

д. т. н., професор **Мартинов В. Л.**,
arx.martynov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0822-1970

к. т. н., доцент **Чирва Т.Л.**,
tetyana.chyrva@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6657-5443
Київський національний університет будівництва і архітектури

ОПТИМІЗАЦІЯ ОРІЄНТАЦІЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНИХ БУДІВЕЛЬ, ЩО ОБЕРТАЮТЬСЯ

Розв'язання задачі щодо підвищення енергоефективності будівель можливе за рахунок оптимізації азимутальної орієнтації окремо розташованих і блокованих будівель з точки зору мінімізації тепловтрат через теплоізоляційну оболонку будівлі з урахуванням надходження тепла від сонячної радіації та впливу вітру. Тому з метою визначення оптимальної орієнтації було уперше створено графічний та аналітичний способи моделювання теплового балансу як окремих граней, так і будівлі в цілому протягом опалювального періоду за різних вихідних умов, які реалізовано у вигляді ППП Optorient, призначеного для оптимізації азимутальної орієнтації гранних енергоефективних будівель визначеної геометрії, що дискретно змінюють орієнтацію протягом доби або року. При розрахунку орієнтації енергоефективної будівлі враховуються нормативні вимоги щодо їх освітлення та інсоляції.

Розроблену структуру оптимізації орієнтації (A_B) будівель, що дискретно змінюють орієнтацію, з геометричною формою у вигляді багатогранника або циліндра, апроксимованого площинами.

Оптимальна орієнтація будівлі може визначатися для інтервалу часу протягом доби або року, при цьому змінним параметром є азимутальна орієнтація будівлі (A_B). Мінімізуються тепловтрати через огорожувальні конструкції теплоізоляційної оболонки будівлі протягом опалювального періоду, а також теплонадходження – для літнього періоду. При цьому враховуються особливості теплопередачі непрозорих і світлопрозорих конструкцій, де незмінними є параметри їх опору теплопередачі, об'єм і геометрична форма будівлі. А для визначення оптимальної орієнтації енергоефективної будівлі пропонується аналітичний і графічний способи розв'язання.

Розроблено алгоритм визначення азимутальної орієнтації будівлі з урахуванням нормативних вимог до освітлення та інсоляції.

Ключові слова: енергоефективні будівлі; оптимальні параметри; оптимізація орієнтації будівлі; графічні моделі; геометричне моделювання; архітектурне проектування.

Постійне слідкування будівлі за сонцем може значно підвищити її енергоефективність за рахунок максимального використання сонячної енергії, але при цьому вимагає суттєвих енергетичних витрат на обертання будівлі. Тому зміна орієнтації будівлі кілька разів протягом часу доби або року дає можливість більш ефективно використовувати позитивний теплоенергетичний вплив навколишнього середовища, у першу чергу, вплив сонячної радіації та мінімально витратити енергію на обертання. Отже, задача визначення оптимальної орієнтації окремо розташованих будівель зводиться до оптимізації азимутальної орієнтації для інтервалів часу протягом доби або року (дискретна зміна орієнтації) з точки зору мінімізації тепловтрат через теплоізоляційну оболонку будівлі для опалювального періоду (з урахуванням впливу сонця і вітру), а також мінімізації теплонадходжень у літній період. При цьому змінним параметром є азимут будівлі A_b .

На рис. 1 зображені будівлі, що можуть змінювати свою орієнтацію за рахунок обертання навколо вертикальної осі. Такі будівлі можуть мати як один суцільний об'єм, так і складатися з окремих об'ємів поверхів у вигляді асиметричних дисків, за різної геометричної форми (нанизаних на стрижень), що обертаються незалежно один від одного. У цьому випадку здійснюється оптимізація орієнтації кожного поверху окремо.



