УДК 620.92 https://doi.org/10.36296/1819-8058.2026.2(85).252-265

ДОСЛІДЖЕННЯ ДОСТУПНОГО ПОТЕНЦІАЛУ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЖИТЛОВОГО КОМПЛЕКСУ В УМОВАХ МІСТА ДНІПРА

Отримано 21 квіт. 2026 р.; рекомендовано до публікації 26 чер. 2026 р.
Доступно онлайн 30 чер. 2026 р.

Решетняк І. Л.[1], Ковальов С. В.[2], Козлов Я. М.[3], Шкрабець Ф. П.[4]

Автор для кореспонденції: Решетняк Ірина,
e-mail: iresh390@gmail.com

[1] канд. техн. наук
https://orcid.org/0000-0001-6900-7428

[2] канд. хім. наук
https://orcid.org/0000-0001-8839-2392

[3] канд. техн. наук
https://orcid.org/0000-0002-6987-3753

[4] д-р. техн. наук
https://orcid.org/0000-0003-1650-6017

[1, 2, 3, 4, 5] Український державний університет науки і технологій,
ННІ «Український державний хіміко-технологічний університет»,
м. Дніпро, Україна

Анотація. *У цій роботі представлено дослідження потенціалу сонячної енергії для житлового комплексу міста Дніпра протягом року. Для цього впроваджено підхід, заснований на спільному використанні математичного та фізичного моделювання із застосуванням експериментальної установки, що дає змогу оцінювати затінення фасадів навколишніми будинками та спорудами. Для оцінки сонячного потенціалу житлового комплексу в моделі розраховується на першому етапі максимальний сонячний потенціал для визначених споруд за умови відсутності перешкод, на другому етапі визначається потенціал з урахуванням складної геометрії будівель та їх взаємного затінення, і на третьому етапі враховується вплив хмарності неба. Отримані результати важливі для покращення вже існуючої системи або для вибору найефективніших сонячних технологій (сонячної теплової та фотоелектричної).*

Ключові слова*: сонячний потенціал, енергоефективність, математичне моделювання, геліодон, житловий комплекс.*

Перелік використаних позначень та скорочень

I – потік повного сонячного випромінювання, що падає на довільну поверхню

Qm – середній потенціал сонячного випромінювання на довільну поверхню за день

Вступ. Наразі більшість населення України зосереджена в містах, на які припадає переважна більшість споживання енергії. І прогнози говорять про те, що відсоток населення в містах зростатиме. Складна геополітична ситуація в країні, застарілі ЛЕП, нестабільність електропостачання, відключення світла та підвищення тарифів на електроенергію – усе це спонукає до впровадження в міське середовище систем виробництва енергії, які використовують місцеві ресурси, зменшуючи залежність від викопного палива і, як наслідок, зменшують викиди парникових газів та запобігають шкідливим викидам у довкілля. Дедалі частіше почали з'являтися індивідуальні сонячні системи (сонячні колектори або фотоелементи) невеликої потужності, які розташовують на фасадах будинку. Україна перебуває в географічній зоні, яка має достатній потенціал для використання енергії сонячного випромінювання як в промислових, так і в побутових цілях. Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що потрапляє на 1 м^2 поверхні на території України, – 1070 кВт·год/м^2 на півночі та 1400 кВт·год/м^2 і більше на півдні [1–3]. Це вище ніж, наприклад, у Німеччині – 1000 кВт·год/м^2, або навіть у Польщі – 1080 кВт·год/м^2 [4]. Отже, потенціал сонячної енергії в Україні є достатньо високим для широкого впровадження як теплоенергетичного, так і фотоенергетичного обладнання, тож в умовах нашого клімату сонячні системи можуть працювати цілий рік, але з перемінною ефективністю.

Майбутні вимоги до будівель у ЄС передбачатимуть як високий рівень енергоефективності, так і значний ступінь місцевого виробництва відновлюваної енергії; очікується, що сонячні енергетичні системи на будівлях стануть поширенішими [5]. Використання сонячної енергії в містах через установку сонячних колекторів та панелей (фотоелектричних систем) підвищує енергетичну стійкість і потенційно зменшує забруднення міст. Також ці системи з погляду архітектури естетично й функціонально інтегруються в будівельні конструкції фасадів та дахів будівель [6–9]. Визначення доступного до використання сонячного потенціалу в містах дає змогу теоретично оцінити здатність міст або окремих міських комплексів до можливого енергетичного самозабезпечення. Для практичного визначення потенціалу сонячного випромінювання сучасних міст застосовують методи математичного моделювання [10–12]. В умовах міської забудови

виникає проблема затінення фасадів сусідніми будинками чи іншими спорудами. Для сучасних житлових комплексів характерне складне геометричне розташування будинків, які мають багато поверхів. Тому для врахування впливу складної геометрії міської забудови розробляють спеціальні складні комп'ютерні моделі [6, 7, 10–13], які поновлюються та удосконалюються.

В Україні використання сонячної енергії зростає, хоча кількість сонячних установок все ще невелика, порівняно із сусідніми країнами. Значну частку потреб в енергії для житлового будинку становить опалення, тому важливим є активне та пасивне використання сонячної енергії. Найбільше сонячна радіація доступна в літні місяці та лише обмежена кількість – узимку. Шлях Сонця також значно змінюється протягом року. Висота Сонця над горизонтом в місті Дніпрі влітку становить близько 65°, тоді як узимку вона – близько 20°. Низький кут падіння сонячних променів означає, що фасадні установки можуть бути гарним варіантом, особливо для енергії, що використовується для опалення. Це також означає, що затінення від навколишніх будівель може бути проблемою. Сучасні міста – це складне міське середовище, що характеризується високою щільністю забудови через поступове збільшення населення, тому динамічний та складний ефект затінення поверхонь будівель також є актуальною проблемою. Щоб оцінити доступ до сонячного світла й запобігти зменшенню його доступності на фасади будівель, необхідно провести попередній аналіз

Мета роботи. Визначити доступний для використання потенціал сонячної енергії для окремого житлового комплексу в умовах міста Дніпра, зважаючи на розподіл сонячної енергії протягом року, місцеві кліматичні умови та затінення від навколишніх будівель.

Характеристика міського житлового комплексу міста Дніпра. У роботі для оцінки потенціалу сонячної енергії вибрали типовий житловий масив Соборного району міста Дніпра, що складається з п'яти будівель. Супутникове фото цього комплексу (рис. 1, *а*) було отримано за допомогою безкоштовного картографічного сервісу компанії Google [14]. Схема будинків цього комплексу з орієнтацією відносно сторін світу показана на рис. 1, *б*, а в табл. 1 наведені геометричні характеристики для цих будинків. Кут нормалі кожного фасаду визначався відносно південного напрямку, відсоток вільної поверхні на фасадах визначали з урахуванням площі вікон та конструктивних елементів будівель. Також розглядали встановлення колекторів на дахах будівель під кутом 45° до горизонталі з орієнтацією на південь.

