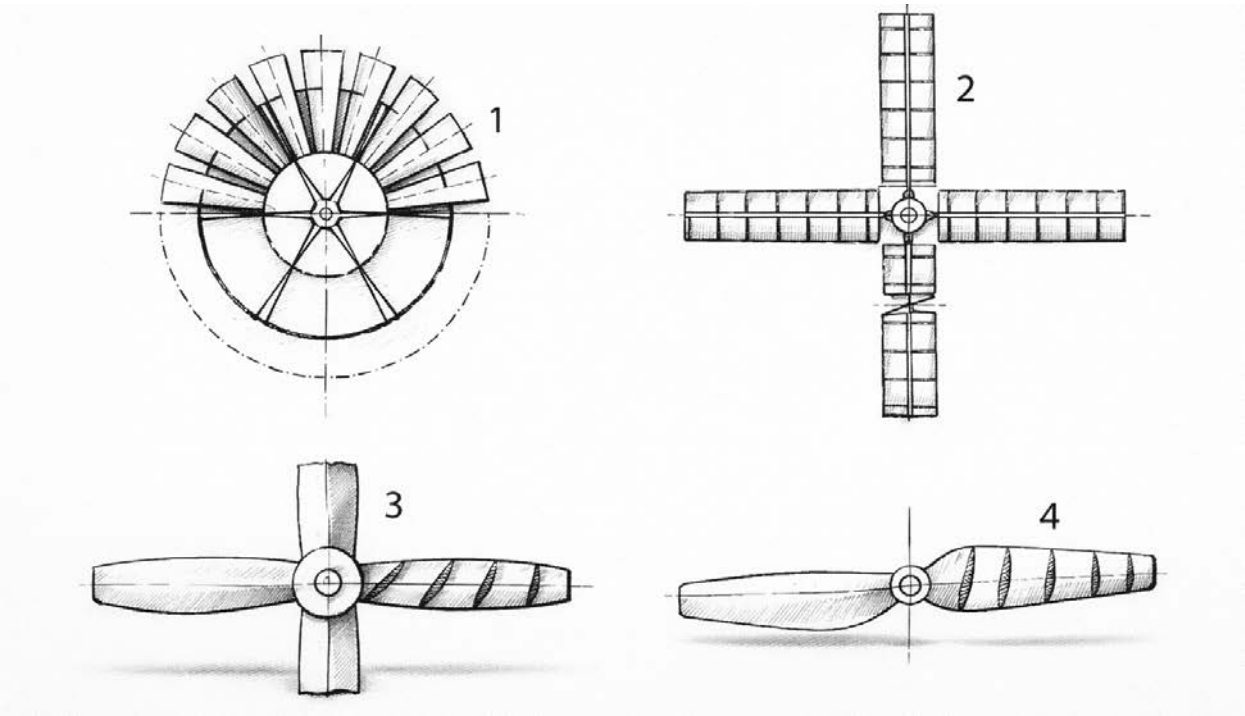

Рис. 2.2. Схеми вітроколес крильчатих вітродвигунів : 1 – многолопасних; 2-4 – малолопасних

2. Рух поверхонь вітроколеса у напрямі вітру не дозволяє розвинутивеликі оберти, оскільки поверхні не можуть рухатися швидше за вітер.

3. Розміри використовуваної частини повітряного потоку малі в порівнянні з розмірами самого колеса, що значно збільшує його вагу,

віднесену до одиниці встановленої потужності вітродвигуна.

У роторних вітродвигунів системи Савоніуса найбільший коефіцієнт використання енергії вітру 18%.

Крильчаті вітродвигуни вільні від перерахованих вище недоліків карусельних і барабанних вітродвигунів. Хороші аеродинамічні якості крильчатих вітродвигунів, конструктивна можливість виготовляти їх на велику потужність, відносно легка вага на одиницю потужності - основні переваги вітродвигунів цього класу.

Комерційне застосування крильчатих вітродвигунів почалося з 1980 року. За останні 14 років потужність вітродвигунів збільшилася в 100 разів: від 20-60 кВт при діаметрі ротора близько 20 м на початку 1980 років до 5000 кВт при діаметрі ротора понад 100 м до 2003 року (рис. 3.3). Деякі прототипи вітродвигунів мають ще більшу потужність і діаметр ротора. За той же період вартість генерованої вітряками енергії знизилася на 80 %. Залежність вартості електроенергії від потужності вітродвигунів при їх розташуванні на узбережжі і далеко від моря представлена на рис. 3.4 (у цінах 2001 р.).

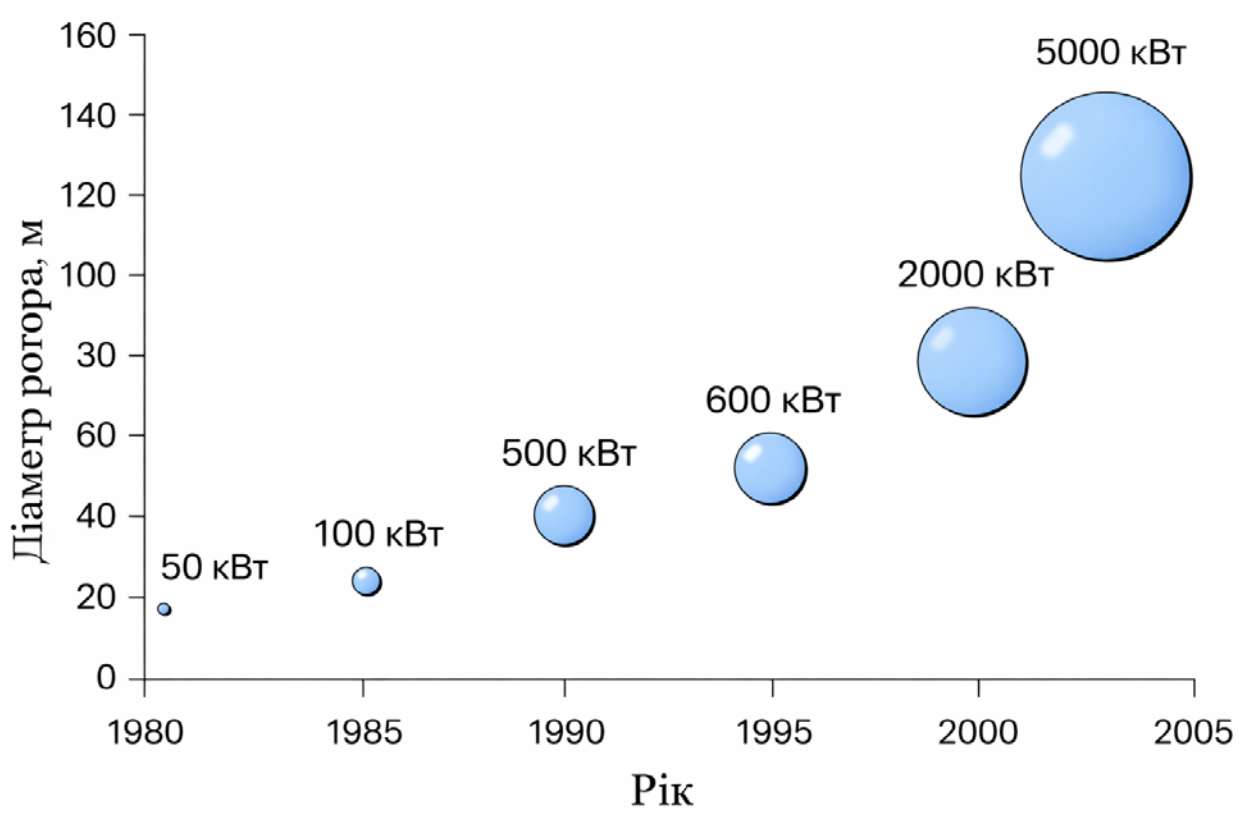

Рис. 3.3. Зростання потужності і діаметру ротора комерційних вітродвигунів

Робота поверхні при дії на неї сили вітру

Швидкістю вітру називають відстань в метрах, прохідну масою

повітря протягом однієї секунди. Швидкість вітру постійно міняється за величиною і напрямом. Причиною цих змін є нерівномірне нагрівання земної поверхні і нерівності рельєфу місцевості.

Швидкість вітру є найважливішою характеристикою технічних властивостей вітру. Потік вітру з поперечним перерізом F має кінетичну енергію, визначувану виразом (3.2):

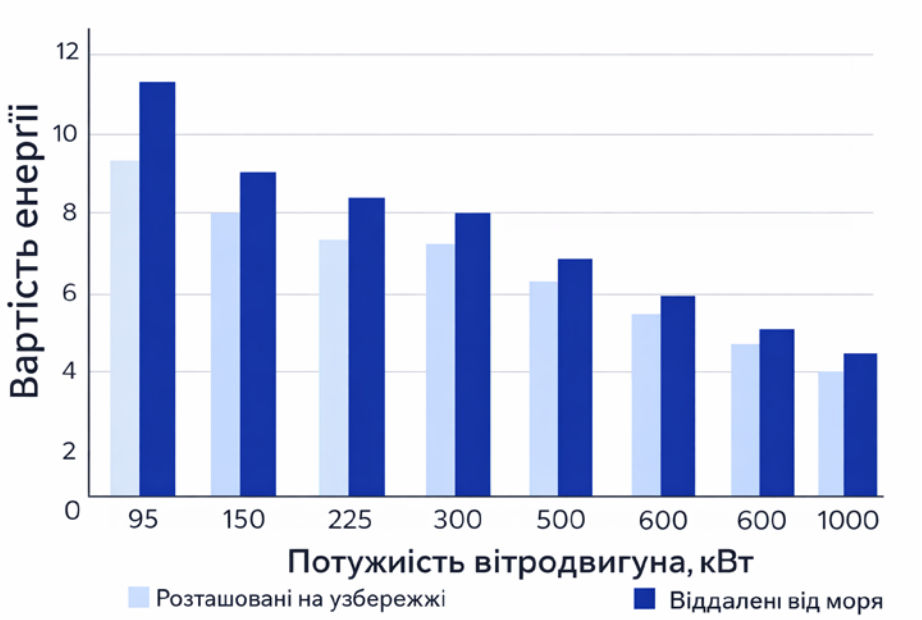

Рис. 3.4. Залежність вартості електроенергії від потужності вітродвигунів при їх розташуванні на узбережжі і далеко від моря

$$\frac{mV^2}{2} \tag{3.2}$$

Маса повітря, що протікає через поперечний переріз F із швидкістюV,

$$m = cFV \tag{3.3}$$

Підставивши (3.3) у вираз кінетичної енергії (3.2), отримаємо (3.4):

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho FV^3}{2} \tag{3.4}$$

звідки витікає, що енергія вітру змінюється пропорційно кубу його швидкості.

Подивимося, скільки відсотків енергії вітру може перетворити на

корисну роботу поверхня, що поставлена перпендикулярно до напряму вітру і переміщається в цьому ж напрямі, що має місце, наприклад, у вітродвигунів карусельного типу.

Потужність T визначається твором сили P на швидкість V (3.5):

$$T = PV \tag{3.5}$$

Одну і ту ж роботу можна отримати або за рахунок великої сили, при малій швидкості переміщення робочої поверхні, або, навпаки, за рахунок малої сили, а отже, і малій поверхні, але при відповідно до збільшеної швидкості її переміщення.

Допустимо, ми маємо поверхню F, поставлену перпендикулярно до напряму вітру. Повітряний потік внаслідок гальмування його поверхнею отримає підпір і обтікатиме її і чинити тиск силою P_x.

Внаслідок дії цієї сили поверхня переміщатиметься у напрямі потоку з деякою швидкістю U (рис. 3.5); робота при цьому дорівнюватиме твору сили на швидкість U, з якою переміщається поверхня F, тобто:

$$T = P_x U \tag{3.6}$$

де P_x– сила опору, яка дорівнює $P_x = C_x F \frac{\rho}{2}(V-U)^2$.

де C_x– аеродинамічний коефіцієнт лобового опору; F– поверхня миделевого перерізу теля, тобто проекції площі тіла на площину, перпендикулярну напряму повітряного потоку.

