

БУДІВНИЦТВО ТА ЦИВІЛЬНА ІНЖЕНЕРІЯ

УДК 621.383:624.046

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.161-168](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.161-168)

В.А. Настоящий, проф., канд. техн. наук, **В.А. Пашинський**, проф., д-р техн. наук, **М.В. Пашинський**, канд. техн. наук, **М.С. Якименко**, доц., канд. фіз-мат. наук
Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: pva.kntu@gmail.com

Методика розрахунку несучої здатності сонячних панелей як елемента забезпечення енергоефективності будівель

Запропонована методика розрахунку несучої здатності сонячних панелей, розташованих на дахах малоповерхових будинків. Отримані робочі формули для визначення допустимого прольоту панелі типової конструкції залежно від навантажень, відношення розмірів її сторін та кута нахилу до горизонту. З урахуванням кліматичних навантажень у м. Кропивницький встановлено, що вирішальним є розрахунок за вимогами другого граничного стану. Допустимий проліт сонячної панелі з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм може змінюватися від 0,68 м до 1,36 м.
енергоефективність будівель, сонячні панелі, несуча здатність

Постановка проблеми. Однією з поширених енергозберігаючих технологій у галузі будівництва є улаштування сонячних панелей на дахах малоповерхових будинків, які можуть практично повністю забезпечити потреби в електроенергії. На відміну від стаціонарних сонячних електростанцій, кути нахилу та орієнтація сонячних панелей за сторонами світу визначаються конструкцією покрівлі і можуть істотно відрізнятися від оптимальних. Вимушена схема установки обумовлює необхідність прогнозування електричної потужності та оцінювання несучої здатності сонячних панелей з урахуванням кліматичних навантажень для даного географічного району, розмірів панелі та кута її нахилу до горизонту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для забезпечення малоповерхових будівель електроенергією використовуються монокристалічні та полікристалічні сонячні панелі різних виробників. Вони відрізняються розмірами та електричними характеристиками, але мають подібні конструкції у вигляді двох шарів загартованого скла, між якими розміщуються фотоелектричні комірки [1, 2]. Номенклатура сонячних панелей, наявних на українському ринку, широко представлена в мережі Internet. Вибірковий аналіз сайтів торговельних організацій [3, 4] показав, що ширина більшості сонячних панелей, з яких монтуються сонячні електростанції, коливається від 65 см до 130 см, а довжина приймає значення 99...239 см. Панелі менших розмірів, представлені в [4], зазвичай використовуються для живлення окремих невеликих об'єктів типу вуличних ліхтарів, світлофорів, електронних дорожніх знаків тощо.

Сонячні панелі встановлюються на металевий каркас і працюють на згин як плити, обперті по контуру. Навантаження від власної ваги панелей можна визначити за даними виробника, наведеними в [3, 4] та на інших інтернет-сторінках, а кліматичні навантаження від снігу, вітрового тиску та ожеледі – за рекомендаціями ДБН В.1.2-2:2006 [5]. Інженерна методика визначення зусиль та прогинів панелей базується на

таблицях коефіцієнтів [6], залежних від відношення сторін панелі. Найменшими при постійній ширині (прольоті) є зусилля в квадратних панелях. Якщо довжина перевищує ширину більше ніж удвічі, панель можна розраховувати як балку на двох шарнірних опорах з прольотом, рівним ширині панелі.

Перевірки міцності та прогинів сонячних панелей можна виконувати за загальними правилами опору матеріалів та розрахунку пластин [6]. Необхідні для виконання розрахунків механічні характеристики скла наведені в роботах [7, 8]. Аналогічний підхід до розрахунку віконного скла від дії вітрового тиску та змін температури в склопакеті реалізовано в роботі [9]. Відсутність у довідковій літературі та в чинних нормах України чітких вказівок щодо розрахунку сонячних панелей спонукає до розроблення простої інженерної методики розрахунку несучої здатності сонячних панелей за критеріями міцності та жорсткості.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розроблення методики оцінювання несучої здатності сонячних панелей з урахуванням розмірів панелі, кута нахилу до горизонту та кліматичних навантажень у заданому географічному районі.