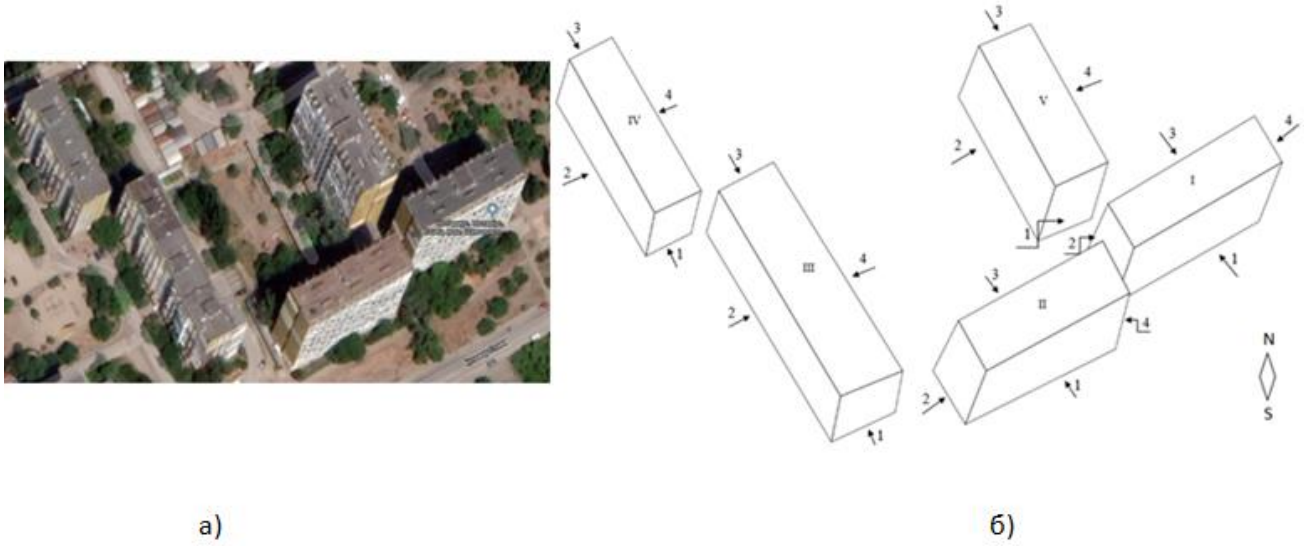

Рис. 1. Житловий комплекс у Соборному районі міста Дніпра: I, II, III, IV, V ° номери будинків; 1, 2, 3, 4 – номери фасадів; а –супутникове фото; б – схема будинків

Таблиця 1. Характеристика будинків житлового комплексу

Будинок	Фасад	Кут нормалі від півдня, °	Висота, м	Ширина, м	Частка вільної поверхні, %
I	1	30	45	46	50
	2	-60		16	100
	3	-150		46	50
	4	120		16	100
II	1	30	45	46	50
	2	-60		16	100

Будинок	Фасад	Кут нормалі від півдня, °	Висота, м	Ширина, м	Частка вільної поверхні, %
	3	-150		46	50
	4	120		16	100
III	1	30	30	15	40
	2	-60		66	50
	3	-150		15	40
	4	120		66	50
IV	1	30	30	15	100
	2	-60		46	50
	3	-150		15	100
	4	120		46	50
V	1	30	30	46	100
	2	-60		16	50
	3	-150		46	100
	4	120		16	50

Як видно на рис. 1, будинки вибраного житлового комплексу розташовані так, що можуть створювати затінювання на фасади від навколишніх будівель залежно від розташування Сонця на небосхилі і, відповідно, зменшувати доступне сонячне випромінювання.

Дослідження затінювання фасадів будинків житлового комплексу. Для дослідження затінювання фасадів будинків залежно від їх геометричного розташування та руху Сонця по небосхилу в цій роботі вибрано метод фізичного моделювання з використанням геліодона – пристрою, що відтворює сонячне освітлення на поверхню, на якій розташовують моделі будівель та споруд. Було побудовано настільний геліодон з фіксованим джерелом світла та рухомою плоскою поверхнею, яку можна обертати для зміни орієнтації досліджуваної конструкції; його схема показана на рис. 2.

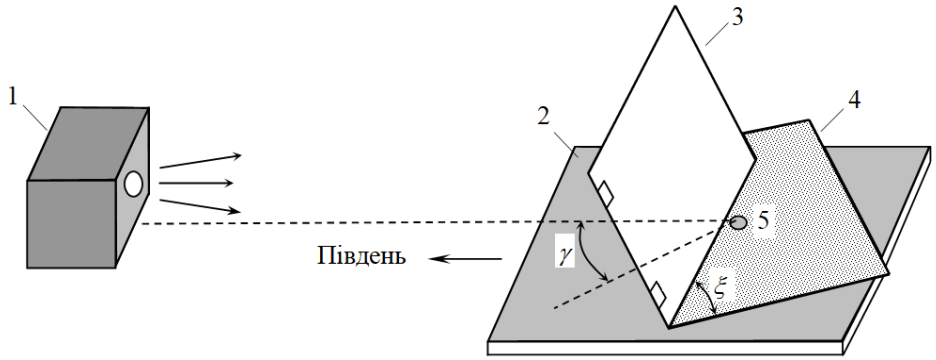

Рис. 2. Схема експериментальної установки з настільним геліодоном: 1 – джерело світла, 2 – нерухома основа установки, 3 – плоска робоча поверхня, 4 – плоска опорна поверхня, 5 – вісь для обертання опорної поверхні

Нерухому основу пристрою було виготовлено з плити типу ДСП товщиною 20 мм, а опорна та робоча поверхні мали розміри 500*600 мм і були виготовлені з 10 мм фанери. Робоча поверхня з'єднувалася з опорною поверхнею двома металевими петлями, що дало можливість змінювати кут нахилу. Необхідний кут нахилу робочої поверхні фіксували завдяки металевому поворотному фіксатору. Обертання робочої поверхні в горизонтальній площині здійснювалось навколо осі, яка була зафіксована в нерухомій основі. На горизонтальній нерухомій основі було нанесено кругову шкалу градусів повороту робочої поверхні навколо осі. Як джерело випромінювання для моделювання сонячного світла, що падає на робочу поверхню геліодона, застосовували світловий проєктор типу VIVIBRIGHT'S GP90, який дає змогу мати пучок достатньо яскравого світла з малим кутом розходження.

На робочій поверхні геліодона розміщували геометричну модель житлового комплексу в масштабі 1 : 500. Макети окремих будівель виготовляли з листового пінопласту і фіксували їх на робочій поверхні відповідно до схеми рис. 1 у вибраному масштабі.

Досліджували затінювання фасадів будівель помісячно, для цього вибрали п'ятнадцятий день кожного місяця. Для визначених днів за допомогою математичної моделі [10], було розраховано для кожної години дня кути нахилу ξ та γ, що визначають кут нахилу робочої поверхні геліодона відносно базової поверхні та кут повороту на джерело світла. На рис. 3 наведені окремі фотографії

результатів фізичного моделювання затінювання фасадів будинків досліджуваного житлового комплексу.

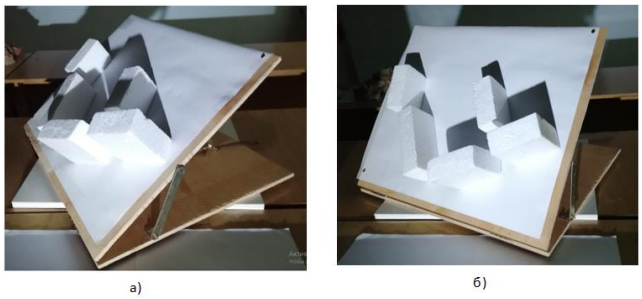

Рис. 3. Модель затінювання будинків житлового комплексу станом на: а – 8:00 15 квітня; б – 10:00 15 травня

За допомогою отриманих результатів фізичного моделювання було визначено погодинно частку освітлення для кожного фасаду для кожного місяця. У такий спосіб були отримані результати для кожного місяця для визначених фасадів будівель.

Аналізуючи отримані результати, можливо зробити висновок, що взаємозатінення сусідніх будинків житлового комплексу може бути значним, а отже, це може впливати на кількість сонячного випромінювання для кожної окремої будівлі. Так, аналізуючи орієнтацію будівель комплексу, бачимо, що фасади 3 та 4 всіх будинків практично весь час перебувають у тіні і їх сонячний потенціал незначний, тому можемо його не враховувати. Водночас умови сонячного випромінювання на фасади 1 та 2 різні для всіх будинків, залежно від часу доби і місяця, тому треба розглядати окремо кожен такий фасад.