В цьому випадку вітер набігає на поверхню з відносною швидкістю, яка дорівнює (3.7):

$$W = V - U \tag{3.7}$$

Підставивши значення P_x з рівняння (3.6) в рівняння (3.7), отримаємо (3.8):

$$T = C_x F \frac{\rho}{2}\left(V - U^2\right)U \tag{3.8}$$

Визначимо відношення роботи, рухомою поверхнею, що розвивається, і вираженою рівнянням (3.8), до енергії вітрового потоку, що має поперечний переріз, рівний цій поверхні, а саме:

$$\xi = \frac{C_x F \frac{\rho}{2}\left(V - U^2\right)U}{F\frac{\rho V^3}{2}} = C_x\left(V-U\right)^2\frac{U}{V^3} \qquad (3.9)$$

Після перетворень отримаємо (3.10):

$$\xi = C_x\left(1-\frac{U}{V}\right)^2\frac{U}{V} \qquad (3.10)$$

Величину ξ називають коефіцієнтом використання енергії вітру.

З рівняння (3.10) ми бачимо, що ξ залежить від швидкості переміщення поверхні у напрямі вітру. При деякому значенні швидкості U коефіцієнт ξ набуває максимального значення. Насправді, якщо швидкість переміщення поверхні дорівнює нулю $U = 0$, то робота вітру також дорівнює нулю. Якщо U=V, тобто поверхня переміщається із швидкістю вітру, робота також дорівнюватиме нулю, оскільки немає сили опору, за рахунок якої здійснюється робота. Звідси витікає, що значення швидкості U знаходиться в межах між $U = 0$ і U =V .

Встановлено, щоб отримати максимальне ξ, поверхня повинна переміщатися з швидкістю:

$$U = \frac{1}{3}V \qquad (3.11)$$

Максимальний коефіцієнт використання енергії вітру при роботі поверхні силою опору не може бути більше $\xi = 0{,}192$.

Робота вітрового колеса крильчатого вітродвигуна

Крильчаті вітроколеса працюють за рахунок косого удару при русі лопатей перпендикулярно до напряму швидкості вітру в протилежність до прямого удару, розглянутого у попередньому випадку. Пристрій такого колеса показаний на рис. 3.5.

На горизонтальному валу закріплені крила, число яких у сучасних вітродвигунів буває від 2 і більше. Крило вітроколеса складається з маху *а* і лопаті *б*, закріплюваною на маху так, що вона утворює з площиною обертання деякий кут ϕ. Цей кут називають кутом заклинювання лопаті (рис. 3.7). При цьому на її елементи набігає повітряний потік з відносною швидкістю W під кутом α, який називають кутом атаки, і діє з силою R. Кути ϕі α значною мірою визначають ефективність крил. Силу R розкладають

насили P_x і P_y (рис. 3.7, а). СилиP_x чинять тиск у напрямі вітру, який називається лобовим тиском. СилиP_y діють в площині $y - y$ обертання вітроколеса і створюють момент, що крутить.

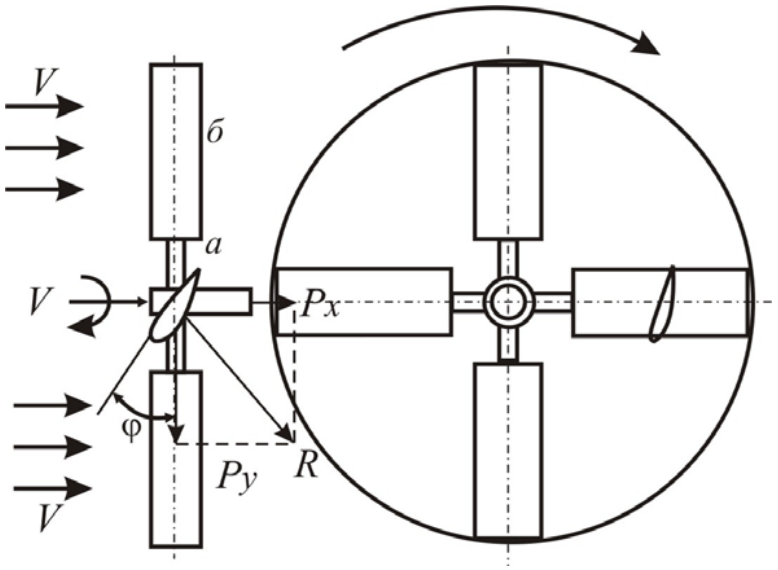

Рис. 3.5. Конструктивна схема крильчатого вітроколеса

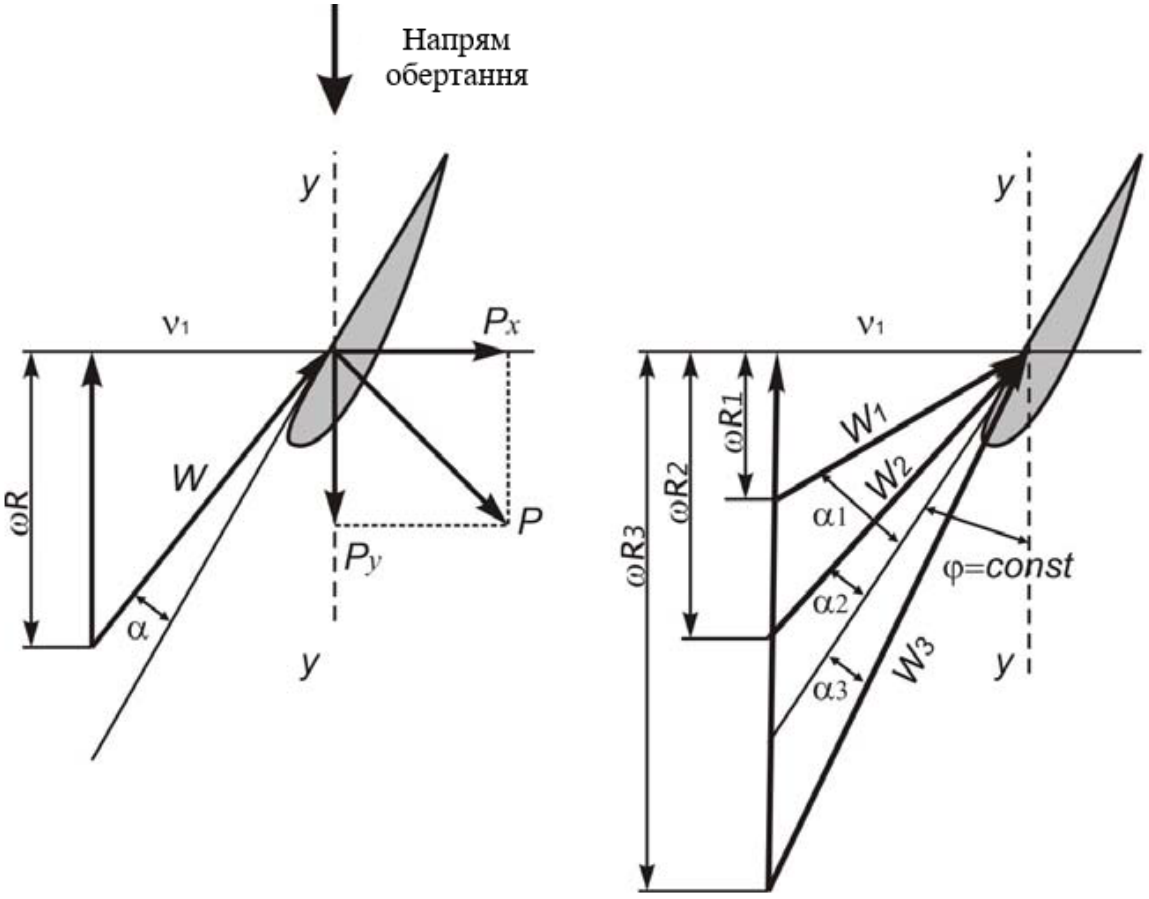

Рис. 3.6. а - схема дії сил повітряного потоку на елемент лопаті; б - графічне зображення відносного потоку, що набігає на елементи лопаті, розташовані на різних радіусах ветроколеса.

Максимальні сили, що приводять колесо в обертання, виходять при деякому значенні кута атаки α, тобто кута нахилу відносного потоку до поверхні лопаті. Зважаючи на те що окружна швидкістю довжині крила не однакова, а зростає у міру видалення його елементів від осі обертання вітроколеса, відносна швидкість W набігання потоку на лопать також зростає. Разом з цим убуває кут атаки α, і при деякій окружній швидкості wR, де w кутова швидкість, цей кут стане негативним (рис. 3.6, б). Отже, не усі елементи крила матимуть максимальну підйомну силу.

Якщо ми зменшуватимемо кут ϕ кожного елементу лопаті у міру видалення його від осі обертання так, щоб найвигідний кут атаки α приблизно зберігався постійним, то ми отримаємо умову, при якій приблизно усі елементи лопаті працюватимуть зі своєю максимальною підйомною силою. Лопать із змінним кутом заклинювання з отримує форму гвинтової поверхні.

Правильні кути заклинювання лопаті при хорошій аеродинамічній якості профілю, а також ширині, відповідній заданій швидкохідності, забезпечують високий коефіцієнт використання енергії вітру. У добре виконаних моделей він досягає 46%.

3.2 Теорія ідеального вітряка

Ідеальним вітряком називають вітроколесо, у якого:

1. Вісь обертання паралельна швидкості вітру;

2. Нескінченне велике число лопатей дуже малої ширини;

3. Профільний опір крил дорівнює нулю, і циркуляція уздовж лопаті постійна;

4. Втрачена швидкість повітряного потоку на вітроколесі постійна по усій поверхні вітряка, що змітається;

5. Кутова швидкість прагне до нескінченності.

Теорію ідеального вітряка уперше розробив в 1914 р.. В. П. Ветчинкін на основі теорії ідеального грібного гвинта. У цій роботі він встановив поняття коефіцієнта використання енергії вітру ідеальним вітряком.

У 1920 р. проф. Н.Е. Жуковський виклав теорію "Вітряного млина НЕЖ", де зробив висновок коефіцієнта використання енергії вітру ідеальним вітряком.

Аналогічні теорії були розроблені пізніше також в нашій країні проф. Г. Х. Сабініним і акад. Г. Ф. Проскура.

Теорія ідеального вітряка проф. Н. Е. Жуковського носить назву класичної теорії; вона встановлює, що максимальний коефіцієнт

використання енергії вітру ідеальним вітряком дорівнює 0,593.

Якнайповніше, з точки зору практичного застосування, теорія ідеального вітряка викладена проф. Г. Х. Сабініним, згідно якої коефіцієнт використання енергія вітру ідеальним вітряком рівний 0,687. Відмінність цієї теорії від колишніх теорій полягає в тому, що при визначенні осьової сили тиску потоку на вітроколесо імпульс сил підраховується по вихровому соленоїду в тому місці, де він набув вже сталої циліндричної форми, а не у момент його освіти, як приймалося колишніми теоріями. Оскільки соленоїд в циліндричній частині має площу перерізу більшу, ніж площа, ометаемая вітроколесом, то осьова сила і коефіцієнт використання енергії вітру, по теорії Г. Х. Сабініна, виходять дещо великими.

Класична теорія ідеального вітряка

Представимо рівномірний потік вітру, що набігає на ідеальне вітроколесо із швидкістю V в перерізі AA' (рис. 3.8). У перерізі ВВ′ на вітроколесі швидкість буде $V_1 = V - v_1$, а на деякій відстані позаду вітряка в перерізі СС′ швидкість буде $V_2 = V - v_2$.