Рис. 1 Будівлі, що змінюють орієнтацію

Таким чином, для визначення оптимальної орієнтації будівлі, що дискретно обертається, пропонуються аналітичний та графічний комп'ютеризовані способи визначення її орієнтації, а також методика та алгоритм їх розв'язання, які наведено далі.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Наступні роботи були присвячені питанням проектування енергоефективних будівель та визначенню оптимальної орієнтації окремо розташованих будівель. У статті [1] розроблено принципи проектування будівель з низьким споживанням енергії та пасивних будівель. Детально розглянуто фактори, що впливають на тепловтрати та тепловтрати в пасивних будівлях. Дослідження [2] створили та рекомендували ефективні та збалансовані рішення для зменшення інсоляції та збільшення енергозбереження, збалансовуючи денне світло та видимість. Було розглянуто чотири основні класи: самозатінювальні фасади, затінювальні пристрої, співвідношення вікна до стіни та орієнтація будівлі. У роботі [3] розглядаються питання математичного моделювання та оптимізації теплоефективності будівель. У роботі [4] досліджено проблему підвищення енергоефективності будівель шляхом покращення їх інсоляційного режиму. У дослідженнях [5] розглядаються типологічні та конструктивні рішення пасивних житлових будинків. У роботі [6] досліджуються питання оптимізації орієнтації стаціонарних енергоефективних будівель з дотриманням норм освітленості та інсоляції. У статті [7] розглянуто методику розрахунку тепловіддачі при проектуванні теплоізоляції будівельних конструкцій. У [8] розглядається питання підвищення енергоефективності сонячних систем за рахунок дискретної зміни орієнтації. У [9] стаття має на меті оптимізувати орієнтацію будівлі в Тегерані, а також визначити вплив її форми, відносної компактності (RC) і відсотка скління на її оптимізовану орієнтацію. Посилання [10] містить рекомендації щодо орієнтації будинку для нового будівництва. Стаття [11] присвячена міжнародній дослідницькій діяльності з кліматичного проектування будівель. Різноманітні дослідження моніторингу комфорту та енергії як офісних будівель, так і житлових будинків надають важливу інформацію про поведінку мешканців та їхні потреби в конкретних ситуаціях у різних кліматичних умовах. Метою дослідження [12] є встановлення та рекомендація найбільш ефективних та збалансованих рішень для зменшення інсоляції та збільшення енергозбереження при збалансуванні денного світла та видимості. Було розглянуто чотири основні класи: самозатінювальні фасади, затінювальні пристрої, співвідношення вікна до стіни та орієнтація будівлі. У роботі [13] розглядається енергоефективна сонячна система в поєднанні із зовнішнім огороженням енергоефективної будівлі. У роботі описано дані механізму функціонування сонячного колектора за допомогою математичного моделювання.

Мета статті. Для підвищення енергоефективності будівель запропонувати

Способи для визначення оптимальної орієнтації будівлі, що дискретно обертається, запропонувати аналітичний та графічний комп'ютеризовані способи визначення її орієнтації, а також методику та алгоритми їх розв'язання.

Основна частина.

Оптимізація зміни орієнтації будівель протягом доби або року

На рис.2 показано розроблену структуру оптимізації орієнтації (A_B) будівель, що дискретно змінюють орієнтацію, з геометричною формою у вигляді багатогранника або циліндра, апроксимованого площинами.