Дослідження сонячного потенціалу фасадів будинків житлового комплексу. За допомогою математичної моделі [10] розраховуємо потоки сонячного випромінювання *I*, що падають на фасади будівель житлового комплексу, зважаючи на орієнтацію визначених фасадів для умов чистого неба і відсутності тіней для 25 квітня, результати представлені на рис. 4.

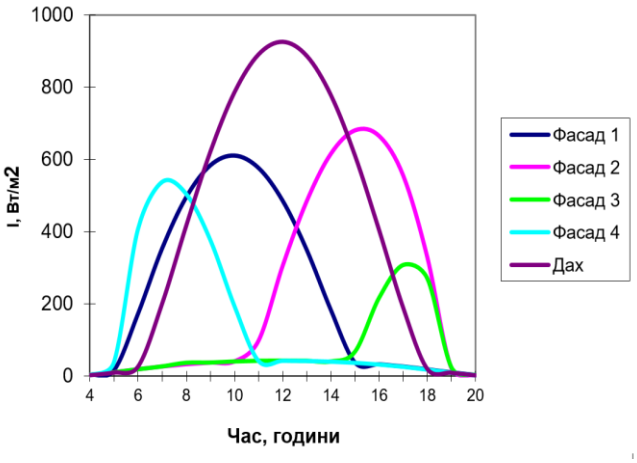

Рис. 4. Зміна сонячної іррадіації фасадів і даху будівлі 1 для ясного неба протягом 25 квітня

Аналогічно, для кожного місяця визначаємо середній потенціал сонячного випромінювання протягом дня для фасадів і даху будівлі 1. Отримані значення зводимо в табл. 2.

Таблиця 2. Середній потенціал сонячного випромінювання за день Q_m для фасадів і даху будівлі 1 для ясного неба, кВт·год/м²·день

Місяць	Фасад 1	Фасад 2	Фасад 3	Фасад 4	Дах
Березень	4,46	3,60	0,60	1,40	6,06
Квітень	4,15	3,95	1,10	2,19	6,74
Травень	3,60	3,94	1,68	2,86	6,83
Червень	3,20	3,85	2,0	3,14	6,76
Липень	3,35	3,88	1,86	3,01	6,77
Серпень	3,90	3,93	1,32	2,44	6,76
Вересень	4,35	3,74	0,76	1,67	6,36
Жовтень	4,30	3,17	0,37	0,97	5,33

Використовуючи експериментальні дані, отримані за допомогою фізичного моделювання взаємного затінення фасадів будівель, із застосуванням математичної моделі розраховуємо потоки інсоляції протягом дня в різні періоди року. На рис. 5 наведені потоки інсоляції на фасад 2 будівлі 1 для ясного неба та з урахуванням затінення.

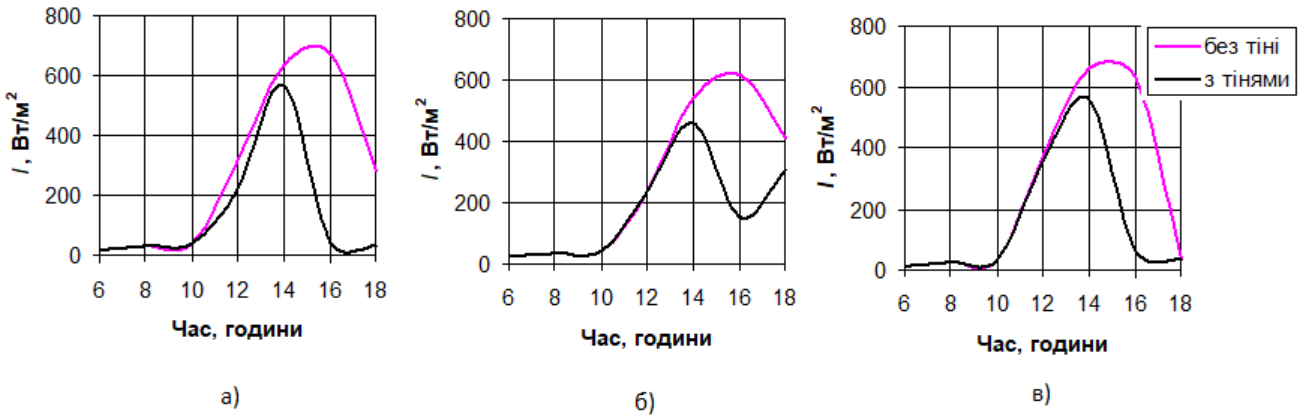

Рис. 5. Зміна сонячної іррадіації протягом дня на фасад 2 будівлі 1 без затінення і з урахуванням тіней: а – 15 квітня; б – 15 червня; в –15 вересня

Як видно на наведених рисунках, потоки досліджуваного сонячного випромінювання на фасад суттєво змінюються протягом року (весна, літо, осінь). Найбільше значення сонячного випромінювання на фасад 2 припадає на весну (квітень), восени (вересень) воно трохи менше. Влітку (червень) сонячне випромінювання на зазначений фасад зменшується, це можна пояснити тим, що влітку середній кут нахилу сонячних променів до вертикальної поверхні фасаду менше.

Також зазначимо, що в окремі періоди дня тіні від сусідніх будинків суттєво зменшують доступне сонячне випромінювання на фасад. Наприклад, після 14-ї години дня доступне випромінювання на фасад 2 падає з 627 до 63 Вт/м^2 через затінення від інших будинків.

Аналогічно визначаємо сонячне випромінювання на фасад 1, у розрахунках використовуємо частки освітленості фасадів *d,* отримані з фізичного моделювання затінення будинку сусідніми спорудами. Фасади 3 і 4 орієнтовані у просторі так, що переважно перебувають в тіні, тому їх сонячний потенціал не має практичного значення. У результаті повний потенціал всієї будівлі 1 розраховуємо, підсумовуючи потенціали двох фасадів та даху. Отримані результати значень середнього потенціалу сонячного випромінювання за день для фасадів 1 і 2 та даху будівлі 1 помісячно зводимо в табл. 3. Як видно, сонячні потенціали фасаду без урахування тіней якісно відрізняються від потенціалів з урахуванням тіней від сусідніх будинків. Найбільше затінювання фасаду спостерігаємо для квітня і травня, коли сонячне випромінювання на фасад зменшується майже втричі.

Таблиця 3. Середній денний потенціал сонячного випромінювання для будинку 1 без затінення і з затіненням помісячно, кВт·год/(м^2·день)

Місяць	Фасад 1		Фасад 2		Дах
	Без тіней	З тінями	Без тіней	З тінями	
Березень	4,46	4,42	3,60	2,26	6,06
Квітень	4,16	4,14	3,95	1,59	6,73
Травень	3,59	3,58	3,94	1,78	6,83
Червень	3,20	3,23	3,85	2,73	6,76
Липень	3,35	3,39	3,88	2,75	6,77
Серпень	3,89	3,91	3,93	2,79	6,76
Вересень	4,35	4,33	3,74	2,36	6,36
Жовтень	4,31	4,25	3,17	2,0	5,33

Далі визначаємо потенціал сонячної енергії E_M для кожної поверхні будинків житлового комплексу за місяць за формулою:

$$E_M = F \cdot N \cdot Q_M \text{, кВт·год}$$

де F – доступна площа поверхні; м^2;

N – кількість днів на місяць;

Q_M – потенціал сонячного випромінювання, кВт·год.

Підсумовуючи значення потенціалів за місяць, можливо визначити сонячні потенціали кожного з будинків та всього житлового комплексу за рік, E_P (кВт·год). Отримані дані зводимо в табл. 4. Як видно з представлених даних, сонячні потенціали окремих будинків житлового комплексу мають достатньо різні значення. Так, будинки 1, 2, 3 за рік можуть отримувати приблизно

однакову енергію сонячного випромінювання, а будинки 4 та 5 отримують сонячної енергії приблизно на 20 та 40 % менше, бо інакше розташовані.