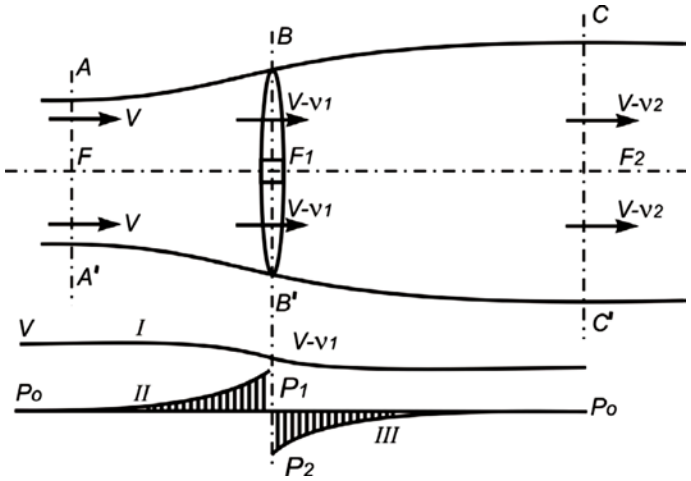

Рис. 3.8. Характеристика повітряного потоку, що протікає через вітроколесо

При цьому вітроколесо, що обертається, створить підпір, внаслідок чого швидкість потоку, у міру наближення до вітряка і деякий час за вітряком, падає, як показано кривій I на рис. 3.8. Разом з цим тиск повітря p, у міру наближення до вітряка, підвищується (крива II), і при проходженні через омітаєму поверхню воно різко падає. За вітряком утворюється деяке розрідження $p_0 - p_2$, яке, у міру видалення від вітряка, асимптотично наближається до нуля, тобто відновлюється нормальний тиск (крива III). Втрату швидкості за ідеальним вітряком можна встановити за допомогою рівняння Бернулі (3.12):

$$p_2 + \frac{\rho V_2^2}{2} = p_0 + \frac{\rho V^2}{2} \tag{3.12}$$

Оскільки $p_2 < p_0$, то $V > V_2$

Кінетична енергія вітру перед вітряком дорівнює $\frac{mV^2}{2}$, а за вітряком $\frac{m(V-v_2)^2}{2}$. Різниця цих енергій витрачена на вітроколесі і, у разі відсутностівтрат, може бути отримана як корисна робота (3.13):

$$T_1 = \frac{mV^2}{2} - \frac{m(V-v_2)^2}{2} \tag{3.13}$$

Перетворивши праву частину рівняння, отримаємо (3.14):

$$\frac{m}{2}\left(V^2 - (V-v_2)^2\right) = \frac{m}{2}\left(2Vv_2 - v_2^2\right) = mv_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right) \tag{3.14}$$

Отже:

$$T_1 = mv_2\left(V - \frac{v_2}{2}\right) \tag{3.14}$$

Енергію T_1, сприйняту вітроколесом, можна виразити як твір з сили тиску вітру P на швидкість в площині вітряка $V - v_1$), тобто:

$$T_1 = P \tag{3.15}$$

Лобовий тиск P дорівнює приросту кількості руху струменя, що проходить через ометаєму поверхню, тобто:

$$P = mv^2 \tag{3.16}$$

Підставляючи значення P в рівняння (3.15), отримаємо:

$$T_1 = mv^2 \tag{3.17}$$

Порівнюючи рівняння (3.14) і (3.17) знаходимо, що:

$$m v_2 \left(V - \frac{v_2}{2} \right) = m v_2 \left(V - v_1 \right) \tag{3.18}$$

звідки $v_1 = \frac{v_2}{2}$ чи $v_2 = 2v_1$.

Таким чином втрата швидкості повітряного потоку відбувається не лише в перерізі вітроколеса, але також і на деякій відстані за вітряком, причому повна втрата швидкості в два рази більше втрати на вітроколесі.

Через омітаєму поверхню *F* вітроколеса протікає маса повітря m, кількість якої за 1 секунду буде дорівнювати:

$$m = cFV \tag{3.19}$$

Підставляючи значення маси повітря у вираження кінетичної енергії вітру перед вітроколесом, отримаємо:

$$\frac{mV^2}{2} = \frac{\rho F V^3}{2} \tag{3.20}$$

Узявши відношення секундної роботи, сприйнятої ідеальним вітроколесом до тієї енергії вітру, яка протікала б через переріз, рівний омітаємої поверхні вітряка, отримаємо ідеальний коефіцієнт використання енергії вітру ξ_i.

$$\xi_i = \frac{P\left(V - v_1\right)}{F\frac{\rho V^3}{2}} \tag{3.21}$$

Перетворимо це рівняння:

$$\xi_i = \frac{P\left(V - v_1\right)}{F\frac{\rho V^3}{2}} = 2\frac{P}{F\rho V^2}\frac{V - v_1}{V} \tag{3.22}$$

вираз $B = \frac{2P}{F\rho V^2}$ називають коефіцієнтом навантаження на ометаємую площу, або коефіцієнтом лобового тиску.

Підставивши в це рівняння $P = \rho V\left(V - v_1\right)v_2 = \rho V\left(V - v_1\right)2v_1$ і позначивши

$\frac{v_1}{V} = e$, після скорочень отримаємо (3.23):

$$B = \frac{2\rho F\left(V - v_1\right)2v_1}{\rho F V^2} = \frac{4\left(V - v_1\right)v_1}{V^2} = 4e\left(1 - e\right) \tag{3.23}$$

Так само для ξ отримаємо (3.24):

$$\xi_i = \frac{\rho F\left(V - v_1\right)^2 2v_1}{F\frac{\rho V^3}{2}} = \frac{4\left(V - v_1\right)^2 v_1}{V^3} = 4e\left(1 - e\right)^2 \tag{3.24}$$

Відношення $\frac{v_1}{V} = e$ називають коефіцієнтом гальмування.

Визначимо значення e, при якому ξ_i матиме максимальну величину. Для цього візьмемо першу похідну і прирівняємо її нулю, тобто:

$$\frac{d\xi_i}{de} = \frac{d}{de}\left(4e\left(1 - e\right)^2\right) = \frac{d}{de}\left(4e - 8e^2 + 4e^3\right) = 0 \tag{3.25}$$

Чи $\frac{d\xi_i}{de} = 4 - 16e + 12e^2 = 0$, звідки $3e^2 - 4e + 1 = 0$.

Вирішуючи цю рівність, знаходимо, що ξ_i набуває максимальногозначення, коли e = 1/3 при цьому $\xi_i = 4\frac{1}{3}\left(1 - \frac{1}{3}\right)^2 = 0.593$.

З рівняння знаходимо коефіцієнт навантаження на омітаєму площу при максимальному ξ_i $B = 4\frac{1}{3}\left(1 - \frac{1}{3}\right) = 0.888$.

Таким чином, з класичної теорії ідеального вітряка витікають наступні основні положення:

1. Максимальний коефіцієнт використання енергії вітру ідеальноговітроколеса дорівнюєξ_i = 0,593.

2. Втрата швидкості в площині вітроколеса дорівнює одній третинішвидкості вітру : $v_1 = 13V$.

3. Повна втрата швидкості вітру за вітроколесом в два рази більшевтрати швидкості в площині вітроколеса : $v_2 = 2/3\ V$. Таким чином, швидкість вітру за вітроколесом в три рази менше швидкості вітру перед вітроколесом.

4. Коефіцієнт навантаження на омітаєму поверхню вітроколеса дорівнюєB = 0,888.

Задаючись коефіцієнтом гальмування $\frac{v_1}{V} = e$ в межах від 0 до 1 і підраховуючи за допомогою рівнянь, набудемо наступних значень коефіцієнтів ξ_i і B (таблиця 3.1, рис. 3.9).

Таблиця 3.1

Значення коефіцієнтів використання і навантаження залежно від коефіцієнта гальмування

e	0,100	0,200	0,333	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	0,900	1,000
ξ_i	0,324	0,512	0,593	0,576	0,500	0,384	0,252	0,128	0,036	0
B	0,360	0,640	0,888	0,960	1,000	0,960	0,840	0,640	0,360	0

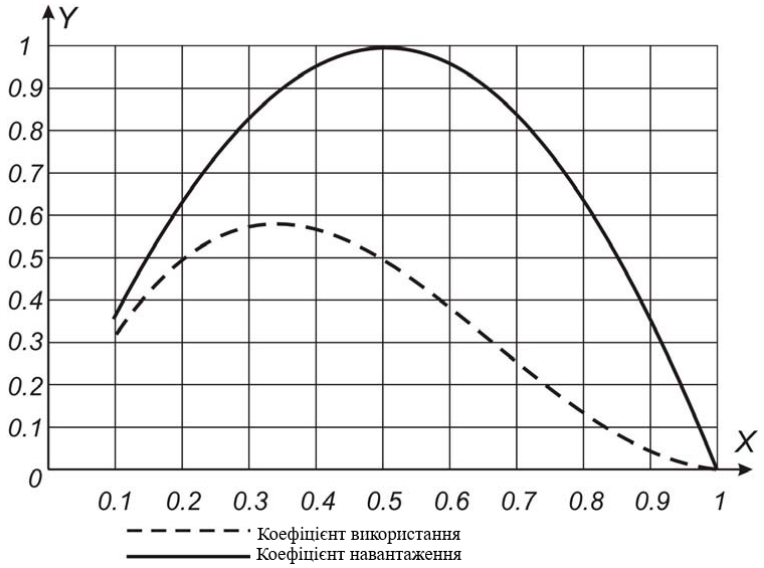

Рис. 3.9. Графіки залежності коефіцієнтів використання і навантаження від коефіцієнта гальмування

Питання до теми №3

1. Енергія вітру і можливості її використання;
2. Схема загальної циркуляції земної атмосфери;
3. Класифікація вітродвигунів за принципом роботи;
4. Зростання потужності і діаметру ротора комерційних вітродвигунів;
5. Робота вітрового колеса крильчатого вітродвигуна;
6. Конструктивна схема крильчатого вітроколеса;
7. Теорія ідеального вітряка;
8. Графіки залежності коефіцієнтів використання і навантаження від коефіцієнта гальмування.

ТЕМА № 4. МАЛА ГІДРОЕНЕРГЕТИКА

4.1 Переваги та недоліки малої гідроенергетики

Під малою гідроенергетикою розуміють виробництво електроенергії за допомогою гідротурбін різної потужності, що встановлюються на постійних водотоках. Як правило, створення гідроелектростанції (ГЕС) вимагає зведення греблі, в якій встановлюються гідротурбіни, але можливе також створення безплотинних ГЕС.

Під мікро-ГЕС мають на увазі станції потужністю до 100 кВт, а під малими (МГЕС) – загальною встановленою потужністю до 30 МВт з потужністю одиничного гідроагрегату до 10 МВт і діаметром робочого колеса гідротурбіни до 3 м. У більшості випадків передбачається, що МГЕС встановлюються на малих річках та водотоках. МГЕС можуть працювати на зарегульованому стоку або без підпори на природному стоку. Для МГЕС використовують також холості скиди через греблі великих гідровузлів і шлюзів, перепади рівнів великих мас води на промислових підприємствах, скидання води гірничо-збагачувальних комбінатів, ТЕЦ, ГРЕС, АЕС тощо. МГЕС будуються також на іригаційних каналах.

Як і будь-який інший спосіб виробництва енергії, застосування малих та мікро-ГЕС має як переваги, так і недоліки.

Серед економічних, екологічних та соціальних переваг об'єктів малої гідроенергетики можна назвати такі. Їхнє створення підвищує енергетичну безпеку регіону, забезпечує незалежність від постачальників палива, що знаходяться в інших регіонах, економить дефіцитне органічне паливо. Спорудження подібного енергетичного об'єкта не потребує великих капіталовкладень, великої кількості енергоємних будівельних матеріалів та значних трудовитрат, що швидко окупається.

У процесі вироблення електроенергії ГЕС не виробляє парникових газів та не забруднює довкілля продуктами горіння та токсичними відходами, що відповідає вимогам Кіотського протоколу. Такі об'єкти є причиною наведеної сейсмічності і порівняно безпечні при природному виникненні землетрусів. Вони не мають негативного впливу на спосіб життя населення, на тваринний світ та місцеві мікрокліматичні умови.

Проблемою малих ГЕС є їхня вразливість з точки зору виходу з ладу, внаслідок чого споживачі залишаються без енергопостачання. Вирішенням проблеми є створення резервних потужностей, що генерують – вітроагрегату, когенеруючої міні-котельні, фотоелектричної установки і т.д.

Найбільш поширений вид аварій на об'єктах малої гідроенергетики – руйнування греблі та гідроагрегатів в результаті переливу через гребінь греблі при несподіваному підйомі рівня води та неспрацьовуванні запірних пристроїв. У деяких випадках МГЕС сприяють замулюванню водоймищ і впливають на руслоформуючі процеси.