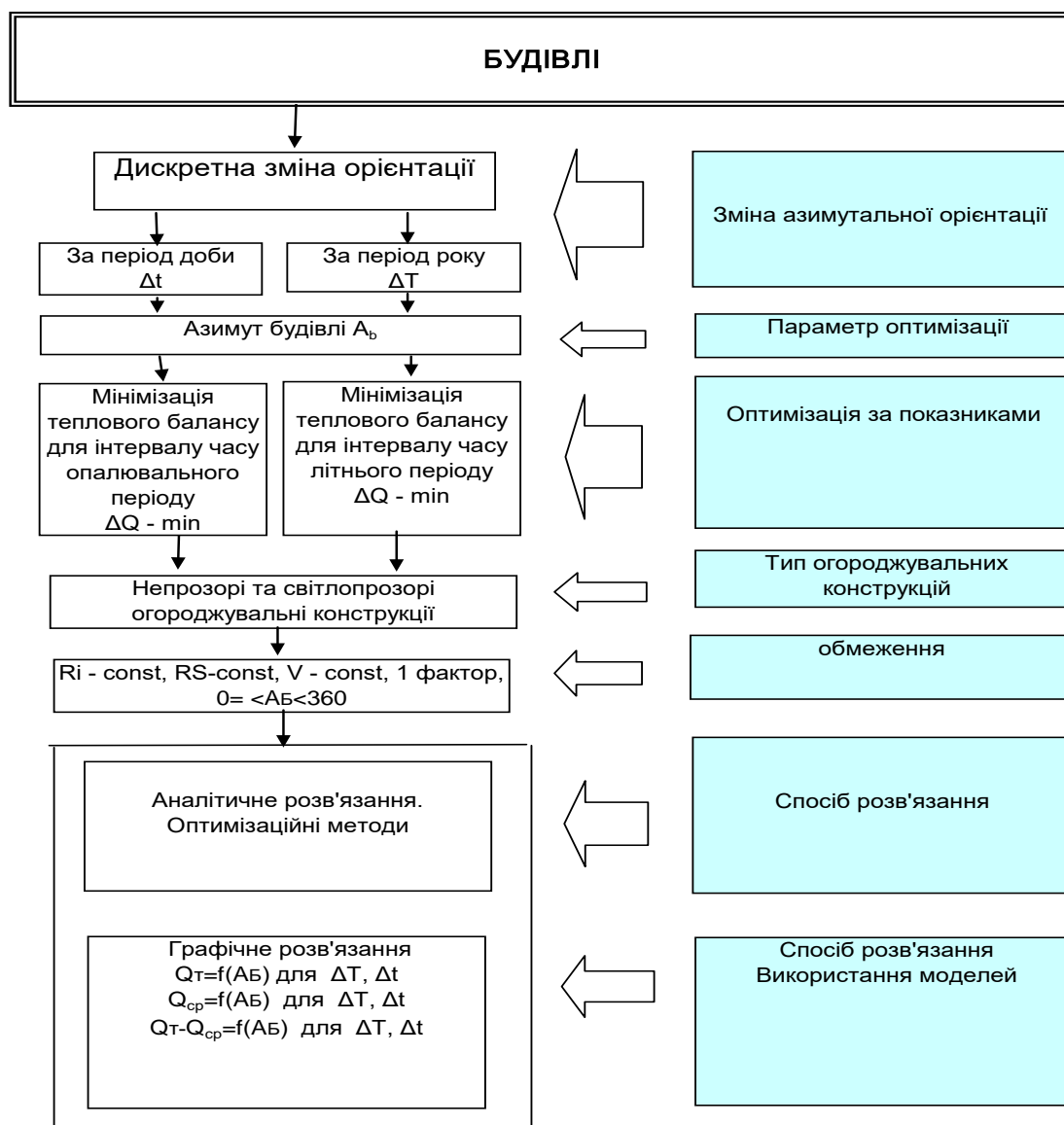


Рис.2 Структура визначення оптимальної орієнтації дискретно-слідкуючих будівель

Оптимальна орієнтація будівлі може визначатися для інтервалу часу протягом доби або року, при цьому змінним параметром є азимутальна орієнтація будівлі (A_B). Мінімізуються тепловтрати через огорожувальні

конструкції теплоізоляційної оболонки будівлі протягом опалювального періоду, а також теплонадходження – для літнього періоду. При цьому враховуються особливості теплопередачі непрозорих і світлопрозорих конструкцій, де незмінними є параметри їх опору теплопередачі, об’єм і геометрична форма будівлі. А для визначення оптимальної орієнтації енергоефективної будівлі пропонується аналітичний і графічний способи розв’язання.