Передумови та початкові дані. Сонячні панелі встановлюються на металеві каркаси паралельно поверхні скатної покрівлі, тому з урахуванням можливого розміщення на покрівлях мансард в розрахунках несучої здатності панелей розглянуті кути нахилу до горизонту в межах $15^\circ \dots 75^\circ$. Вибірковий аналіз панелей, описаних в [3, 4], дає відношення їх довжини до ширини в межах 1,4...2,0 при ширині (прольоті) панелі 65...130 см. За даними [7, 8] прийняті значення розрахункового опору загартованого скла $R = 35$ МПа та модуля пружності $E = 70$ ГПа. Кліматичні навантаження на панель визначаються за ДБН [5].

Навантаження на панель. На сонячні панелі, розташовані на покрівлях будинків, можуть діяти навантаження від власної ваги, снігу, вітрового тиску та ожеледно-вітрове навантаження. За даними [3, 4], характеристичне значення навантаження від власної ваги панелей становить $p_e = 98 \dots 125$ Па. Враховуючи порівняно невеликий діапазон зміни навантаження та встановлений в [10] коефіцієнт надійності $\gamma_{fmp} = 1,1$, для подальших розрахунків в запас надійності приймемо узагальнене експлуатаційне розрахункове значення навантаження від власної ваги сонячних панелей $p_e = 125$ Па та граничне $p_m = 138$ Па.

Кліматичні навантаження визначені для умов м. Кропивницький згідно з вимогами ДБН [5] з урахуванням особливостей розміщення та конструкції сонячних панелей, а також строку служби 100 років. Характеристичні значення та коефіцієнти надійності за кліматичними навантаженнями дорівнюють:

для ваги снігового покриву	$S_0 = 1230$ Па, $\gamma_{fms} = 1,14$, $\gamma_{fes} = 0,49$;
для максимального тиску вітру	$W_0 = 410$ Па, $\gamma_{fmw} = 1,14$, $\gamma_{few} = 0,21$;
для тиску вітру при ожеледі	$W_B = 210$ Па, $\gamma_{fmwg} = 1,16$;
для товщини стінки ожеледі	$b = 22$ мм, $\gamma_{fmg} = 1,16$.

Для виконання конструктивних розрахунків панелі як плити, обертої по контуру, необхідно визначити складову рівномірно розподіленого навантаження, яка діє перпендикулярно до площини панелі, нахиленої під кутом α до горизонту. Робочі формули для визначення цього навантаження отримані виходячи з вимог і формул ДБН [5] для двох сполучень навантажень. З метою спрощення наведених нижче формул (1)...(3), коефіцієнти, які завжди дорівнюють одиниці, до наведених нижче формул не включені.

Граничне розрахункове значення для сполучення 1 (власна вага панелі, сніг і максимальний тиск вітру) дорівнює

$$q_{1m} = \gamma_n \left[\gamma_{fmp} \cdot p_0 \cdot \cos \alpha + \psi \left(\gamma_{fms} \cdot S_0 \cdot \mu \cdot \cos^2 \alpha + \gamma_{fmw} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right) \right]. \quad (1)$$

Експлуатаційне розрахункове значення для сполучення 1 дорівнює

$$q_{1e} = \gamma_n \left[p_0 \cdot \cos \alpha + \psi \left(\gamma_{fes} \cdot S_0 \cdot \mu \cdot \cos^2 \alpha + \gamma_{few} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right) \right]. \quad (2)$$

Граничне розрахункове значення для сполучення 2 (власна вага панелі, ожеледь з відповідним вітровим тиском) дорівнює

$$q_{2m} = \gamma_n \left[\gamma_{fmp} \cdot p_0 \cdot \cos \alpha + \gamma_{fmg} \cdot b \cdot k \cdot \mu_2 \cdot \rho \cdot g \cdot \cos \alpha + \gamma_{fmwg} \cdot W_0 \cdot C_{aer} \cdot C_h \right]. \quad (3)$$

Оскільки нормами [5] для ваги ожеледі встановлене лише граничне розрахункове значення, експлуатаційне розрахункове значення для сполучення 2 також обчислюється за формулою (3) з урахуванням коефіцієнта надійності за навантаженням від власної ваги панелі $\gamma_{fmp} = 1$.