Існує певна сезонність у виробленні електроенергії, коли в зимовий та літній періоди через зниження витрати на водотоку потужність МГЕС значно зменшується.

Чинниками, що гальмують розвиток малої гідроенергетики в Україні є:

– відсутність інформації у потенційних користувачів про переваги застосування МГЕС;

– слабке вивчення гідрологічного режиму малих водотоків;

– відсутність науково обґрунтованих методик оцінки та прогнозування можливого впливу на навколишнє середовище та господарську діяльність;

– низька виробнича та ремонтна база підприємств, що виробляють обладнання для МГЕС;

– відсутність серійного устаткування масового будівництва МГЕС.

4.2 Малі ГЕС

Людина ще в давнину звернула увагу на річки як на доступне джерело енергії. Для використання цієї енергії люди навчилися будувати водяні колеса. Цими колесами рухалися млинові жорна та інші установки. Водяний млин є яскравим прикладом найдавнішої гідроенергетичної установки, що збереглася в багатьох країнах до нашого часу майже в первозданному вигляді. До винаходу парової машини енергія води була основною руховою силою з виробництва. У міру вдосконалення водяних коліс збільшувалася потужність гідравлічних установок, що приводять у рух верстати. У першій половині XIX століття було винайдено гідротурбіну, що відкрила нові можливості щодо використання гідроенергоресурсів. З винаходом електричної машини та способу передачі електроенергії на значні відстані почалося освоєння водної енергії шляхом перетворення її на електричну енергію на гідроелектростанціях (ГЕС).

Малі та мікро-ГЕС – об'єкти малої гідроенергетики. Ця частина енерговиробництва займається використанням енергії водних ресурсів та гідравлічних систем за допомогою гідроенергетичних установок малої потужності (від 1 до 3000 кВт). Мала енергетика отримала розвиток у світі в останні десятиліття, в основному через прагнення уникнути екологічних збитків, що завдаються водосховищами великих ГЕС, через можливість

забезпечити енергопостачання у важкодоступних та ізольованих районах, а також через невеликі капітальні витрати при будівництві станцій та швидке повернення вкладених коштів. Будівництво МГЕС має також широкі перспективи розвитку у різних регіонах світу із транскордонними річковими басейнами.

Нині немає загальноприйнятого всіма країнами поняття малої ГЕС. Однак у багатьох країнах як основну характеристику такої ГЕС прийнято її встановлену потужність. До малих, зазвичай, ставляться ГЕС потужністю до 30 МВт. Мала гідроенергетика вільна від багатьох недоліків великих ГЕС і визнана одним із найбільш економічних та екологічно безпечних способів отримання електроенергії, особливо при використанні невеликих водотоків. У малих, мікро- або нано-ГЕС поєднуються переваги великої ГЕС з одного боку та можливість децентралізованої подачі енергії з іншого боку.

4.3 Особливості малих ГЕС

В останні роки поширена практика установки малих гідроелектростанцій. Електростанція подібного типу є установкою, всі види обладнання якого є гідроелектричними пристроями. Залежно від потужностей установок, вони градуюються на міні-ГЕС із потужністю, що не перевищує 10 МВт, мікроГЕС із потужністю, що не перевищує 0,1 МВт, та малі гідроелектростанції з потужністю від 10 до 30 МВт. Схему пристрою гідроелектростанції наведено на рис. 4.1.

Гідроагрегат малої гідроелектростанції складається з енергоблоку, водозабірної установки та елементів керування. За видом гідроресурсів, які використовуються при роботі малих ГЕС, їх можна поділити на:

– станції руслового або приплотинного типу, що мають невеликі за обсягом водосховища;

– міні-станції стаціонарного характеру, у роботі яких використовується енергія вільного потоку рік;

– гідроелектростанції, що працюють із використанням енергії існуючих перепадів рівня води.

Турбіни для гідроагрегатів малих гідроелектростанцій існують:

– осьового типу;

– радіально-осьового виконання;

– ковшової конструкції;

– з поворотно-лопатевими пристроями.

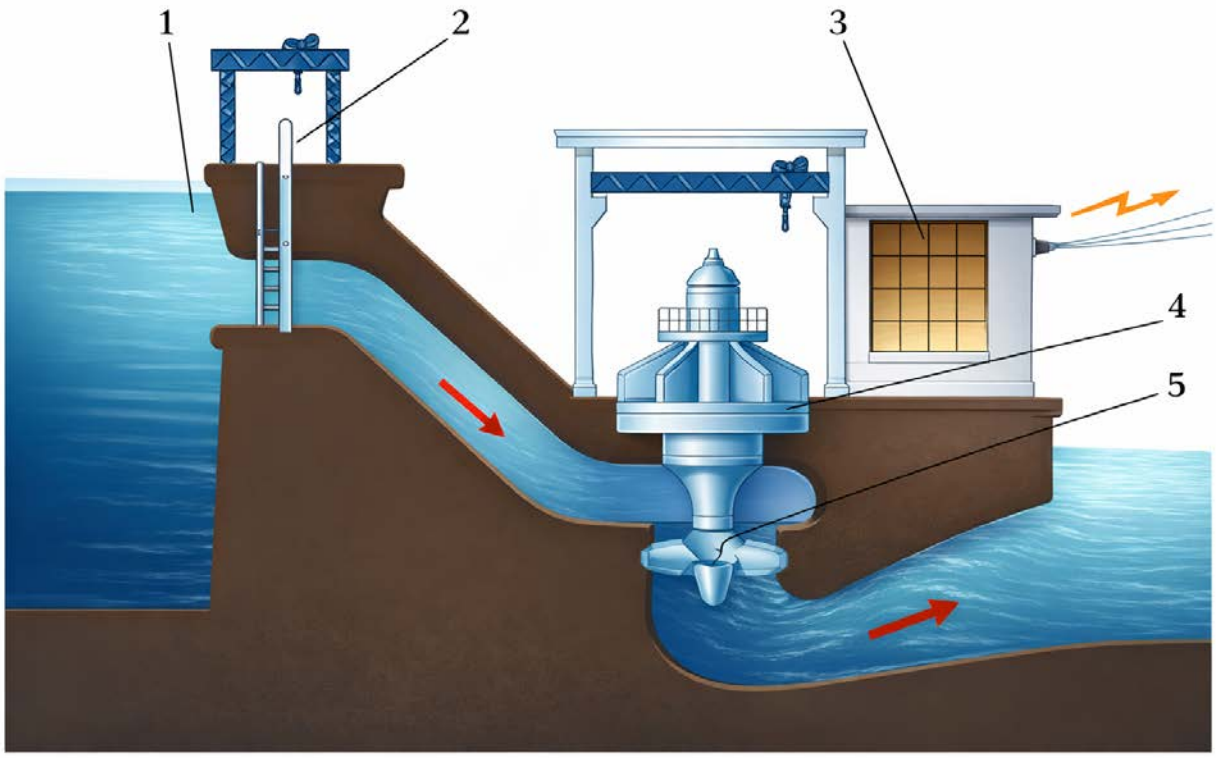

Рис. 4.1. Схема пристрою гідроелектростанції: 1 – водосховище; 2 – затвор; 3 – трансформаторна підстанція із розподільчим пристроєм; 4 – гідрогенератор; 5 – гідравлічна турбіна

Турбіни застосовують залежно від напору води, що використовується гідроелектростанцією. Так, турбіни ковшової та радіально-осьової дії розроблені та застосовуються для високонапірних міні-станцій. Турбіни з поворотно-лопатевими та радіально-осьовими пристроями застосовують на середньонапірних ГЕС. На низьконапірних станціях малої потужності встановлюють турбіни поворотно-лопатевої дії.

Принцип дії всіх видів турбін однаковий, під напором води, що надходить на лопаті, вони здійснюють обертальні рухи. Потужність всіх гідроелектричних міні-станцій залежить від напору води та її витрати, від ККД встановлених генераторів та турбін.

Вибираючи ГЕС малої потужності, необхідно враховувати, що все обладнання має бути адаптоване для конкретних умов, відповідати потребам та призначенню об'єкта та відповідати певним аспектам. Все обладнання має бути оснащене автоматичними системами керування та контролю роботи з можливістю переходу на ручне керування у випадках аварійних ситуацій та раптового відключення електроенергії. Малі ГЕС мають бути обладнані надійними системами захисту та безпеки.

4.4 Переваги та недоліки малих ГЕС

Однією з основних переваг об'єктів малої гідроенергетики є екологічна безпека. У процесі їх спорудження та подальшої експлуатації шкідливих впливів на властивості та якість води немає. Водойми можна використовувати і для рибогосподарської діяльності, як джерела водопостачання населення. Однак і крім цього у мікро- та малих ГЕС чимало переваг. Сучасні станції прості в конструкції та повністю автоматизовані. Електричний струм, що виробляється ними, відповідає вимогам ГОСТу за частотою і напругою, причому станції можуть працювати як в автономному режимі, так і в складі електромережі. Об'єкти малої енергетики не вимагають організації великих водосховищ із відповідним затопленням території та колосальним матеріальним збитком.

Під час будівництва та експлуатації МГЕС зберігається природний ландшафт, практично відсутнє навантаження на екосистему. До переваг малої гідроенергетики, порівняно з електростанціями на викопному паливі, можна також віднести: низьку собівартість електроенергії та експлуатаційні витрати, відносно недорогу заміну обладнання, більш тривалий термін служби ГЕС (40–50 років), комплексне використання водних ресурсів (електроенергетика, водопостачання, меліорація, охорона вод, рибне господарство).

Багато малих ГЕС не завжди забезпечують гарантоване вироблення енергії, будучи сезонними електростанціями. Взимку їхня енерговіддача різко падає, сніговий покрив і льодові явища (лід і шуга) так само, як і літнє маловоддя та пересихання річок можуть взагалі призупинити їхню роботу. Сезонність малих ГЕС вимагає дублюючих джерел енергії, велика кількість може призвести до втрати надійності енергопостачання. Тому в багатьох районах потужність малих ГЕС розглядається не як основна, а як дублююча.

У водосховищ малих ГЕС, особливо гірських і передгірських районів, дуже гостро стоїть проблема їх замулення та пов'язана з цим проблема підйому рівня води, затоплень та підтоплень, зниження гідроенергетичного потенціалу річок та вироблення електроенергії.

Будівництво та реконструкція малих ГЕС дозволить не лише отримати екологічно чисту електроенергію, а й забезпечити електрикою енергодефіцитні райони, де немає централізованого електропостачання. Розвиток малої гідроенергетики сприяє децентралізації загальної енергетичної системи, що дає змогу стабільно забезпечувати важкодоступні регіони електрикою. Енергія, що виробляється малими ГЕС,

використовується найближчими споживачами. При цьому знижуються витрати на її транспортування і підвищується надійність енергопостачання.

4.5 Створення напору та основне обладнання ГЕС

Для створення тиску на ГЕС можуть використовуватись такі схеми:

– греблі, при яких напір створюється греблею;

– деріваційна, коли напір створюється за допомогою деривації (відведення, відхилення), що виконується у вигляді каналу, тунелю або трубопроводу;

– комбінована, в якій напір створюється греблею та деривацією.

Гребельна схема передбачає створення підпору рівня водотоку шляхом спорудження греблі. Водосховище, що при цьому утворюється, може використовуватися в якості регулюючої ємності, що дозволяє періодично накопичувати запаси води і більш повно використовувати енергію водотоку.

У деріваційній схемі відведення води з природного русла здійснюється штучним водоводом, що має менший поздовжній ухил. Рівень води в кінці такого водоводу виявляється вищим за рівень води в річці, і ця різниця рівнів є натиском ГЕС. Чим більший ухил річки і довша деривація, тим більший тиск може бути отриманий. Деривація може бути безнапірною – канал, лоток, безнапірний тунель або напірний – напірний тунель, трубопровід. У практиці зустрічаються змішані схеми ГЕС: гребельно-деріваційні, у яких напір створюється як греблею, і деривацією, і змішані деріваційні, у яких є і напірні і безнапірні водоводи.

Деріваційні ГЕС споруджують на гірських річках та передгірних ділянках, де є значні ухили. За допомогою деривації можуть бути отримані напори 1000 м та більше.