*Аналітичний спосіб визначення оптимальної орієнтації будівлі
для інтервалу часу Δt_i протягом доби*

Оскільки будівля змінює свою орієнтацію декілька разів протягом часу доби, то для кожного інтервалу часу Δt_i визначається її оптимальна орієнтація, де тепловий баланс будівлі є сумою балансів окремих граней.

Математичну модель теплового балансу грані будівлі з прозорими та непрозорими огорожувальними конструкціями для інтервалу часу доби можливо зобразити у вигляді нелінійної функції зі змінним параметром A_b азимутальної орієнтації будівлі:

Цільова функція

$$\Delta Q_{\text{Гр}_i} = \frac{S_{\text{ст}_i}}{R_{\text{ст}_i}} \left[t_{\text{в}_i} - \left(t_{\text{з}_i} + \frac{r_i I_{\text{сеп}_i}}{\alpha_{\text{зст}_i}} \right) \right] \Delta t + \frac{S_{\text{в}_i} (t_{\text{в}_i} - t_{\text{з}_i}) \Delta t}{R_{\text{в}_i}} - I_{\text{сеп}_i} K_i \zeta_i \varepsilon_{\text{о}_i} S_{\text{в}_i} \Delta t .$$

(1)

$$\Delta Q_{\text{Б}} = \sum \Delta Q_{\text{Гр}_i}, \quad \Delta Q_{\text{А}} \rightarrow \min$$

(2)

$$\Delta Q_{\text{А}} \rightarrow \min .$$

(3)

Система обмежень

$$S_{\text{в}_i} = \text{const}, \quad S_{\text{ст}_i} = \text{const};$$

(4)

$$R_{\text{ст}_i} = \text{const}, \quad R_{\text{в}_i} = \text{const} .$$

(5)

де $t_{\text{ум}_i}, t_{\text{з}_i}$ – умовна і фактична температури зовнішнього повітря; r_i – альbedo поверхні грані; $I_{\text{сеп}_i}$ – середня енергетична освітленість короткохвильовою

СР; $I_{\text{сер}_i} = f(A_{\text{ст}_i})$ – аналітична залежність середнього рівня енергетичного освітлення СР грані для інтервалу часу Δt (визначається згідно з методикою, викладеною у підрозділі 2.1); $A_{\text{Б}}$ – азимут будівлі; $\alpha_{\text{зст}_i}$ – коефіцієнт теплообміну між зовнішньою поверхнею огороження і зовнішнім повітрям; $S_{\text{ст}_i}$ – площа непрозорої конструкції грані огорожувальних конструкцій; $R_{\text{ст}_i}$ – опір теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій; $R_{\text{в}_i}$ – опір теплопередачі світлопрозорих огорожувальних конструкцій; ζ_i – коефіцієнт, що враховує затінення віконного прорізу непрозорими елементами; ε_{oi} – коефіцієнт відносного проникнення СР для світлопрозорих конструкцій; K_i – коефіцієнт дійсних умов хмарності, що впливають на надходження СР.

Оптимізація нелінійною функції відбувається за способом Хука-Дживса. У випадку коли функція енергетичної освітленості СР є лінійною доцільно використовувати сімлекс-метод.

*Графічний спосіб визначення оптимальної орієнтації будівлі
для інтервалу часу протягом доби та року*

З використанням графічних моделей залежності теплового балансу будівлі $\Delta Q_{\text{Б}} = f(A_{\text{Б}})$ для інтервалу часу року ΔT та $\Delta Q_{\text{Б}} = f(A_{\text{Б}})$ для інтервалу часу доби Δt (рис. 4, 5), які реалізовано у вигляді ППП *Optorient*, визначається оптимальна орієнтація.

Алгоритм розрахунку оптимальної азимутальної орієнтації будівлі

Алгоритм визначення азимутальної орієнтації будівлі з урахуванням нормативних вимог до освітлення та інсоляції наведено на рис. 3.