У формулах (1)...(3) позначено:

γ_n – коефіцієнт відповідальності за [10];

ψ – коефіцієнт сполучення двох змінних навантажень, який згідно з [5] дорівнює 0,9;

μ – коефіцієнт переходу від ваги снігового покриву на поверхні ґрунту до снігового навантаження на покрівлю, який згідно зі схемою 1 додатка Ж ДБН [5] приймає значення $0 \leq \mu \leq 1$ залежно від кута нахилу покрівлі;

C_{aer} – аеродинамічний коефіцієнт, який визначається за схемою 2 додатка І ДБН [5] з урахуванням форми та співвідношення розмірів споруди і в запас надійності приймається рівним $0 \leq C_{aer} \leq 0,8$ залежно від кута нахилу панелі;

C_h – коефіцієнт висоти споруди, який згідно з пунктом 9.9 ДБН [5] для місцевості типу ІІ (сільська місцевість з невеликими спорудами, будинками і деревами) на висоті 10 м над поверхнею землі прийнято рівним 0,9;

$\mu_2 = 0,6$ – частка поверхні елемента, що піддається обледенінню;

$k = 1$ – коефіцієнт з таблиці 10.2 ДБН [5] для висоти над поверхнею 10 м;

$g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння;

$\rho = 0,9 \text{ г/см}^3$ – густина льоду.

Результати обчислення навантажень за формулами (1)...(3) для різних кутів нахилу панелей наведені в таблиці 1. Результуючі розрахункові значення нормальної до поверхні панелі складової сумарного навантаження q_m та q_e прийняті більшими з відповідних значень для двох розглянутих сполучень навантажень.

Таблиця 1 – Розрахункові значення навантажень на сонячні панелі

α	μ	C_{aer}	q_{1m}	q_{2m}	q_m	q_{1e}	q_{2e}	q_e
15	1	0,15	1498	320	1498	696	307	696
20	1	0,20	1446	324	1446	666	312	666
25	1	0,25	1376	327	1376	629	315	629
30	0,857	0,30	1143	327	1143	521	315	521
35	0,714	0,35	930	325	930	421	314	421
40	0,572	0,40	743	322	743	332	311	332
45	0,429	0,50	608	328	608	260	319	328
50	0,286	0,60	507	334	507	201	325	334
55	0,143	0,70	440	337	440	157	330	337
60	0	0,80	406	340	406	127	333	340
65	0	0,80	395	317	395	117	312	317
70	0	0,80	383	293	383	107	289	293
75	0	0,80	371	269	371	96	266	269

На рисунку 1 зображені графіки залежності навантажень від кута нахилу панелей, побудовані за даними таблиці 1. З рисунка видно, що для розрахунку за першою групою граничних станів вирішальним є перше сполучення навантажень (власна вага панелі, сніг і максимальний тиск вітру). Перевірку прогину при кутах нахилу панелей до 42° слід виконувати з урахуванням першого сполучення навантажень, а при більших кутах нахилу вирішальним стає друге сполучення навантажень (власна вага панелі та ожеледь з відповідним вітровим тиском). Це твердження справедливе для умов м. Кропивницький, але в інших місцевостях співвідношення навантажень може бути іншим.