Основним енергетичним обладнанням ГЕС є гідротурбіни та генератори.

Гідравлічна турбіна перетворює енергію руху води на механічну енергію обертання її робочого колеса. Залежно від принципу перетворення енергії гідротурбіни поділяються на активні та реактивні.

Активні турбіни використовують кінетичну частину енергії потоку (швидкісний натиск).

Реактивні турбіни (рис.4.2) використовують переважно потенційну енергію потоку (енергія тиску).

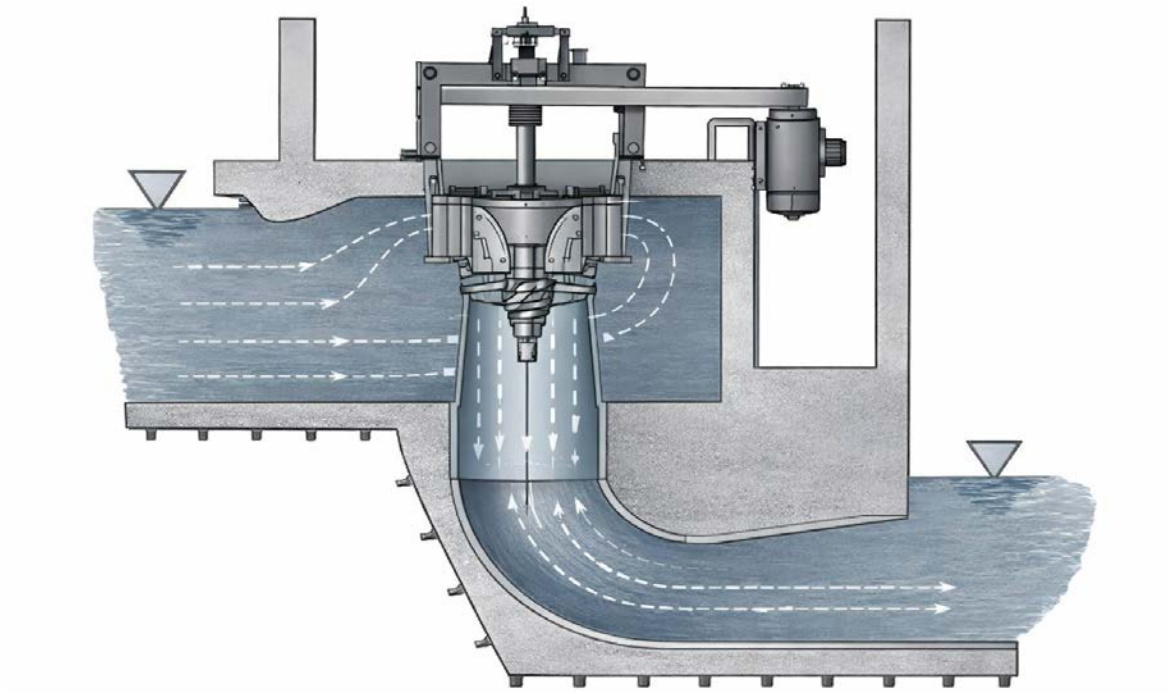

Рис. 4.2. Реактивна осьова турбіна

На ГЕС турбіна та генератор пов'язані загальним валом. Частоти їх обертання залежать від кількості пар полюсів ротора генератора та частоти змінного струму, яка має відповідати стандартній. Щоб отримати швидкості агрегатів, близькі до оптимальних, при великих напорах використовують турбіни з малими значеннями коефіцієнта швидкохідності, а при великих напорах з великими значеннями цього коефіцієнта.

В останні роки розроблені занурювальні вільнопроточні гідротурбіни, що використовують для отримання потужності швидкість течії води у водотоках і не потребують зведення гребель. Для розміщення занурювальних гідротурбін можна використовувати водотоки, що мають достатню ширину та глибину, а також швидкість течії води близько 3 м/с.

Переносні занурювальні гідротурбіни можуть знайти широке застосування при необхідності швидкого отримання електроенергії з мінімальними часовими і фінансовими витратами.

Мікро-ГЕС (потужністю до 100 кВт) можна встановити практично будь-де. Гідроагрегат складається з енергоблоку, водозабірного пристрою та пристрою автоматичного регулювання (рис.4.3).

Мікро-ГЕС відрізняються простотою. Вони надійні, екологічні, компактні, швидко окупні. Насамперед мікро-ГЕС затребувані як джерела електроенергії для сіл, хуторів, дачних селищ, фермерських господарств; млинів, невеликих виробництв у віддалених, гірських та важкодоступних районах, де немає поблизу ліній електропередач (а будувати такі лінії зараз і довше, і дорожче, ніж придбати та встановити мікро-ГЕС).

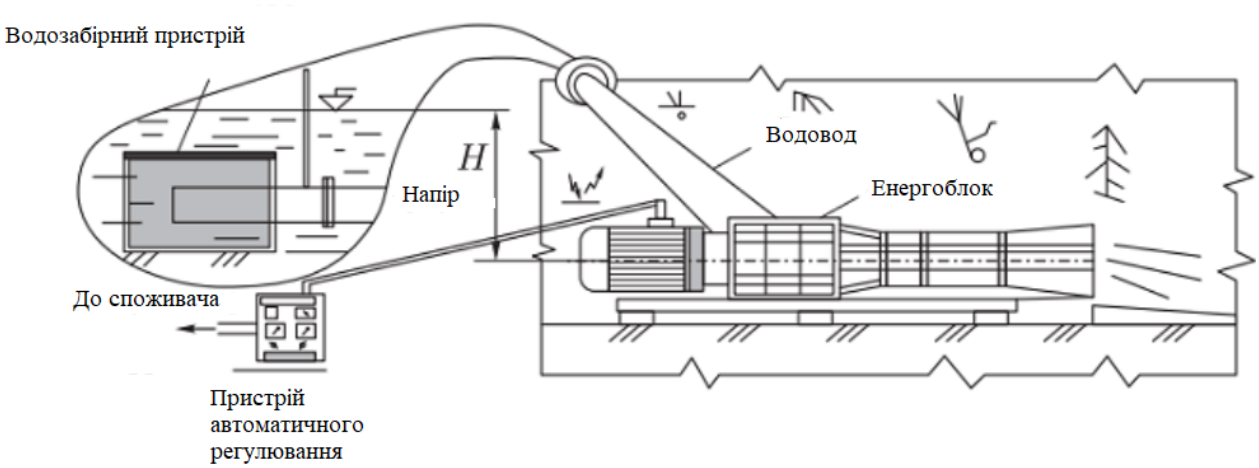

Рис. 4.3. Мікро-ГЕС

Велика кількість мікро-ГЕС може бути побудована на гідровузлах водопостачання та іригації. У системах водопостачання на ділянках траси з великою різницею позначок поверхні замість різноманітних гасників енергії (напору) можуть бути побудовані мікро-ГЕС. При витратах води в межах від 5 до 100 л/с їхня потужність може досягати від 20 до 200 кВт.

Цікаві конструктивні рішення реалізують зарубіжні фірми. На рис.4.4 представлена конструкція надувної водозливної греблі, що пропонує фірма «Dyrhoff». Замість традиційних для гребель матеріалів: бетону, сталі та дерева фірма використовує «бульбашку» з армованої гуми. Для створення напору греблю надувають повітрям або наповнюють водою з тиском, на 20–30% більшим напору (h).

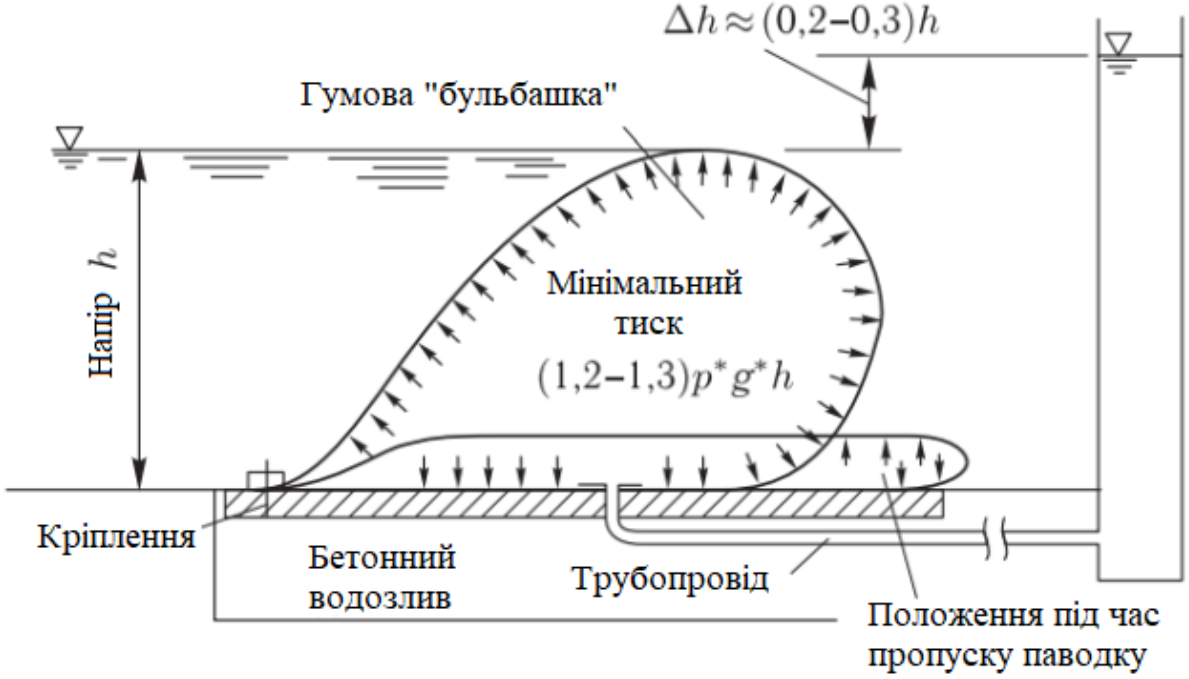

Рис. 4.4. Надувна водозливна гребля

На бетонній основі «бульбашка» утримується за допомогою анкерів. Компресор або насос пов'язані з внутрішньою порожниною греблі через трубопровід, розташований у бетонній основі. Зручність такої конструкції полягає в тому, що, при необхідності, можна швидко і легко випустити повітря з порожнини і «бульбашка» опуститься на дно, дозволяючи воді безперешкодно проходити вниз за течією. Ця властивість греблі найкраще може бути використана на річках з багатоводними паводками, що швидко наростають, для транзитного пропуску води. Можливе застосування цих гребель при сезонному пропуску риби та льоду. Достоїнствами цієї греблі за даними фірми виробника є низький рівень вартості, простота роботи та мінімальні експлуатаційні витрати.