Спочатку розробляється ескізний проект будівлі та визначаються інтервали часу року ΔT для оптимізації орієнтації, а також час її зміни. Для інтервалу часу року ΔT аналітичним або графічним способом визначається оптимальна орієнтація будівлі, а далі перевіряється її відповідність вимогам з освітлення приміщень і дотримання нормативного часу інсоляції. У випадку, якщо дані відповідають зазначеним вимогам, то проект допрацюється і затверджується режим зміни орієнтації протягом року. Але якщо не досягнуто такої відповідності, то орієнтація будівлі обов'язково має бути відкоригована.

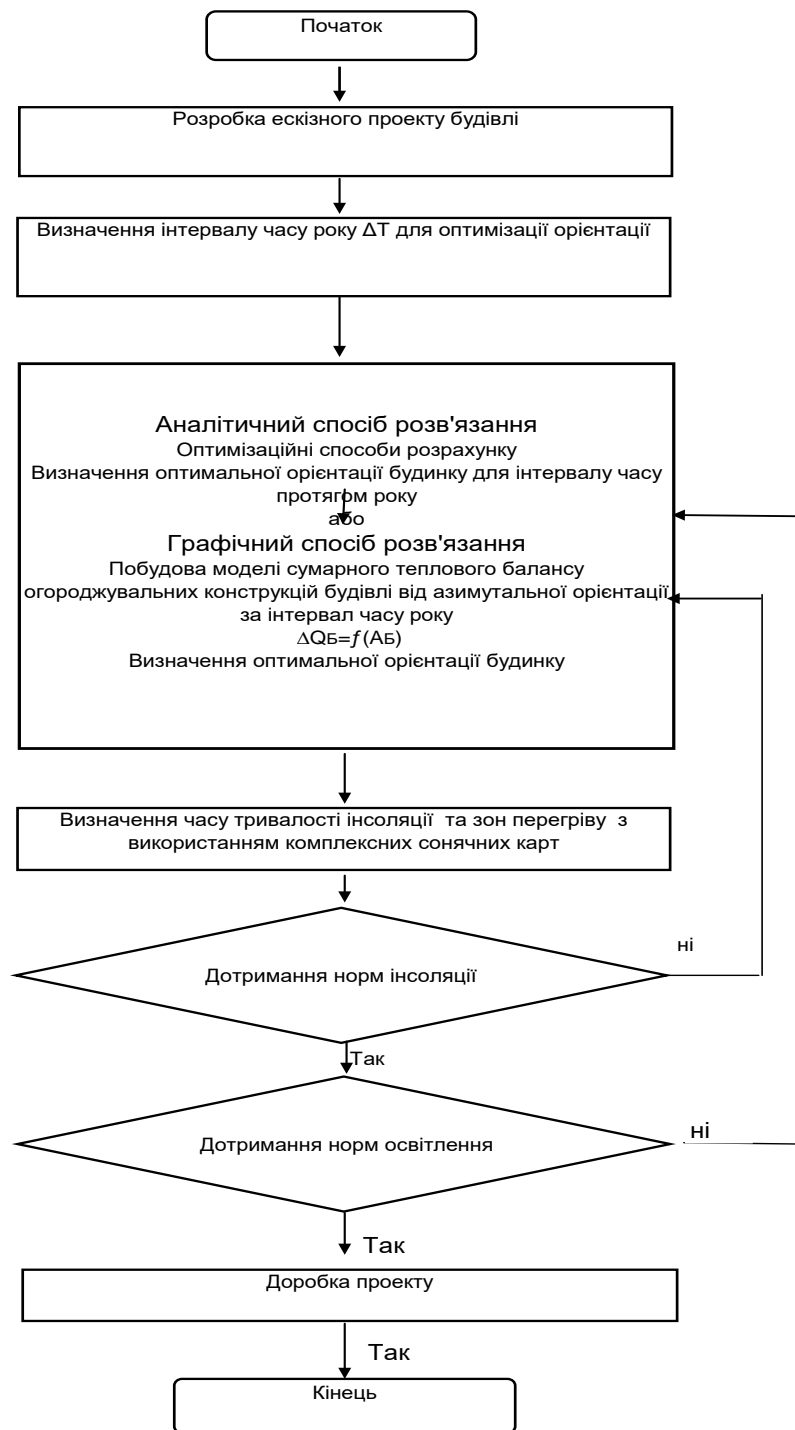


Рис. 3 Алгоритм визначення оптимальної орієнтації будівель

Висновок

Розв'язання задачі щодо підвищення енергоефективності будівель можливе за рахунок оптимізації азимутальної орієнтації окремо розташованих і блокованих будівель з точки зору мінімізації тепловтрат через теплоізоляційну оболонку будівлі з урахуванням надходження тепла