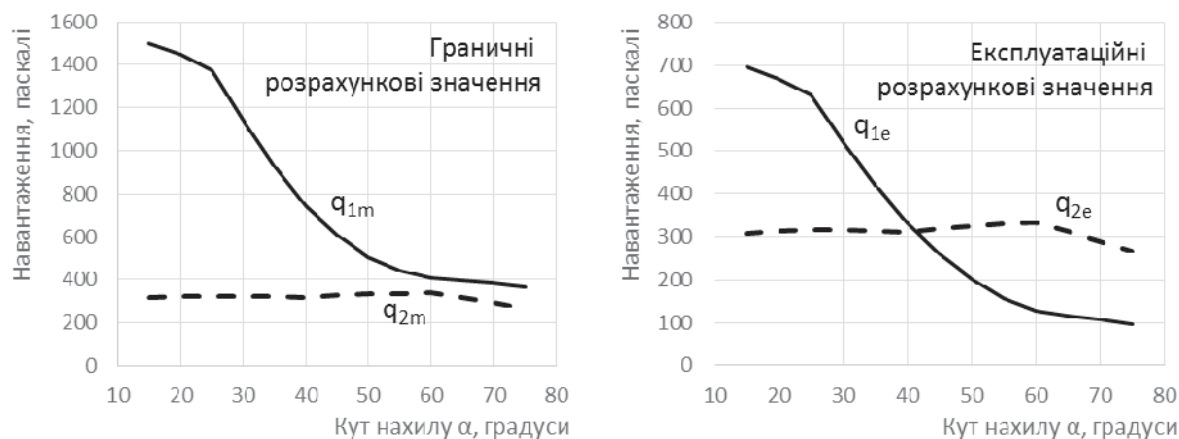


Рисунок 1 – Залежності розрахункових значень навантажень від кута нахилу панелей

Джерело: розроблено авторами

Розрахунки несучої здатності панелей. Сонячна панель складається з двох шарів загартованого скла, між якими розміщені фотоелементи. В запас надійності зв'язок між верхнім і нижнім склом не враховується. Тоді конструкцію сонячної панелі можна представити у вигляді двох плит, які працюють на згин незалежно одна від одної, сприймаючи половину діючого навантаження кожна. Розрахунок плит, шарнірно обпертих по контуру, з достатньою точністю можна виконати з використанням коефіцієнтів, наведених в [6] та в інших джерелах. З урахуванням визначених цим методом максимальних значень згинальних моментів і прогинів, перевірки міцності та жорсткості сонячних панелей слід виконувати за формулами:

$$\sigma = \frac{3 \cdot k_m q_m L^2}{h^2} \leq R; \quad \frac{f}{L} = \frac{k_f q_e L^3}{2 \cdot E \cdot h^3} \leq \left[\frac{f}{L} \right]. \quad (4)$$

Коефіцієнти k_m і k_f наведені в таблицях [6] залежно від відношення B/L більшого розміру панелі до меншого. Для полегшення автоматизації розрахунків ці залежності апроксимовані виразами:

$$k_m = 0,3145 - \frac{0,267}{(B/L)^{0,33}}; \quad k_f = 0,472 - \frac{0,428}{(B/L)^{0,246}}. \quad (5)$$

У формулах (4) і (5) позначено:

q_m , q_e – граничне та експлуатаційне розрахункові значення рівномірно розподіленого навантаження на панель за формулами (1), (2), (3), Па;

B , L – більший та менший розміри панелі, м;

h – товщина скла, мм;

R – розрахунковий опір скла при згині, Па;

E – модуль пружності скла, Па.

Гранично допустимі відносні прогини встановлені в ДСТУ [11] для плит прольотом до 1 м рівними 1/120 прольоту, а при прольоті 3 м вони дорівнюють 1/150 прольоту. Враховуючи, що менший проліт сонячних панелей зазвичай не перевищує 1,3 м, в запас надійності прийняте гранично допустиме значення прогину $[L/f] = 125$.