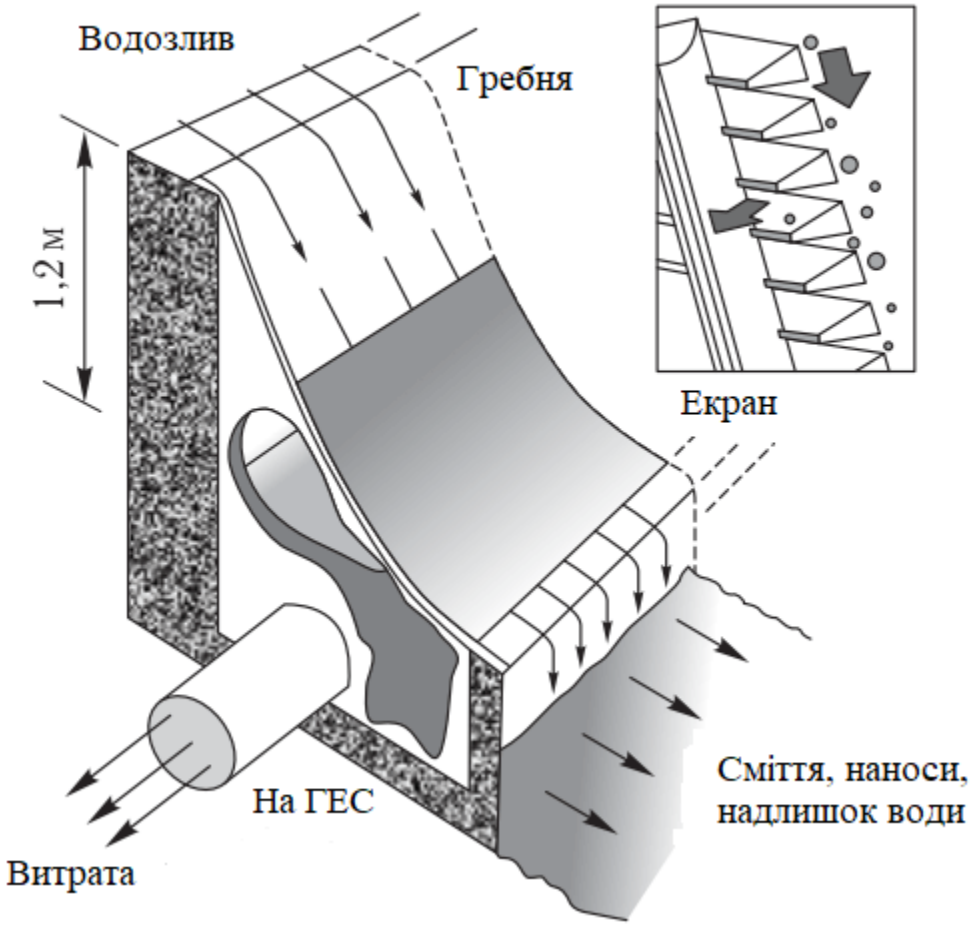

Рис. 4.5. Гребля з екраном Coanda

Іншим не менш цікавим проектом є водозабірна гребля з екраном Coanda (рис.4.5). На сьогодні понад 40 водозаборів малих ГЕС у Європі обладнано такими екранами. Ці екрани мають властивість самоочищення і тому вимагають незначних експлуатаційних витрат. По суті водозабір складається з водозливної греблі, через гребінь якої переливається вода і на

низовій стороні якої розташовується похила профільована поверхня екрану, виконана з корозійностійкого матеріалу. Через решітчасту структуру екрана вода провалюється вниз і потрапляє у трубопровід або канал, що подає воду на ГЕС. За рахунок спеціальної конфігурації прутин решітки плаваюче сміття, наноси та риба скочуються по екрану вниз з деякою частиною води. Екран Coanda здатний усунути 90% частинок розміром від 0,5 мм.

До прискореного розвитку малої гідроенергетики можуть спонукати аварії, що почастішали в енергосистемі країни, оскільки гідроагрегати можуть бути джерелами автономного живлення. Інший фактор прискорення – екологічні вимоги до енергії, що виробляється, що стало ще більш актуальним у зв'язку з введенням у дію Кіотського протоколу.

Сьогодні малі ГЕС (мікро-ГЕС) набули вже поширення у багатьох країнах світу. Вони характеризуються великим часовим напрацюванням, значними конструктивними запасами та високою надійністю, не вимагають постійної присутності обслуговуючого персоналу. Екологічні наслідки від будівництва та експлуатації МГЕС мінімальні. Мала гідроенергетика мало залежить від кліматичних умов і здатна забезпечити стійку подачу електроенергії споживачеві. МГЕС виробляють дешеву електроенергію, і термін їхньої окупності не перевищує 3–5 років.

4.6 Енергія та потужність ГЕС

Потужність (кВт) на валу гідротурбіни визначається як:

$$N_T = 9{,}81 Q_T H \eta_T, \tag{4.1}$$

де Q_T – витрата води через гідротурбіну м3/с; H – напір турбіни з урахуванням втрат, м; $\eta_т$ – коефіцієнт корисної дії (ККД) турбіни ($\eta_т$ = 0,93-0,96).

Електрична потужність генератора:

$$N_{ген} = N_T \eta_{ген}, \tag{4.2}$$

де $\eta_{ген}$ – ККД гідрогенератора, зазвичай рівний 0,97.

Регулювання потужності агрегату здійснюється зміною витрати води, що проходить через гідротурбіну. Потужність ГЕС у *i*-й момент часу дорівнює:

$$N_{гі} = 9{,}81 Q_{гі} H_{гі} \eta_{гі}, \tag{4.3}$$

де $Q_{гі}$, $H_{гі}$, $\eta_{гі}$ – витрата, натиск і ККД ГЕС в *і*-й момент часу.

Вироблення електроенергії ГЕС (кВт · год) за період часу T (год) визначається за формулою:

$$E_{ГЕС} = \int_0^T N_{гі} dt. \tag{4.4}$$

Річний виробіток електроенергії ГЕС не є постійною величиною, а змінюється в залежності від обсягу стоку, що надійшов у водосховище, ступеня його регулювання та умов експлуатації ГЕС.

Електрична потужність, підведена до споживача, менша за потужність, вироблену ГЕС. Сума всіх втрат під час передачі електроенергії від ГЕС до споживача оцінюються за допомогою ККД системи передачі та перетворення $\eta_{пер}$ = 0,92–0,93.

Встановлена потужність ГЕС $N_{вс}$ визначається як сума номінальних (паспортних) потужностей встановлених на ній генераторів. Вона відповідає максимальній потужності, яку може розвивати ГЕС.

4.7 Гідроакумулюючі електростанції

Гідроакумулююча електростанція (ГАЕС) призначена для перерозподілу в часі енергії та потужності в енергосистемі. У години знижених навантажень ГАЕС працює як насосна станція. За рахунок споживаної енергії вона перекачує воду з нижнього б'єфу у верхній та створює запаси гідроенергії (рис. 4.6).

У години максимального навантаження ГАЕС працює як ГЕС. Вода з верхнього б'єфу пропускається через турбіни в нижній б'єф, і ГАЕС виробляє та видає електроенергію в енергосистему. У процесі роботи ГАЕС за рахунок різниці тарифів споживає дешеву електроенергію, а видає дорожчу в період піку навантаження (вночі собівартість електроенергії нижча через невеликий попит, а вдень електроенергії не вистачає). Заповнюючи провали навантаження в енергосистемі, ГАЕС дозволяє експлуатувати теплові та атомні електростанції в найбільш економічному та безпечному режимі, різко знижуючи при цьому питому витрату палива на виробництво 1 кВт·год електроенергії в енергосистемі.

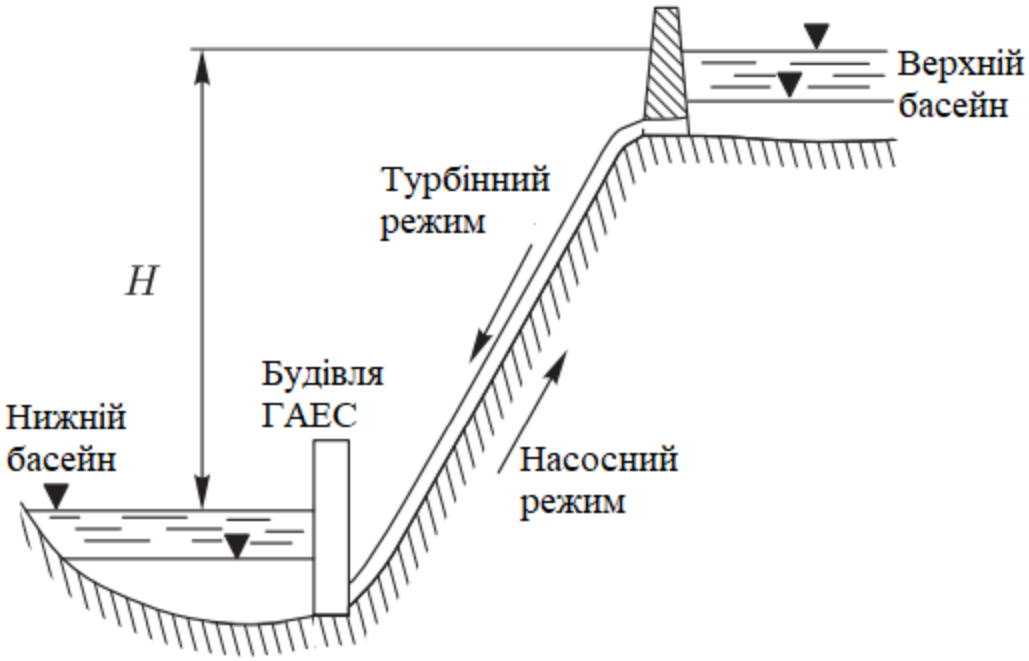

Рис. 4.6. Принципова схема ГАЕС

Таким чином, ГАЕС не виробляє енергію, а лише перерозподіляє її у часі перекачуванням води з нижнього басейну у верхній у нічний час та використання запасеної енергії у періоди максимального навантаження шляхом пропуску води з верхнього басейну у нижній через турбіни ГАЕС.

Перевагою ГАЕС є мінімальний обсяг необхідних питомих капіталовкладень та чисельності обслуговуючого персоналу. Вони не вимагають наявності великих річок, менше впливають на навколишнє середовище в порівнянні з іншими енергоджерелами, добре працюють і широко використовуються в режимі синхронного компенсатора, виробляючи реактивну потужність.

На ГАЕС використовують переважно оборотні гідромашини, що працюють як у насосному, так і в турбінному режимі, і реверсивні електромашини, що працюють як генератор або електродвигун. Оборотні гідромашини створюють для напорів до 1000 м.

Ефективність ГАЕС значною мірою залежить від величини напору, що використовується: чим він вищий, тим ефективніше ГАЕС, що пов'язано насамперед зі зменшенням ємності басейнів. Так, питомі капіталовкладення у ГАЕС зі збільшенням напору зі 100 до 500 м знижуються на 20–25 %.

У промислово розвинених країнах інтенсивне введення нових гідроенергетичних потужностей забезпечується, як правило, будівництвом ГАЕС.

На відміну від ГЕС, ГАЕС використовує для вироблення електроенергії воду в замкнутому циклі та завдає мінімальних збитків навколишньому

середовищу. Для заповнення втрат води на випаровування та просочування в ґрунт здійснюється підживлення води, що циркулює між обома басейнами. Підживлення здійснюється з відкритого джерела та його витрата набагато нижча від циркуляційної витрати.

Питання до теми №4

1. Перелічте типи гідротурбін на ГЕС.
2. Надайте характеристику турбіні Пелтона.
3. Надайте характеристику турбіні Каплана.
4. Надайте характеристику турбіні Френсиса.
5. Накресліть загальну схему та опишіть принцип дії гідравлічного тарану.
6. Накресліть спрощену схему гідроелектростанції з ковшовою гідротурбіною.
7. Охарактеризуйте принцип дії міні ГЕС.
8. Перелічіть переваги та недоліки мікро- та міні- ГЕС.

ТЕМА № 5. ЦЕНТРАЛІЗОВАНА ТА РОЗПОДІЛЕНА ГЕНЕРАЦІЯ ЕНЕРГІЇ

У багатьох країнах світу в даний час, поряд з розвитком централізованого енергопостачання, дедалі активніше підтримується тенденція широкомасштабного переходу до розподіленої генерації енергії (РГЕ). Нерідко ці два види енергопостачання протиставляються один щодо одного з переважною перевагою розподіленої генерації енергії як найбільш конкурентоспроможної. Разом з тим, кожна з них має свою кращу сферу застосування, де найбільшою мірою виявляються її переваги.

Існують різні підходи до визначення поняття розподіленої генерації енергії. У ряді випадків термін «розподілена генерація енергії» (distributed generation) використовується як синонім поняття генерації в децентралізованій енергосистемі для покриття потреб в енергії ізольованих (не підключених до магістральних енергомереж)споживачів [12]. Іноді під нею розуміють використання енергоджерел малої потужності (наприклад, до 25 МВт та/або 20 Гкал/год)[13].

У деяких роботах до розподіленої генерації прийнято відносити більшу частину систем когенерації (спільного виробництва електроенергії та тепла) та систем з використанням відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) [14]. Водночас такий підхід представляється некоректним, особливо щодо України. Великі ТЕЦ, що забезпечують енергією цілі міста, недоцільно зараховувати до систем розподіленої генерації. До них слід відносити лише ТЕЦ малої та середньої потужності та енергоджерела з використанням ВДЕ поблизу місць споживання. Розподілена генерація енергії розуміється як виробництво енергії на рівні розподільної мережі або на стороні споживача,включеного до мережі [15-17]. Поняття РГЕ поширюється як на електроенергетичні системи, так і на системи теплопостачання.