Таблиця 4. Річні сонячні потенціали будинків житлового комплексу

№ будинку	Річний потенціал E_P, МВт·год
1	2477,7
2	2698,9
3	2594,3
4	2113,0
5	1672,8

Дослідження впливу хмарності на сонячний потенціал фасадів будинків житлового комплексу. Додатковим фактором, що може суттєво впливати на потенціал сонячного випромінювання, є наявність хмарності. Дані про ступінь хмарності неба (%) у місті Дніпрі за 2023 рік брали з архіву Українського гідрометеорологічного центру [15, 16]. За допомогою математичної моделі з використанням даних про ступінь хмарності за період з квітня по жовтень 2023 року було визначено середній сонячний потенціал за місяць для фасадів будівлі 1. Результати розрахунків представлені в табл. 5. На рис. 6 показано сонячний потенціал на день для фасаду 1 будинку 1 для вибраних місяців 2023 р.

Таблиця 5. Результати розрахунків сонячного середнього потенціалу за день (кВт·год/м²·день) для ясного неба і з урахуванням хмарності для фасадів будівлі 1 для вибраних місяців 2023 р.

Місяць	Хмарність, %	Фасад							
		1		2		3		4	
		Ясно	Хмарно	Ясно	Хмарно	Ясно	Хмарно	Ясно	Хмарно
Березень	42,8	4,42	2,53	3,60	2,06	0,60	0,34	1,41	0,81
Квітень	31,6	4,14	2,83	3,95	2,70	1,10	0,75	2,19	1,50
Травень	39,2	3,58	2,18	3,94	2,40	1,69	1,03	2,85	1,73
Червень	34,2	3,23	2,12	3,85	2,53	2,00	1,32	3,14	2,07
Липень	21,6	3,39	2,66	3,88	3,04	1,85	1,45	3,01	2,36
Серпень	19,7	3,91	3,14	3,93	3,16	1,31	1,05	2,43	1,95
Вересень	28,3	4,33	3,10	3,74	2,68	0,76	0,54	1,66	1,19
Жовтень	42,7	4,25	2,43	3,17	1,82	0,44	2,52	0,96	0,55

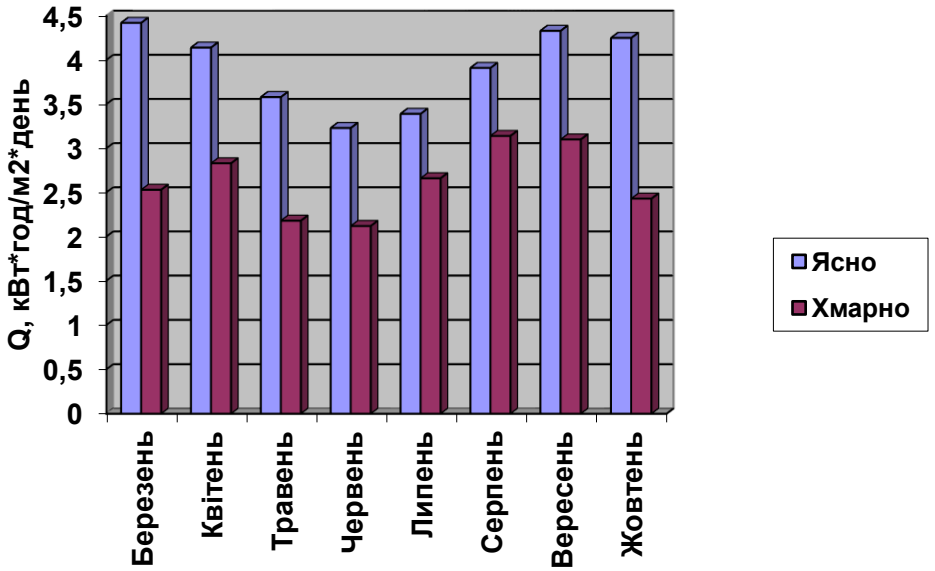

Рис. 6. Діаграма сонячного потенціалу за день для фасаду 1 будинку 1 для вибраних місяців 2023 р.

Аналогічно розраховуємо середні потенціали сонячного випромінювання з урахуванням хмарності для фасадів будинків 2–5 та знаходимо потенціали для цих будинків у цілому за рік (табл. 6).

Таблиця 6. Річні сонячні потенціали будинків житлового комплексу з урахуванням хмарності

№ будинку	Річний потенціал, МВт·год	
	Без урахування хмарності	З урахуванням хмарності
1	2477,74	1982,19
2	2698,93	2159,14
3	2594,38	2075,50
4	2113,05	1690,44
5	1672,82	1338,26

Як видно з наведених даних, хмарність зменшує сонячний потенціал кожного будинку житлового комплексу приблизно на 20 %. Слід зазначити, що ця цифра не є сталою і залежить від кліматичних умов, які можуть суттєво змінюватися щороку. З погляду доступного сонячного потенціалу 2023 рік був сприятливим, бо в період з березня по жовтень хмарність була незначною.

Для практичного використання сонячного потенціалу будинки житлового комплексу повинні бути обладнані сонячними колекторами або сонячними панелями. Сонячні колектори залежно від типу мають середній коефіцієнт корисної дії 0, –0,8. Тому всі п’ять будинків разом можуть отримати теплову енергію приблизно 9245,53 * 0,75 = 6934,15 МВт*год.

ВИСНОВКИ

Досліджено потенціал сонячної енергії для житлового комплексу міста Дніпра протягом року. Була побудована експериментальна установка (геліодон) для дослідження затінення фасадів будинків житлового комплексу. За допомогою фізичного моделювання визначено частку освітлення для кожного фасаду будинків для окремих місяців. Також було оцінено вплив взаємозатінення фасадів будинків житлового комплексу та розраховано потоки сонячного випромінювання, що падають на фасади будівель житлового комплексу протягом дня в різні періоди року. За допомогою математичної моделі розраховано середні потенціали сонячного випромінювання за день для будинків житлового комплексу з урахуванням затінення від сусідніх будівель та хмарності неба. Також оцінено річні сонячні потенціали будинків. Результати моделювання показують, що досліджуваний житловий комплекс за рік може отримати приблизно 6934,15 МВт·год енергії. Такий аналіз можна використовувати для визначення найпридатніших зон на будівлі для оптимального використання сонячного потенціалу в умовах міської забудови.