З формул (3) і (4) видно, що напружено-деформований стан плити відомої конструкції визначається трьома параметрами: розрахунковим значенням навантаження q_m чи q_e , які у свою чергу залежать від кута нахилу панелі α , меншим прольотом L та відношенням більшого розміру плити до меншого B/L . Для зменшення кількості впливаючих параметрів та забезпечення можливості табличного й графічного відображення результатів вирішено визначати гранично допустимі значення прольоту панелі за критеріями міцності L_m та жорсткості L_f . З формул (4) отримані залежності:

$$L_m = h \cdot \sqrt{\frac{R}{3 \cdot k_m q_m}}, \quad L_f = h \cdot \sqrt[3]{\frac{2 \cdot E}{k_f q_e [L/f]}}. \quad (6)$$

З формул (6) видно, що допустимий проліт панелей за критеріями міцності L_m та жорсткості L_f прямо пропорційний товщині скла h . Це дозволяє легко перерахувати допустимі прольоти при зміні товщини скла обшивок, або підібрати необхідну товщину скла при заданому прольоті сонячної панелі.

Розрахунки за наведеними формулами реалізовані у вигляді розрахункового бланку в середовищі Microsoft Excel. Він дозволяє для довільних вихідних даних виконати розрахунки та побудувати залежності, зображені на рисунках 1 і 2. Таким чином розв'язується завдання оцінювання несучої здатності сонячної панелі відомих розмірів, встановленої в заданій географічній точці під певним кутом до горизонту.

Результати розрахунків за формулами (6) для різних значень кута нахилу α та вказаних на графіках відношень розмірів сторін панелі B/L відображені на рисунках 2а та 2б. Немонотонний вигляд залежностей на рисунку 2б пояснюється проілюстрованою на рисунку 1 зміною розрахункової комбінації експлуатаційних значень навантажень. Розрахунки показали, що для кліматичних навантажень у м. Кропивницький в усіх випадках вирішальною є умова жорсткості.

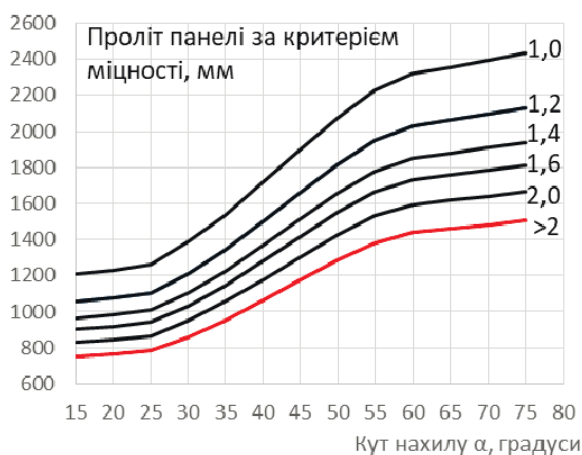


Рисунок 2а – Допустимі прольоти сонячних панелей за критерієм міцності при різних відношеннях розмірів сторін та кута нахилу до горизонту
Джерело: розроблено авторами

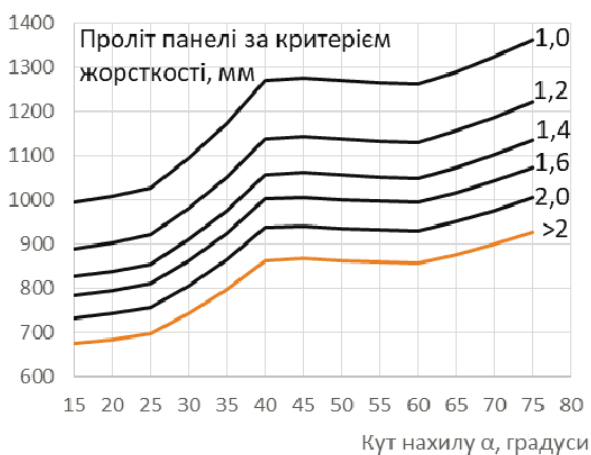


Рисунок 2б – Допустимі прольоти сонячних панелей за критерієм жорсткості при різних відношеннях розмірів сторін та кута нахилу до горизонту

З рисунків 2а та 2б видно, що допустимий проліт (менший розмір) сонячної панелі з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм може змінюватися від 0,68 м до 1,36 м. Він зростає при збільшенні кута нахилу та при наближенні відношення розмірів сторін B/L до одиниці. До кута нахилу 42° допустимий проліт істотно зростає унаслідок зменшення снігового навантаження. При більших кутах нахилу панелей вирішальним стає ожеледно-вітрове навантаження, яке мало залежить від кута нахилу панелі.