У випадку «розподіленої» генерації є вироблення електроенергії/тепла за місцем її споживання. Відсутність мережі виключає втрати (і витрати) на передачу електроенергії/тепла. При цьому мається на увазі наявність безлічі споживачів, які виробляють теплову та електричну енергію для власних потреб, спрямовуючи їх надлишки у загальну мережу. У рамках даної концепції в якості розподілених генераторів енергії можуть виступати когенераційні установки (КГУ) малої та середньої потужності, які дозволяють знизити витрати на виробництві енергії до 40%, досягти високої ефективності використання палива (до 90% від потенційної енергії) та оптимального використання встановленої потужності.

5.1 Структура та склад технологій розподіленої генерації енергії

Безліч технологій розподіленої генерації енергії охоплює установки потужністю до 25 МВт, включаючи нетрадиційні та відновлювані джерела енергії (НВДЕ). Найбільш відомими та вивченими серед них є наступні технології (рис. 5.1):

1. Пряме спалювання твердого палива (включаючи біомасу, вугілля,тверді побутові відходи (ТПВ) для отримання електричної та теплової енергії, у тому числі у теплофікаційних паротурбінних установках (ПТУ).

Найбільш ефективними тут можуть бути енергоустановки зі спалюванням твердого палива в циркулюючому киплячому шарі та установки його газифікації з отриманням синтез-газу та водню, вони в свою чергу в якості палива можуть використовуватися в газопоршневих двигунах (ГПД),газотурбінних (ГТУ) та парогазових (ПГУ) установках, а також у паливних елементах (ПЕ) для отримання електричної та теплової енергії.

2. Технології на природному газі, представлені безліччю енергоустановок, зокрема ГПД, ГТУ, ПГУ, ПЕ. Найбільше застосування вони отримали для виробництва електричної та теплової енергії.

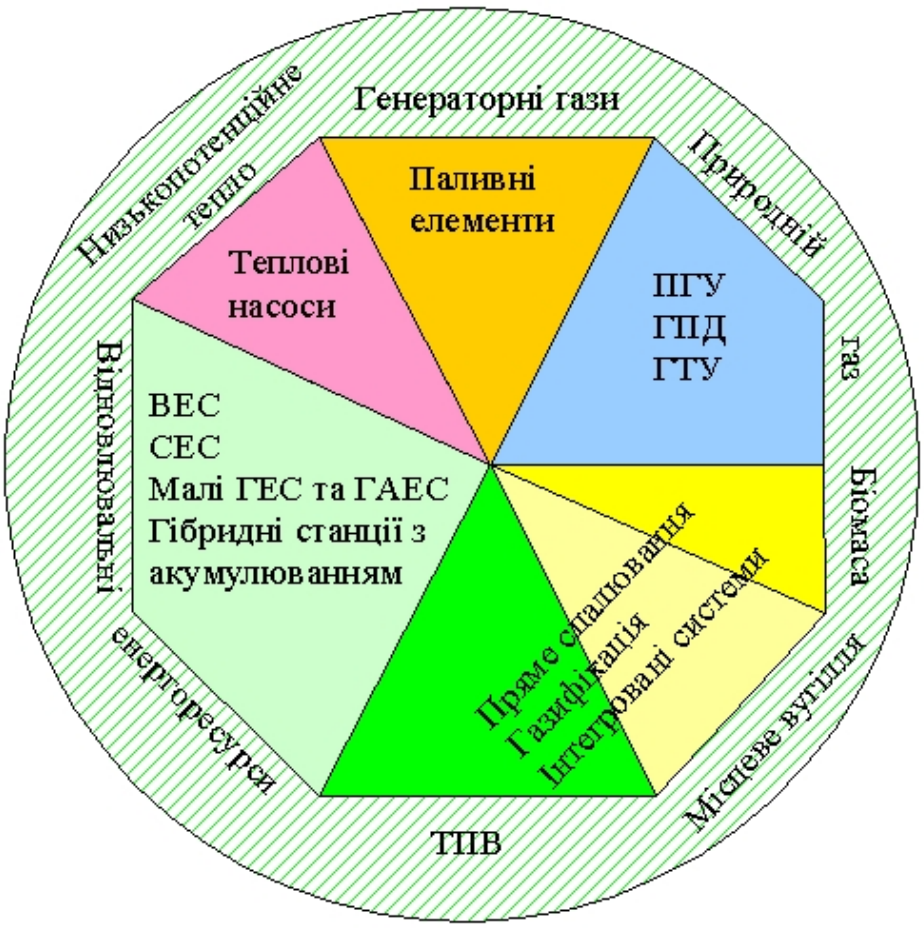

Рис. 5.1. Ресурси та склад технологій розподіленої генерації енергії

3. Вітроустановки (ВЕУ) та малі гідроелектростанції (МГЕС),отримали найбільш широке застосування в малих розподілених системах електропостачання споживачів.

4. Сонячна енергія, що перетворюється на електричну у фотоелектричних установках (ФЕУ) та сонячних електростанціях (СЕС), ау теплову станціях сонячного теплопостачання (ССТ).

5. Низькопотенційне тепло, яке за допомогою тепло насосних установок (ТНУ) може використовуватись як для теплопостачання, так і для холодопостачання.

Крім перерахованих технологій та установок перспективними представляються мікротурбіни, газопоршневі агрегати, двигуни стирлінгу, роторно-лопатеві двигуни, накопичувачі енергії (хімічні, інерційні, гравітаційні та ін.), чилери (апарат для охолодження повітря) тощо.

Значних успіхів в останні роки досягнуто у створенні систем управління РГЕ – це системи корекції на стороні генерації та регулювання споживачів, засоби автоматизації управління. Вони дозволяють синхронізувати роботу систем РГЕ з режимами роботи споживачів, між собою та з централізованою системою.

5.2 Нові умови та тенденції розвитку електроенергетики на базі РГЕ

Світові тенденції розвитку енергетики демонструють пріоритетну реалізацію нових можливостей на основі впровадження технологій інтелектуальних електроенергетичних систем (smart grid), когенерації, виробництва енергії на основі використання ВДЕ. У ряді розвинених країн простежується тенденція уникнення централізованого устрою енергетики у напрямі розвитку розподіленої енергетики.

Наприклад, у США зараз експлуатується близько 12 млн. установок малої розподіленої генерації (одиничною потужністю до 60МВт) загальною встановленою потужністю понад 220 ГВт, а темпи приросту становлять близько 5 ГВт на рік. Понад 170 ГВт цієї потужності використовуються, як джерела резервної потужності для енергопостачання споживачів під час аварійних ситуацій. Основний тренд пов'язаний із переходом до використання цих установок в якості регулярного джерела не тільки для резервної потужності, що в результаті призводить до доповнення великої централізованої генерації в енергосистемі та до її заміщення при збереженні зв'язку з між ними.

У країнах ЄС розподілена генерація становить у середньому близько10% загального обсягу виробництва електроенергії. Дані показники

значно варіюються у різних країнах. Наприклад, у Данії частка розподіленої генерації у виробництві електричної енергії перевищує 45%. Різницю між країнами можна пояснити наявністю чи відсутністю відповідної нормативної бази та політичних рішень. Наприклад,енергетика Франції значною мірою побудована на використанні атомної енергії. У Данії ж ядерна енергетика ніколи не розглядалася як варіант розвитку енергетичного сектора в довгостроковій перспективі через наявність певних ризиків та можливого впливу на навколишнє середовище. Замість цього, починаючи з1970 року, Уряд Данії реалізує масштабну програму сприяння розвитку когенерації, енергоефективності та розвитку відновлюваних джерел енергії (останнє здійснюється після вичерпання потенціалу розвитку когенерації). Реалізація цієї програми була заснована на принципах широкого залучення малого підприємництва,муніципалітетів та кооперативів, що працюють у тісній співпраці.

Введення електричної потужності у світі, згідно з даними агентства Bloomberg New Energy Finance (BNEF), у 2013 році з традиційними енергоблоками на викопному паливі склали 141 ГВт, а розподіленій генерації енергії тільки на базі ВДЕ вони досягли 143 ГВт. Наразі планується введення 110 ГВт потужності традиційних електростанцій та 164ГВт потужності розподіленої генерації енергії на базі ВДЕ. На перспективу їх введення до 2025 р. має становити 91 та 208 ГВт, до 2030 р. 64 та279 ГВт відповідно традиційної та розподіленої генерації енергії.

З цього випливає, пріоритет введення РГЕ у світі зростає та його розрив щодо традиційних енергоджерел лише збільшуватиметься. Разом з тим, стохастичний характер ВДЕ та доцільність оптимального використання встановленої потужності сприятимуть їхньому об'єднанню з централізованою мережею з метою спільної роботи

В Україні, на відміну зарубіжних країн, переважне значення в найближчій перспективі матимуть централізовані системи, також які потенціал зростання великої енергетики. Поряд із цим, територіальні особливості нашої країни надають величезні можливості для використання розподіленої генерації енергії. Розподілена генерація енергії відкриває абсолютно нові перспективи підвищення енергетичної ефективності та формування оптимальних енергетичних балансів. В Україні функціонує більше 20 тисяч установок малої розподіленої генерації, причому їх число продовжує збільшуватись. У віддалених та ізольованих регіонах вся енергетика орієнтується на розподілену генерацію енергії.

5.3 Чинники, що впливають на масштаби використання малої розподіленої генерації

Можливі масштаби застосування малої розподіленої генерації енергії визначаються їх конкурентоспроможністю щодо централізованих систем та в розглянутій перспективі залежать від великої кількості факторів:

- рівня тарифів на приєднання до електричних та теплових мереж;
- принципів формування тарифів на електроенергію та тепло, а точніше – від співвідношення тарифів на електроенергію та тепло та вартості палива (енергії ВДЕ);
- практичної реалізації заходів щодо недискримінаційного доступу до електричної мережі (насамперед, для видачі надлишкової електроенергії) та до постачання природного газу;
- доступності фінансових ресурсів (кредитів);
- розвиненості ринку лізингу енергетичного обладнання (з включенням його обслуговування);
- темпів розвитку економіки країни загалом та конкретних регіонів;

В залежності від умов і складних факторів можливі різні сфери (які визначають масштаби використання)застосування малої розподіленої генерації енергії, серед них:

1. Застосування РГЕ лише нових споживачів.
2. Використання технологій РГЕ для перетворення на ТЕЦ дрібних газових котелень.
3. Використання технологій РГЕ для перетворення на ТЕЦ великих котелень, в першу чергу, що працюють на природному газі.
4. Перехід споживачів від централізованого електро- та теплопостачання на застосування технологій малої РГЕ.
5. Застосування РГЕ для покриття напівпікової та пікової частин графіка навантажень і як резервна потужність при спільній роботі з централізованою генерацією. На масштаб застосування РГЕ, незважаючи на сприятливі умови, що складаються, можуть вплинути обмеження за:

- постачанням природного газу;
- щільністю електричних та теплових навантажень;
- стійкістю функціонування електроенергетичної системи.

У зв'язку з широким розповсюдженням централізованих систем,інтеграція РГЕ із цими системами забезпечує розподіленим джерелам велику сферу застосування.

У вирішенні безлічі розглянутих проблем необхідне чітко прописане законодавство та формування необхідного інвестиційного середовища.

5.4 Нові виклики розвитку РДЕ

Реалізація прогнозних параметрів розвитку РГЕ багато в чому буде визначатися зовнішньою кон'юнктурою та факторами, які будуть складатися в країні та у світі. До них можуть бути віднесені такі зовнішні фактори:

– сприятлива для малої газової енергетики та несприятлива для ВДЕ довгострокова кон'юнктура на ринку природного газу, яка пов'язана зі стисненням зовнішніх ринків газу;

– істотна невизначеність умов розвитку та, в деякій мірі, функціонування ПЕК та систем енергетики, зумовлені неформальними правилами гри, внаслідок дії яких дійсно ефективні рішення виключаються із творчого процесу.