ПОСИЛАННЯ

1. Відновлювані джерела енергії: видання друге, доповнене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2024. 492 с.
2. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Інтернет-ресурс: https://saee.gov.ua/diialnist/vidnovliuvalna-enerhetyka.
3. Атлас енергетичного потенціалу відновлюваних джерел енергії України: Видання третє, оновлене / За заг. ред. С. О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2024. 56 с.
4. Возняк О. Т. Енергетичний потенціал сонячної енергетики та перспективи його використання в Україні / О. Т. Возняк, М. Є. Янів. Вісн. Нац. унту "Львів. політехніка". Теорія і практика буд-ва. 2010. N 664. С. 7–10.
5. European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, The European Parliament and the Council of the European Union (Ed.) Directive 2010/31/EU, Brussels, 2010.
6. Gooda C. S., Lobaccaroa G., Hårklaub S. Optimization of solar energy potential for buildings in urban areas – a Norwegian case study. Energy Procedia, 58, 2014. Pp. 166–171.
7. Mohajer N., Gudmundsson A., Kunckler T., Upadhyay G., Assouline D.,. Kämpf J. H, Scartezzini J. L. A solar-based sustainable urban design: the effects of city-scale street-canyon geometry on solar access in Geneva, Switzerland. Applied Energy, vol. 240, April 2019, pp. 173–190.
8. Matuska T. and Zmrhal V. Shading analysis of facade collectors in urban environment. Proceedings 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EUROSUN 2008) Lisbon, Portugal, 7–10 October 2008, vol. 1, pp. 568–574.
9. Solar energy in the city: Data-driven review on urban photovoltaics J. McCarty a,b,∗, C. Waibel a,b , S.W. Leow c, A. Schlueter Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 211, April 2025, 115326
10. Reshetnyak, I., Kovalyov, S., Kozlov, Y., Pavlus, S., & Shkrabets, F. (2026). A MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATION OF SOLAR ENERGY POTENTIAL IN MODERN URBAN DEVELOPMENT. Vidnovluvana Energetika , (1(84), 187-200. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2026.1(84).187-200
11. Mghouchi Y. El, Bouardi A. El, Choulli Z., Ajzoul T. New model to estimate and evaluate the solar radiation. Int. Journal of Sustainable Built Environment, 2014, vol. 3, issue 2, pp. 225–234.
12. Романько Я. В., Решетняк И. Л. Моделирование переноса солнечного излучения в узких каньонах, образованных зданиями и сооружениями. Теплотехніка, енергетика та екологія в металургії: колективна монографія. У двох книгах. Книга перша / Під загальною редакцією д.т.н., проф. Ю. С. Пройдака. Дніпро: Нова ідеологія, 2017. С. 250–255.
13. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. Sandia National Laboratories. Report 2012–2389, 2012. 67 p.
14. Картографічний сервіс від компанії Google. Інтернет-ресурс https://www.google.com.ua/maps/place/

УДК 620.92 https://doi.org/10.36296/1819-8058.2026.2(85).252-265

THE STUDY OF AVAILABLE SOLAR ENERGY POTENTIAL FOR URBAN COMPLEX IN THE CITY OF DNIPRO

Received Apr. 21, 2026; accepted Jun. 26, 2026
Available online June. 30, 2026

Reshetnyak I.[1], Kovalyov S.[2], Kozlov Y.[3], Shkrabets F.[4]

Author for correspondence: Reshetnyak Iryna,
e-mail: iresh390@gmail.com

[1] Cand. of Tech. Sciences
https://orcid.org/0000-0001-6900-7428

[2] Cand. of Chem. Sciences
https://orcid.org/0000-0001-8839-2392

[3] Cand. of Tech. Sciences
https://orcid.org/0000-0002-6987-3753

[4] Dr. of Tech. Sciences
https://orcid.org/0000-0003-1650-6017

[1, 2, 3, 4] Ukrainian State University of Science and Technologies, SEI "Ukrainian State University of Chemical Technology". Dnipro, Ukraine

Abstract. *This paper presents a study of the solar energy potential for buildings of an urban complex in the city of Dnipro during the year. For this purpose, an approach where mathematical simulation and physical models are combined to estimate the shading of facades by surrounding buildings and structures. To assess the solar potential of a residential complex, at first, the model calculates the maximum solar potential for certain structures, provided there are no obstacles, in the second stage, the potential is determined taking into account the complex geometry of buildings and their mutual shading, and in the third stage, the effect of cloudiness of the sky is taken into account. The obtained results are important for improving an existing system or for choosing the most efficient solar technologies (solar thermal and photovoltaic).*

Keywords: *solar potential, energy efficiency, mathematical model, heliodon, residential complex.*

List of symbols and abbreviations

I total solar radiation on the surface

Qm – average solar radiation on the surface during the day

Introduction. Today, the majority of Ukraine's population is concentrated in cities. These urban centers consume the vast majority of energy. And forecasts suggest that the percentage of the urban population will grow. The power supply situation across Ukraine is difficult; we have outdated power lines, unstable power supply, power outages and increased electricity tariffs. All these drive the adoption of urban energy production systems that use local resources, reducing dependence on fossil fuels and, as a result, reducing greenhouse gas emissions and preventing harmful emissions into the environment. Individual small=capacity solar systems (solar collectors or photovoltaic cells), which are placed on the facades of houses, have become increasingly widespread. Ukraine's geographical location provides sufficient potential for using solar energy in both industrial and domestic applications. The average annual total solar radiation falling on 1 m^2 of surface in Ukraine ranges from 1,070 kWh/m^2 in the north to 1,400 kWh/m^2 and higher in the south of Ukraine. [1-3]. For example, this is higher than that of Germany – 1,000 kWh/m^2, or even of Poland – 1,080 kWh/m^2 [4]. Therefore, the potential of solar energy in Ukraine is high enough for the widespread implementation of both thermal and photovoltaic equipment. So, in our climate, solar systems can operate all year round, but with variable efficiency.

EU future building requirements mandate both high energy efficiency and a significant degree of local renewable energy production, and building integration of solar energy systems are expected to become more widespread [5]. The use of solar energy in cities through the installation of solar collectors and panels (photovoltaic systems) increases energy sustainability and potentially minimizes urban pollution. And from an architectural design point of view, these systems can be aesthetically and functionally integrated into building structures of facades and roofs [6-9]. Accurately determining a city's solar potential allows to estimate theoretically the level of energy self-sufficiency in urban areas. Mathematical modeling methods are used to practically determine the solar radiation potential of modern cities [10-12]. In urban development, the problem arises from the shading of facades by neighboring buildings or other structures. The complex geometric arrangement of multistory buildings is more characteristic for modern residential complexes. Therefore, specialized complex computer models are developed to take into account the influence of the complex urban geometry [6,7,10-13], these models are updated and improved. In Ukraine, the use of solar energy is increasing, although the number of solar installations is still small compared to neighboring countries. Space and water heating is a significant share of the energy needs for a

residential building, so active and passive use of solar energy is important. The highest solar radiation is available during the summer months and it is far less in winter. The path of the sun through the sky also changes significantly throughout the year. In the city of Dnipro the height of the sun above the horizon in summer reaching about 65°, while in winter it is about 20°. The low angle of incidence of the sun's rays means the facade installations can be a good option, especially for energy used for heating. This also means that shading from surrounding buildings can be a problem. Modern cities are complex urban environments characterized by high building densities due to a gradual increase in population, so the dynamic and complex shading of building surfaces is also an actual problem. A preliminary analysis is necessary to estimate access to sunlight and prevent facade over shadowing its.

The purpose of the work is to determine the available solar energy potential for a separate residential complex in the city of Dnipro, taking into account the solar energy distribution throughout the year, local climatic conditions and shading from surrounding buildings**.**

Characteristics of the urban residential complex of the city of Dnipro. In this work a typical residential complex of five buildings in the Sobornyi district of Dnipro was chosen to assess the potential of solar energy. A satellite photo of this complex (Fig. 1, a) was obtained using the free mapping service of Google [14]. The scheme of the buildings of this complex with orientation to the cardinal points is shown in Fig. 1, b, and Table 1 outlines the geometric characteristics of these buildings. The angle of each facade's normal relative to the south direction was determined taking into account the area of windows and structural elements of the buildings. Solar collectors installation on the buildings roofs at a 45 degree tilt with a south orientation was also studied.