Аналіз розмірів панелей за даними [3, 4] показав, що відношення довжини більшої сторони до меншої в основному змінюється від 1,4 до 2,0. В цих межах допустимий проліт змінюється на 13...16%. Незначні зміни дозволяють з метою спрощення прийняти в запас надійності значення допустимого прольоту, що відповідають відношенню сторін $B/L = 2,0$. Гарантований запас надійності при усіх можливих відношеннях розмірів сторін панелей B/L можна отримати при використанні нижньої кривої з рисунків 2а та 2б, яка відповідає $B/L > 2$ і по суті отримана у результаті розрахунку панелі, як балки на двох опорах. Такий варіант розрахунку занижує допустимі прольоти сонячних панелей на 23...29% порівняно з розрахунком для $B/L = 1,4$.

Висновки.

1. Отримані робочі формули для обчислення навантажень, перевірки міцності та жорсткості, а також визначення допустимого за критеріями міцності та жорсткості прольоту сонячних панелей, які встановлюються на покрівлях малоповерхових будівель під різними кутами до горизонту.

2. Встановлено, що в умовах м. Кропивницький перевірку міцності завжди слід виконувати на комбінацію навантажень від власної ваги панелі, снігу та вітру. Перевірку жорсткості при невеликих кутах нахилу панелі слід здійснювати на цю ж комбінацію навантажень, а при кутах понад 42° вирішальним стає ожеледно-вітрове навантаження.

3. Допустимий проліт (менший розмір) сонячної панелі зростає при збільшенні кута нахилу до горизонту та при наближенні відношення розмірів сторін панелі до одиниці. Для панелей з обшивками із загартованого скла товщиною 3 мм проліт становить 0,68...1,36 м. В усіх розрахункових випадках в умовах м. Кропивницький вирішальною є умова жорсткості.

4. Реалізація обчислень у формі розрахункового бланку в середовищі Microsoft Excel дозволяє виконати аналогічні обчислення для інших вихідних даних.

5. Подальші дослідження орієнтуються на встановлення допустимих прольотів сонячних панелей типової конструкції в умовах кожної з областей України.

Список літератури

1. Сонячна панель. Матеріал з Вікіпедії – вільної енциклопедії. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_панель (дата звернення: 07.09.2021)
2. Сонячна батарея - будова і принцип роботи. URL: <https://prel.prom.ua/ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html> (дата звернення: 07.09.2021)
3. ECO TECH UKRAINE. Солнечная энергетика, энергоэффективные технологии. Продажа, строительство, сервис. URL: <https://eco-tech.com.ua/g11422607-solnechnye-batarei-paneli> (дата звернення: 07.09.2021)
4. Solar-Tech. Альтернативні джерела енергії. Продаж, установка, обслуговування. URL: <https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/> (дата звернення: 11.09.2021)
5. ДБН В.1.2-2:2006. Система надійності та безпеки в будівництві. Навантаження і впливи. Київ: Мінбуд України, 2006. 59 с.
6. Таблицы для расчета пластин, шарнирно опертых по контуру. URL: <http://doctorlom.com/item374.html> (дата звернення: 11.09.2021)

7. Мiцнiсть скла. Несуча здатнiсть. Розрахунок на мiцнiсть. Допустимi напруження при згин. URL: <https://okna.ua/ua/library/art-mitsnist-skla-nesucha-zdatnist> (дата звернення: 16.09.2021)
8. Характеристики стекла – общие технические характеристики. Стекольная Компания. URL: <https://90zavod.ru/xarakteristiki/xarakteristiki-stekla-obshhie-texnicheskie-xarakteristiki-sostav-prochnost-i-t-%E2%80%95stekolnaya-kompaniya.html#i-22> (дата звернення: 16.09.2021)
9. Куренкова А.Ю., Кузьменко А.В., Куренкова О.М. Формула стеклопакета для зданий повышенной этажности. *Инженерно-строительный журнал*. 2011. № 8. С. 63–68.
10. ДБН В.1.2-14 : 2018. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Загальні принципи забезпечення надійності та конструктивної безпеки будівель і споруд. К.. Мінрегіон України. 2018. 30 с. (Державні будівельні норми України)
11. ДСТУ Б В.1.2-3 : 2006. Система забезпечення надійності та безпеки будівельних об'єктів. Прогини і переміщення. Вимоги проектування. К.: Мінбуд України, 2006. 15 с. (Національний стандарт України).