– наявність багатьох суб'єктів відносин, що мають різні, багато в чому несхожі, а часто й суперечливі інтереси.

– істотне посилення взаємовпливу систем енергетики та їх впливу на інші галузі економіки та системи життєзабезпечення.

Слід зазначити, що малі газові установки найбільш підготовлені до впровадження і мають певні конкурентні переваги, тому широке їх застосування може виявитися більш реалістичним, ніж використання ВДЕ.

5.5 Системне зіставлення технологій розподіленої генерації та їх проникнення на ринок

Системне зіставлення технологій розподіленої генерації за рівнем їх конкурентоспроможності та ступеня проникнення на ринок спирається на такі основні принципи:

1. Оцінка вартості виробництва енергії різними типами технологій здійснюється на основі вартості встановленої потужності,постійної та змінної складових експлуатаційних витрат.

2. Досліджуваний склад технологічних структур формується з набору найефективніших технологій.

3. Порівнювані технологічні структури призводять до рівного енергетичного ефекту.

4. Найбільш економічний склад технологічної структури або окремої технології визначається з урахуванням оптимізації її режимів роботи.

5. Цільова функція є собівартістю енергії (для ізольованих систем) або рівнем прибутку (для розподілених систем).

6. Система обмежень включає забезпечення заданого графіка споживання енергії, резервування, технічні характеристики обладнання

(надійність, графік та вартість ремонтів та ін.).

7. Кліматичні характеристики, вартість енергоносіїв та графік споживання енергії задається залежно від регіону.

За показниками рівнів розвитку техніки та ринку технологій РГЕ класифікуються на три групи [18]: які розвиваються, зрілі та комерційні (рис. 5.2). До першої групи належать технології, що знаходяться у стадії наукових досліджень та дослідно-конструкторських робіт. До них слід віднести, зокрема, сонячні фотоелектричні установки на базі наногетероструктурних фотоелектричних перетворювачів,газифікацію біомаси, піроліз твердого палива та паливні елементи.

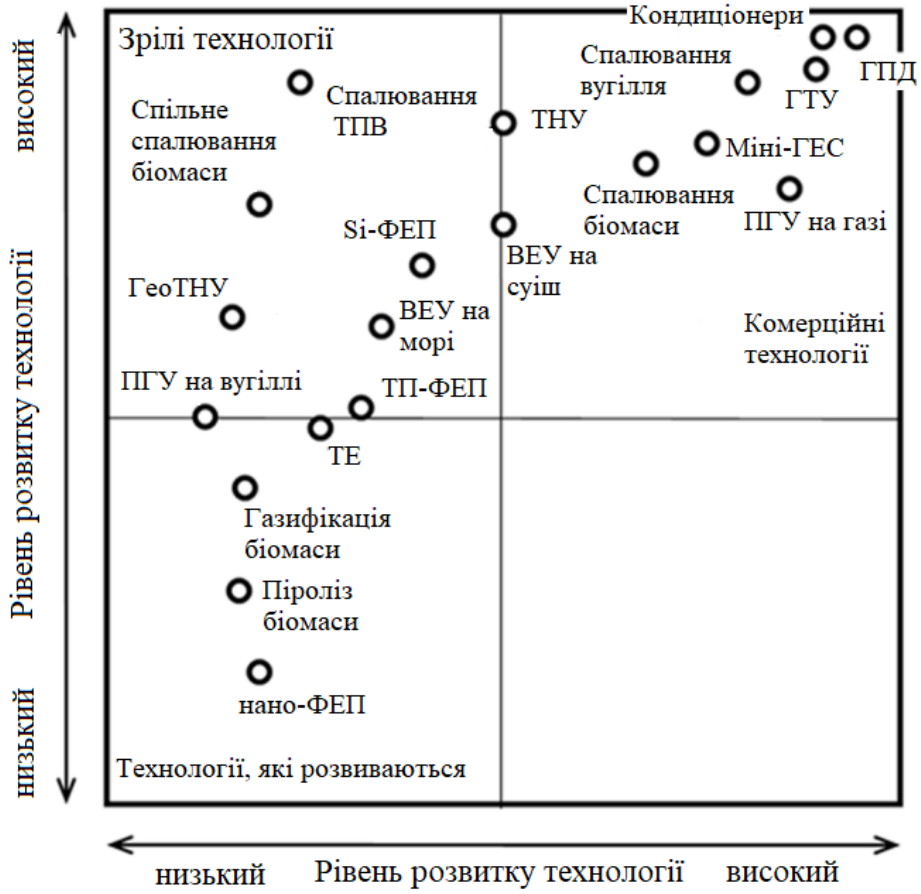

Рис. 5.2. Зіставлення технологій РГЕ за ступенем проникнення на ринок

Без державної фінансової підтримки у частині науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт розвиток технологійпершої групи не представляється можливим.

Технології другої групи перейшли із стадії науково-дослідної роботи на рівень дослідно-промислової експлуатації. Розвиток технологій цієї групи,що включає морські ВЕУ, інші ФЕУ та геотермальні установки, ПГУ на вугіллі, можливий лише за підтримки виробництва та впровадження.

Технології третьої групи, включаючи ВЕУ на суші, міні-ГЕС, теплонасосні установки та пряме спалювання біомаси, що вийшли на комерційний рівень і можуть розвиватися без державної підтримки,принаймні в окремих сегментах ринку або на окремих територіях. Широко представлені на ринку такі технології цієї групи,як спалювання вугілля, ГПД, ГТУ, ПГУ на природному газі та інші. Інвестиційна привабливість технології визначається співвідношенням її сучасної питомої вартості встановленої потужностіта показником зниження цієї величини у часі. Найкращими інвестиційними характеристиками сьогодні володіють технології та технологічні структури на природному газі, які об'єктивно задають статистичну моду інвестиційної привабливості. Дана закономірність призводить до того, що проекти спорудження, наприклад,малих ГЕС, стануть цікавими (рівно ризиковими порівняно з газовими установками) для приватних інвестицій за умови державного співфінансування на умовах 50:50, а ВЕУ на суші – на умовах 70:30.Технології РГЕ у своїй переважній більшості виявляються дорожчими, ніж застосування централізованих систем енергопостачання. Це обумовлено фактором масштабу, а також вищою питомою вартістю перетворення енергії з місцевих джерел у порівнянні з використанням сортового викопного палива. Наслідком цього факту виявляється необхідність заходів державного стимулювання сектора малої розподіленої генерації енергії. Досить стійко розвивається сегмент малої генерації,заснований на використанні природного газу – енергоустановки на базі ГПД та ГТУ. Теплонасосні установки також добре освоєні для широкого практичного застосування та активно впроваджуються. Інші технології поки не можуть конкурувати з газовими технологіями та централізованим енергопостачанням за ціною, або мають вузьку ресурсну нішу.

Питання до теми №5

1. Надайте характеристику ресурсам та складу технологій розподіленої генерації енергії;
2. Які основні тенденції розвитку електроенергетики на базі РГЕ;
3. Які чинники впливають на масштаби використання малої розподіленої генерації;
4. Які зовнішні фактори реалізації прогнозних параметрів розвитку РГЕ;
5. Проведіть системне зіставлення технологій розподіленої генерації та їх проникнення на ринок.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Кудря С.О., Рєпкін О.О., Яценко Л.В., Ткаленко М.Д., Шинкаренко Л.Я., Пепелов О.В. Напрями розвитку водневої енергетики та водневої економіки в Україні / Матеріали XX-ої міжнародної науковопрактичної конференції “Відновлювана енергетика та енергоефективність XXI століття”, м. Київ, 15-16 травня 2019 р., С. 58-65.

2. Гладир, А. І., Ноженко, В. Ю., & Якимець, С. М. (2024). Лабораторний практикум із вивчення обладнання альтернативних джерел енергії. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського. Вип, 1(144), 215-223.

3. Комплексне використання відновлюваних джерел енергії: Курс лекцій [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: М.П. Кузнєцов, О.А. Мельник – Електронні текстові дані (1 файл: 7,93 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 304 с.

4. Відновлювані джерела енергії / За ред. С.О. Кудрі. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. – 392 с.

5. Череп, О., Осмаковська, К., Лищенко, О. (2023). Доцільність використання енергоефективних технологій та відновлювальних джерел енергії. Modeling the Development of the Economic Systems, (2), 203-207.

6. Москальчук Н. М. Вітрова енергетика – особливості оцінки впливу на навколишнє середовище // Екологічна безпека та збалансоване ресурсовикористання : науково-технічний журнал. 2016. № 1(13). С. 130–135.

7. Арсеньєв В.М. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку: навчальний посібник / В.М. Арсеньєв, С.С. Мелейчук. – Суми: Сумський державний університет, 2018. – 364 с

8. Величко С.А. Енергетика навколишнього середовища України (з електронними картами). Навчально-методичний посібник для магістрантів. – Харків: Харківський національний університет імені В.Н.Каразіна. – 2003. – 52с.– 2006. – 280 с.

9. Лежнюк П.Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П.Д. Лежнюк, О.А. Ковальчук, О.В. Нікіторович, В.В. Кулик - Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.

10. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії / Кудря С. О. − Підручник. – Київ: Національний технічний університет України («КПІ»), 2012.–495с.

11. Вишневська І. Біогаз: міфи та реальність. Аграрний тиждень. Україна. – 2016. – № 4. – С. 16–18.

12. Бацала Я. В. Удосконалення засобів контролю параметрів електроенергії відновлювальних джерел енергії / Я. В. Бацала, І. В. Гладь, О. І. Кіянюк // Нафтогазова енергетика. – 2015. – № 1(23). – С. 52-60.

13. Ковальов І.О. Альтернативні джерела енергії України [Текст] : навч. посіб. / І.О.Ковальов, О.В. Ратушний. – Суми: Вид-во СумДУ, 2015. – 201с.

14. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2050 року. Розпорядженням КМУ від 21.04.2023. № 373-р. URL: https://www.kmu.gov.ua/npas/pro-skhvalennia-enerhetychnoi-stratehii-ukrainy-na-period-do-2050-roku-373r-210423

15. Україна та європейський зелений курс. URL: https://dixigroup.org/analytic/ukra%D1%97na-ta-%D1%94vropejskij-zelenij-kurs-5/

16. Про внесення змін до деяких законів України щодо відновлення та «зеленої» трансформації енергетичної системи України: Закон України від 30.06.2023 № 3220-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/3220-20

17. Про запровадження гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії. Постанова КМУ від 27.02.2024. № 227. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/227-2024-%D0%BF#Text

18. Бюджетний кодекс України від 08.07.2010 № 2456-VI. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2456-17#Text

19. Безус В. Біоенергетичні кластери: рецепт сталого розвитку міст. Економічна правда. URL: https://www.epravda.com.ua/columns/2023/01/25/696334/

20. Миколюк О.А. Формування кластерних структур в умовах становлення енергетичної незалежності. Економічний аналіз. 2017. Том 27. № 3. С. 56-61.

21. Про альтернативні джерела енергії: Закон України від 20.02.2003 № 555-IV. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/555-15#Text

22. Кузьміна М. Правове регулювання створення та функціонування енергетичних кооперативів. Підприємництво, господарство і право. 2019. № 9. С. 40-44.

23. Про схвалення Стратегії розвитку індустріальних парків на 2023-2030 роки. Розпорядження КМУ від 24.02.2023 № 176-р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176-2023-%D1%80#Text

Електронне навчальне видання комбінованого використання
Можна використовувати в локальному та мережному режимі

Бровко Костянтин Юрійович
Войтенко Сергій Миколайович
Винокурова Наталія Дмитріївна

Відновлювальні джерела енергії

Навчально-методичний посібник
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня
за спеціальністю G3 «Електрична інженерія»
освітньо-професійної програми «Електричні станції, мережі та системи»

В авторській редакції

Підписано до розміщення 25.06.2026. Гарнітура Times New Roman.
Ум. друк. арк.1,12. Обсяг. 3,375 Мб. Зам. № 371/26.

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна,
61022, м. Харків, майдан Свободи, 4.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 3367 від 13.01.2009
Видавництво ХНУ імені В. Н. Каразіна