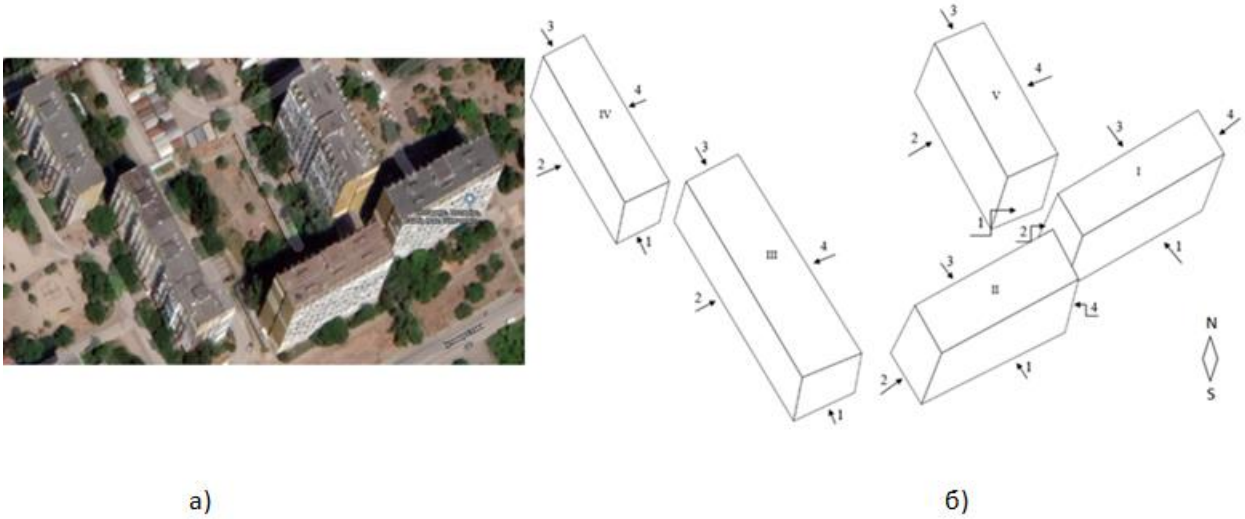

Fig. 1. The urban complex in the Sobornyi district in the city of Dnipro:
I, II, III, IV, V - buildings number, 1, 2, 3, 4 – facades number; a) satellite photo; b) buildings plan

Table 1. Characteristics of the buildings of the urban complex

Building	Facade	Angle of normal from south, degrees	Height, m	Width, m	Free surface area, %
I	1	30	45	46	50
	2	-60		16	100
	3	-150		46	50
	4	120		16	100
II	1	30	45	46	50
	2	-60		16	100
	3	-150		46	50
	4	120		16	100
III	1	30	30	15	40
	2	-60		66	50
	3	-150		15	40
	4	120		66	50

Building	Facade	Angle of normal from south, degrees	Height, m	Width, m	Free surface area, %
IV	1	30	30	15	100
	2	-60		46	50
	3	-150		15	100
	4	120		46	50
V	1	30	30	46	100
	2	-60		16	50
	3	-150		46	100
	4	120		16	50

As shown in Fig. 1, the buildings of the selected residential complex are located in such a way that they can create shading on the surrounding buildings facades depending on sun's position in the sky reducing available solar radiation.

The study of buildings facade shading for a residential complex. To study the building facade shading depending on their geometric location and sun's position in the sky, we chose the method of physical modeling using a heliodon - a device that simulate sunlight on the surface where models of buildings and structures are placed. A desktop heliodon with a fixed light source and a movable flat surface that can be rotated to change the orientation of the studied structure was built, this scheme is shown in Fig. 2.

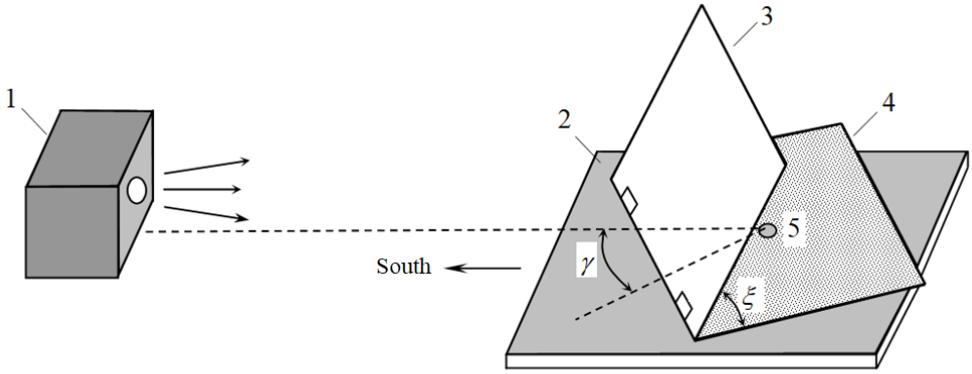

Fig. 2. Scheme of the experimental installation with a desktop heliodon^1 – light source, 2 – fixed base of the installation, 3 – flat working surface, 4 – flat support surface, 5 – rotation axis of the support surface

The stationary base of the device was made of a 20 mm thick chipboard, and the supporting and working surfaces with dimensions of 500 x 600 mm were made of 10 mm plywood. The working surface was connected to the supporting surface with two metal hinges, which made it possible to change the angle of inclination. The required inclination angle of the working surface was fixed using a metal rotary clamp. The working surface is rotated in the horizontal plane around an axis fixed to the stationary base. A circular scale of rotation degrees for the working surface around the axis was applied to the installation base. Multimedia projector like the VIVIBRIGHT GP90 was used as a radiation source for modeling sunlight falling on the working surface of heliodon, it allows having a bright beam with small divergence.

A 1:500 scale geometric model of studied residential complex was placed on the working surface of the heliodon. The scale models of individual buildings were made of sheet foam and fixed on the working surface according to the scheme in Fig. 1.

The monthly shading facades of buildings was studied, for this purpose the fifteenth day of each month was chosen. The inclination angles ξ and γ hourly for specified days were calculated using a mathematical model [10], these values determine the inclination angle of the heliodon working surface relative to the base surface and the rotation angle to the light source. Photo of Fig. 3 illustrates the results of physical modeling of the building facades shading for the studied residential complex.

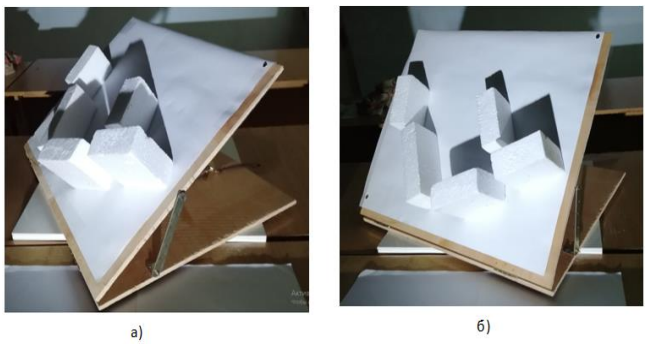

Fig. 3. Model of buildings shading for the urban complex as of: a) 8:00 on April 15; b) 10:00 on May 15

Using the obtained results of physical modeling, the hourly share of lighting for each facade per month was determined. Thus, the results for the specified building facades were obtained per month.

Analyzing the obtained results, it is possible to conclude that mutual shading of neighboring buildings of a residential complex can be significant, and therefore it can affect the amount of solar radiation for each individual building. Thus, analyzing the buildings orientation of the studied complex, we see that facades 3 and 4 of all buildings are almost always in the shade and their solar potential is insignificant, so we can ignore it. At the same time, the conditions of solar radiation on facades 1 and 2 are different for all buildings, depending on the time of day and month, so each such facade should be studied separately.

The study of solar potential of buildings facades in the residential complex. Using the mathematical model [10], we calculated solar irradiation *I* on buildings facades of the residential complex, taking into account the orientation of the specified facades for clear sky conditions and absence of shadows for April 25, the results are presented in Fig. 4.