References

1. Sonyachna panel'. Material z Vikipediyi — vil'noyi entsyklopediyi. [Solar panel. From Wikipedia, the free encyclopedia]. *uk.wikipedia.org*. Retrieved from https://uk.wikipedia.org/wiki/Сонячна_панель [in Ukrainian].
2. Sonyachna batareya - budova i pryntsyyp roboty. [Solar battery - structure and principle of operation]. *prel.prom.ua*. Retrieved from <https://prel.prom.ua/ua/a315870-sonyachna-batareya-budova.html> [in Ukrainian].
3. ECO TECH UKRAINE. Solnechnaya energetika, energoeffektivnyye tekhnologii. Prodazha, stroitel'stvo, servis. [ECO TECH UKRAINE. Solar energy, energy efficient technologies. Sale, construction, service]. *eco-tech.com.ua*. Retrieved from <https://eco-tech.com.ua/g11422607-solnechnye-batarei-paneli> [in Russian].
4. Solar-Tech. Al'ternatyvni dzhherela enerhiyi. Prodazh, ustanovka, obsluhovuvannya. [Solar-Tech. Alternative Energy Sources. Sale, installation, service]. *solar-tech.com.ua*. Retrieved from <https://solar-tech.com.ua/ua/solar-electricity/solar-panels/> [in Ukrainian]
5. DBN V.1.2-2:2006. Systema nadiynosti ta bezpeky v budivnytstvi. Navantazhennya i vplyvy. [DBN V.1.2-2: 2006. Reliability and safety system in construction. Loads and effects] (2006). Kyiv: Ministry of Construction of Ukraine [in Ukrainian].
6. Tablitsy dlya rascheta plastin, sharnimo opertykh po konturu. [Tables for calculating plates hinged along the contour]. *doctorlom.com*. Retrieved from <http://doctorlom.com/item374.html> [in Russian]
7. Mitsnist' скла. Nesucha zdatnist'. Rozrakhunok na mitsnist'. Dopustymi napruzhennya pry z'hyn. [Strength of glass. Load-bearing capacity. Calculation of strength. Permissible bending stresses]. *okna.ua*. Retrieved from <https://okna.ua/ua/library/art-mitsnist-skla-nesucha-zdatnist> [in Ukrainian].
8. Kharakteristiki stekla – obshchiye tekhnicheskiye kharakteristiki. Stekol'naya Kompaniya. [Glass characteristics - general technical characteristics. Glass Company]. *90zavod.ru*. Retrieved from: <https://90zavod.ru/xarakteristiki/xarakteristiki-stekla-obshhie-texnicheskie-xarakteristiki-sostav-prochnost-i-t-%E2%80%95stekolnaya-kompaniya.html#i-22> [in Russian].
9. Kurenkova, A.Yu. (2011). Formula steklopaketa dlya zdaniy povyshennoy etazhnosti. [Formula of double-glazed windows for high-rise buildings]. *Formula steklopaketa dlja zdaniy povyshennoj jetazhnosti – Engineering and construction magazine*, 8, 63–68 [in Russian].
10. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Zahal'ni pryntsyyp zabezpechennya nadiynosti ta konstruktyvnoyi bezpeky budivel' i sporud [Reliability and safety system for construction projects. General principles of ensuring the reliability and structural safety of buildings and structures.] (2018). *DBN V.1.2-14:2018*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].
11. Systema zabezpechennya nadiynosti ta bezpeky budivel'nykh ob'yektiv. Prohyny i peremishchennya. Vymohy proektuvannya [System for ensuring the reliability and safety of construction sites. Deflections and displacements. Design requirements]. (2006). *DSTU B V.1.2-3:2006*. Kyiv: Ministry of Regional Development of Ukraine [in Ukrainian].

Vladyslav Nastoyashchii, Prof., PhD tech. sci., **Viktor Pashynskyi**, Prof., DSc., **Mykola Pashynskyi**, PhD tech. sci., **Serhii Yakimenko**, Assoc. Prof., PhD phys.&math. sci.
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine

Method for Calculating the Bearing Capacity of Solar Panels as an Element of Ensuring the Energy Efficiency of Buildings

Extensive use of solar panels for providing low-rise buildings with electricity has led to the development of methods for assessing the load-bearing capacity of solar panels, taking into account the size of the panel, the angle of inclination to the horizon and climatic loads in a given geographical area.

The solar panels are calculated as plates hinged along the contour. Self-weight loads of the panel, snow, wind and ice loads are determined according to DBN B.1.2-2: 2006 "Loads and impacts" and are reduced to a component that is normal to the plane of the panel. Working formulas were obtained for determining the extreme and operational design values of loads, checking the strength and deflection of panels, as well as the maximum allowable spans according to the criteria of strength and structural rigidity. An example of calculation of solar panels placed at angles of inclination to the horizon from 15° to 75° on the roof of a building in Kropyvnytskyi were performed. Strength checks should be performed on combinations of panel self-weight, snow and maximum wind pressure. Deflection check at small angles of panels inclination is carried out taking into account the same combination of loads, and at big angles of inclination - taking into account only ice load. In all cases, the condition of rigidity is decisive. Permissible span L (smaller size) of a solar panel with 3 mm tempered glass sheathing in the conditions of Kropyvnytskyi varies from 0.68 m to 1.36 m. It increases as the angle of inclination increases and as the B/L ratio approaches to 1. The allowable span varies by 13...16% with length ratio of the larger side of solar panel to the smaller one in the range from 1.4 to 2.0. This allows to take the values of the allowable span, corresponding to the ratio of the parties $B/L=2.0$ in order to simplify the safety margin.

The obtained working formulas and their implementation in the form of a calculation sheet in Microsoft Excel allows to perform similar calculations for other source data. Further research focuses on the establishment of allowable spans of solar panels of typical design in the conditions of each of the regions of Ukraine.

energy efficiency of buildings, solar panels, bearing capacity

Одержано (Received) 28.09.2021

Прорецензовано (Reviewed) 22.10.2021

Прийнято до друку (Approved) 31.03.2022

УДК 624.044:624.012

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).1.168-175](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).1.168-175)

В.А. Пашинський, проф., д-р. техн. наук, **А.А. Тихий**, доц., канд. техн. наук,
М.В. Пашинський, канд. техн. наук, **С.О. Карпушин**, доц., канд. техн. наук,
В.В. Яцун, доц., канд. техн. наук

*Центральноукраїнський національний технічний університет, м. Кропивницький, Україна
e-mail: a.a.tihiy@gmail.com*

Порівняння методів розрахунку плитних фундаментів з урахуванням результатів інженерно-геологічних вишукувань та геодезичних спостережень за процесом просідання

На прикладі фундаменту під силос зернохосвища у вигляді круглої залізобетонної плити діаметром 20,4 м виконане порівняння трьох методів розрахунку осідання суцільних плитних фундаментів. Розрахунки за моделлю плити на пружній основі та за моделлю об'ємних скінченних елементів дали середні значення осідання 2,15 см та 2,4 см, близькі до фактичної величини 1,75 см, отриманої за результатами натурних геодезичних спостережень, що велися з початку будівництва об'єкту. Регламентований чинними нормами проектування розрахунок за методом пошарового підсумовування дав різко завищений результат 13,7 см.

плитні фундаменти, осідання, методи розрахунку