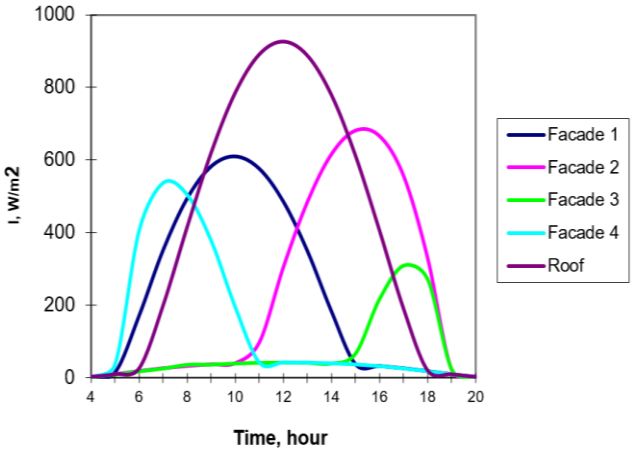

Fig. 4. The solar irradiation for facades and roof of building 1 for clear sky during April 25

Similarly, for each month we determine the average potential of solar irradiation during the day for the facades and roof of building 1. The data obtained is represented in Table 2.

Table 2. Average solar potential per day Q_m for facades and roof of building 1 for clear sky, kWh·hour/m²·day

Month	Facade 1	Facade 2	Facade 3	Facade 4	Roof
March	4,46	3,60	0,60	1,40	6,06
April	4,15	3,95	1,10	2,19	6,74
May	3,60	3,94	1,68	2,86	6,83
June	3,20	3,85	2,0	3,14	6,76
July	3,35	3,88	1,86	3,01	6,77
August	3,90	3,93	1,32	2,44	6,76
September	4,35	3,74	0,76	1,67	6,36
October	4,30	3,17	0,37	0,97	5,33

Using experimental data obtained through physical modeling of mutual shading between building facades, we calculate solar irradiation during the day at different periods of the year using a mathematical model. Fig. 5 shows solar irradiation on facade 2 of building 1 for clear skies and taking into account shading.

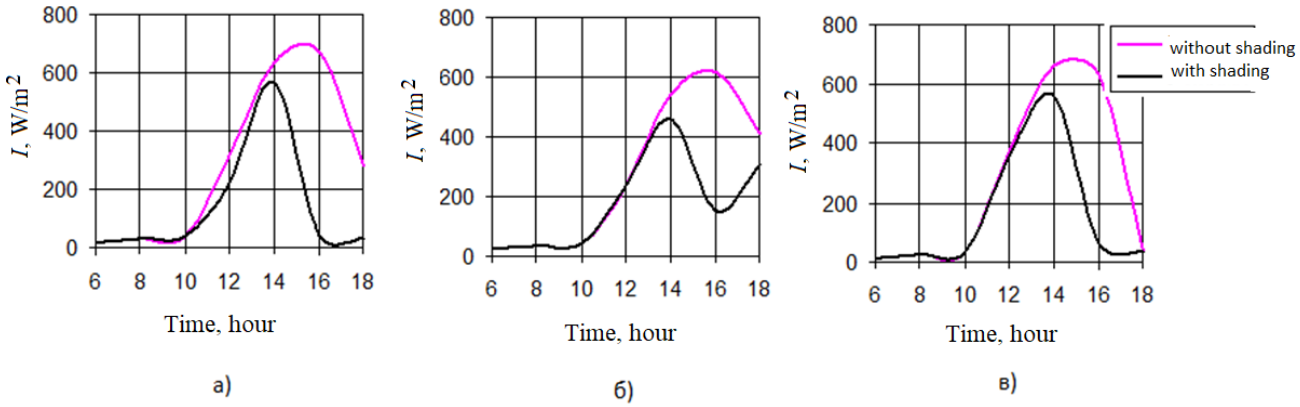

Fig. 5. The solar irradiation during the day on facade 2 of building 1 without shading and taking into account shadows: a) April 15; b) June 15; c) September 15

As can be seen from the figures above, solar irradiation on the studied facade change significantly during the year (spring, summer, autumn). The greatest value of solar radiation on facade 2 falls on spring (April), in autumn (September) the radiation is less, but not significantly. In summer (June) the solar irradiation on the specified facade is less, this can be explained by the fact that in summer the average angle of inclination of the sun's rays to the vertical surface of the facade is less.

It should also be noted that at certain times of the day, shadows from neighboring buildings significantly reduce the available solar radiation on the facade. For example, after 2 p.m., the available radiation on facade 2 drops from 627 to 63 W/m^2 due to shading from other buildings.

Similarly, we determine the solar radiation on facade 1, in the calculations we use the share of facade lighting *d*, obtained from physical modeling shading by neighboring buildings. Facades 3 and 4 are oriented in space so that they are in the shade most of the time, so their solar potential has no practical significance. As a result, we calculate the full potential for building 1 by summing the potentials of the two facades and the roof. The obtained results of the average solar potential per day for the 1st, 2nd facades and the roof of building 1 are summarized monthly in Table 3. As can be seen, the solar potentials of a building facade not accounting for shadows are qualitatively different from the potentials taking into account for shadows from neighboring buildings. The greatest facade shading is observed in April and May, when the solar radiation on the facade decreases by almost 3 times.

Table 3. Average daily solar radiation potential for building 1 without shading and with shading per month, kW·h/(m^2·day)

Month	Facade 1		Facade 2		Roof
	without shading	with shading	without shading	with shading	
March	4,46	4,42	3,60	2,26	6,06
April	4,16	4,14	3,95	1,59	6,73
May	3,59	3,58	3,94	1,78	6,83
June	3,20	3,23	3,85	2,73	6,76
July	3,35	3,39	3,88	2,75	6,77
August	3,89	3,91	3,93	2,79	6,76
September	4,35	4,33	3,74	2,36	6,36
October	4,31	4,25	3,17	2,0	5,33

The next step involes determining the potential of solar energy E_M or each building surface of the residential complex during the month using the formula:

$$E_M = F \cdot N \cdot Q_M \text{, kW·h}$$

where F – available surface area; m^2;

N – number of days per month;

Q_M - solar radiation, kW·h.

Summing up the potential values for the month, it is possible to determine the solar potentials of each of the buildings and the entire residential complex during the year, E_P (kW·h). The obtained data are summarized in Table 4. As can be seen from the presented data, the solar potentials of individual buildings of the residential complex have quite different values. Thus, buildings 1, 2, 3 can receive approximately the same energy of solar radiation per year, and buildings 4 and 5 receive approximately 20 and 40% less solar energy, due to differences in orientation.

Table 4. Annual solar potentials of buildings in the urban complex

Building number	Annual potential E_P, MW·h
1	2477,7
2	2698,9
3	2594,3
4	2113,0
5	1672,8

The study of cloudiness effect on solar potential of the buildings facades of a residential complex. An additional factor that can significantly affect the potential of solar radiation is the presence of cloudiness. Data on the cloudiness degree of the sky (%) in the city of Dnipro for 2023 were taken from the archive of the Ukrainian Hydrometeorological Center [15,16]. Using a mathematical model and data of the cloudiness degree for the period from April to October 2023, the average solar potential per month for

the facades of building 1 was determined. The calculation results are presented in Table 5. Fig. 6 shows the solar potential per day for facade 1 of building 1 for the selected months of 2023.

Table 5. The results of calculations of the average solar potential per day (kW·h/m²·day) for clear skies and taking into account cloudiness for the facades of building 1 for selected months of 2023

Month	cloudiness, %	Facade							
		1		2		3		4	
		Clear	Cloudy	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy	Clear	Cloudy
March	42,8	4,42	2,53	3,60	2,06	0,60	0,34	1,41	0,81
April	31,6	4,14	2,83	3,95	2,70	1,10	0,75	2,19	1,50
May	39,2	3,58	2,18	3,94	2,40	1,69	1,03	2,85	1,73
June	34,2	3,23	2,12	3,85	2,53	2,00	1,32	3,14	2,07
July	21,6	3,39	2,66	3,88	3,04	1,85	1,45	3,01	2,36
August	19,7	3,91	3,14	3,93	3,16	1,31	1,05	2,43	1,95
September	28,3	4,33	3,10	3,74	2,68	0,76	0,54	1,66	1,19
October	42,7	4,25	2,43	3,17	1,82	0,44	2,52	0,96	0,55

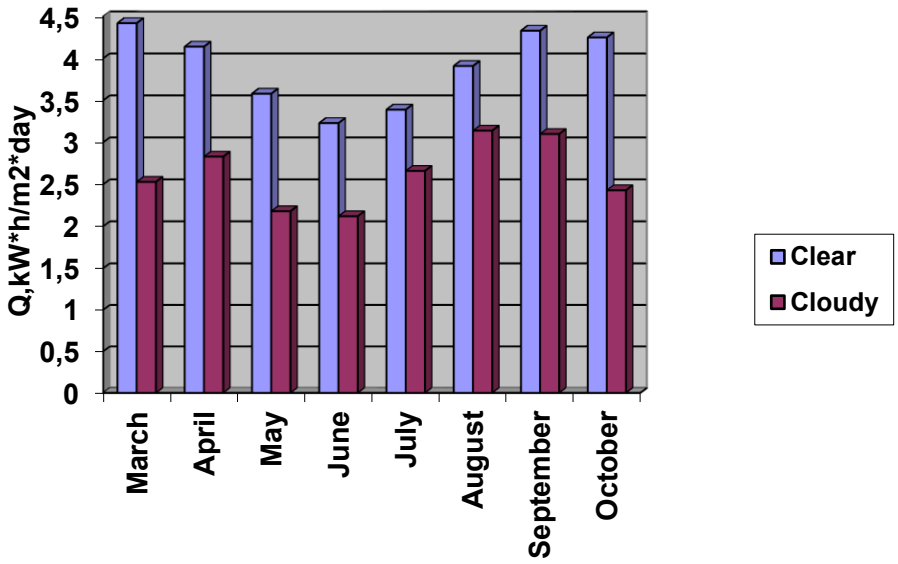

Fig. 6. Solar potential diagram per day for facade 1 of house 1 for selected months of 2023

Similarly, we calculate the average solar potentials taking into account cloudiness for the facades of buildings 2 – 5 and the annual potentials for these buildings (Table 6).

Table 6. Annual solar potentials for buildings of urban complex taking into account cloudiness

Building number	Annual potential, MW·h	
	without cloudiness	with cloudiness
1	2477,74	1982,19
2	2698,93	2159,14
3	2594,38	2075,50
4	2113,05	1690,44
5	1672,82	1338,26

As can be seen from the above data, cloudiness reduces the solar potential of each house in the residential complex by approximately 20%. It should be noted that this value is not constant and depends on climatic conditions, which can change significantly each year. From the point of view of available solar potential, 2023 was favorable, because in the period from March to October there was little cloudiness.

For practical use of solar potential, the houses in the residential complex must be equipped with solar collectors or solar panels. Solar collectors, depending on the type, have an average efficiency coefficient of 0.7 - 0.8. Therefore, the total thermal energy for all five buildings can receive approximately 9245.53 · 0.75 = 6934.15 MW·h.

CONCLUSIONS

The potential of solar energy for a residential complex in the city of Dnipro was studied during the year. An experimental device (heliodon) was built to study the shading of the building facades of a residential complex. Using physical modeling, the share of facade lighting for studied buildings was determined for individual months. The mutual shading between neighboring buildings of the residential complex was also assessed and solar irradiation on the building facades of the residential complex during the day at different periods of the year were calculated. Using a mathematical model, the average solar potentials per day for the buildings of residential complex were calculated, taking into account shading from neighboring buildings and cloudiness of the sky. The annual solar potentials for the buildings were also estimated. The modeling results show that the studied residential complex can receive approximately 6934.15 MW·h of energy per year. Such an analysis can be used to determine the most suitable areas of the building for optimal use of solar pot ential in urban development conditions

REFERENCES

1. Vidnovlyuvani dzherela enerhiyi: vydannya druhe, dopovnene / Za zah. red. S.O. Kudri. Kyyiv: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NANU, 2024. 492 c. (ukr.)
2. Derzhavne ahentstvo z enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennya Ukrayiny. Internet-resurs: https://saee.gov.ua/diialnist/vidnovliuvalna-enerhetyka. (ukr.)
3. Atlas enerhetychnoho potentsialu vidnovlyuvanykh dzherel enerhiyi Ukrayiny: Vydannya tretye, onovlene/za zah. red. S.O. Kudri. – Kyiv: Instytut vidnovlyuvanoyi enerhetyky NAN Ukrayiny, 2024. – 56 c. (ukr.)
4. Voznyak O. T. Enerhetychnyy potentsial sonyachnoyi enerhetyky ta perspektyvy yoho vykorystannya v Ukrayini / O.T. Voznyak, M.Ye. Yaniv // Visn. Nats. untu "Lviv. politekhnika". Teoriya i praktyka bud-va. - 2010. - N 664. - C. 7-10. (ukr.)
5. European Parliament, Directive 2010/31/EU of the European Parliament and of the Council of 19 May 2010 on the energy performance of buildings, The European Parliament and the Council of the European Union (Ed.) Directive 2010/31/EU, Brussels, 2010.
6. C. S. Gooda, G. Lobaccaroa, S. Hårklaub. Optimization of solar energy potential for buildings in urban areas – a Norwegian case study. Energy Procedia, 58, 2014. – pp. 166 – 171.
7. N. Mohajer, A. Gudmundsson, T. Kunckler, G. Upadhyay, D. Assouline, J.H. Kämpf, J.L. Scartezzini A solar-based sustainable urban design: the effects of city-scale street-canyon geometry on solar access in Geneva, Switzerland. Applied Energy, vol. 240, April 2019, pp. 173–190.
8. Matuska T. and Zmrhal V. Shading analysis of facade collectors in urban environment. Proceedings 1st International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings (EUROSUN 2008) Lisbon, Portugal, 7 – 10 October 2008, vol. 1, pp. 568–574.
9. Solar energy in the city: Data-driven review on urban photovoltaics J. McCarty a,b,∗ , C. Waibel a,b , S.W. Leow c , A. Schlueter Renewable and Sustainable Energy Reviews Volume 211, April 2025, 115326
10. Reshetnyak, I., Kovalyov , S., Kozlov , Y., Pavlus, S., & Shkrabets , F. (2026). A MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATION OF SOLAR ENERGY POTENTIAL IN MODERN URBAN DEVELOPMENT. Vidnovluvana Energetika , (1(84), 187-200. https://doi.org/10.36296/1819-8058.2026.1(84).187-200
11. Y. El Mghouchi, A. El Bouardi, Z. Choulli, T. Ajzoul. New model to estimate and evaluate the solar radiation. Int. Journal of Sustainable Built Environment, 2014, vol. 3, issue 2. – pp. 225–234.
12. Romanko Ya.V., Reshetnyak Y.L. Modelyrovanye perenosa solnechnoho yzluchenyya v uzkykh kanonakh, obrazovannыkh zdanyyamy y sooruzhenyyamy. Teplotekhnika, enerhetyka ta ekolohiya v metalurhiyi: kolektyvna monohrafiya. U dvokh knyhakh. – Knyha persha / Pid zahalnoyu redaktsiyeyu d.t.n., prof. Yu.S. Proydaka. – Dnipro: Nova ideolohiya, 2017. – S. 250–255. (ukr.)
13. Global Horizontal Irradiance Clear Sky Models: Implementation and Analysis. Sandia National Laboratories. Report 2012–2389, 2012. – 67 p.
14. Kartohrafichnyy servis vid kompaniyi Google. Internet-resurs: https://www.google.com.ua/maps/place/
15. Dani Ukrayinskoho hidrometeorolohichnoho tsentru. Internet-resurs: https://meteo.ua/archive/164/dnepr-dnepropetrovsk/.
16. https://www.meteoblue.com/en/weather/historyclimate/weatherarchive/dnipro_ukraine_709930