від СР та впливу вітру. Тому з метою визначення оптимальної орієнтації було:

Уперше створено графічний та аналітичний способи моделювання теплового балансу як окремих граней, так і будівлі в цілому протягом опалювального періоду за різних вихідних умов, які реалізовано у вигляді ППП *Optorient*, призначеного для оптимізації азимутальної орієнтації гранних енергоефективних будівель визначеної геометрії, що дискретно змінюють орієнтацію протягом доби або року. При розрахунку орієнтації енергоефективної будівлі враховуються нормативні вимоги щодо їх освітлення та інсоляції.

Література

1. *Фейст Вольфганг*. Основні положення щодо проектування пасивних будинків / Фейст Вольфганг; [перекл. з німецької з додатками]; вид. А. Є. Єлохова. Москва : Видавництво асоціації будівельних вузів, 2008. 144 с.
2. *Л. Вальядарес-Рендон, Герд-Шмід, Шан-Ліен Ло*. Огляд енергозбереження за допомогою методів сонячного контролю та оптимальної орієнтації будівлі для стратегічного розміщення систем затінення фасаду. *Енергетика та будівлі*, том 140, 1 квітня 2017 р., сторінки 458-479.
3. *Табуницьков Ю. А., Бродач М. М.* Математичне моделювання та оптимізація теплоефективності будівель. Москва : АВОК-ПРЕС, 2002. 194 с.
4. *Marsh A.* Computer-optimised Shading Designn [Електронний ресурс] / Andrew Marsh : Welsh School of Architecture, Cardiff University, Wales, UK. URL: www.companysshed.com/1023649200/documents/2003_IBPSA.
5. *Сергійчук О. В.* Типологічні та конструктивні рішення пасивних житлових будівель / 65-та наук.-практ. конф. КНУБА : тези доповідей. Київ : КНУСА, 2004. Ч. 1. С. 152.
6. *Мартинов В.Л.* Оптимізація орієнтації енергоефективних будівель з дотриманням норм освітленості та інсоляції / *Енергоефективність у будівництві та архітектурі*: наук.-техн. сб. / Київ. нац. ун-ті буд-ва та архіт. Київ : КНУБА, 2013. Вип. 5. С. 84–89.
7. *Фаренюк Г.Г., Фаренюк Є.Г.* Про закономірності теплопередачі через світлопрозорі конструкції / *Віконні технології*. Науково-технічний журнал. Київ : ТОВ «Екодар», 2001. № 7. С. 38–40.
8. *Шнерх О.А.* Підвищення ефективності геліосистем теплопостачання шляхом дискретної орієнтації сонячних колекторів : дис. ... канд. техн. наук: 11.00.11 / Шнерх О.А. Київ, 1994. 166 с. Бібліографія. : С. 141-153.
9. *Fallahtafti, R. and Mahdavinejad, M.* (2015), "Оптимізація форми та орієнтації будівлі для кращої енергоефективної архітектури" / *International Journal of Energy Sector Management*. Vol. 9 № 4. С. 593-618. <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2014-0001>

10. <https://www.nachi.org/building-orientation-optimum-energy.htm>
11. *Крістоф Міттерер, Хартвіг М.Кюнцель, Себастьян Херкель, Андреас Холм.* Оптимізація енергоефективності та комфорту мешканців завдяки кліматичному дизайну будівлі. Кордони архітектурних досліджень, (2012) 1, 229-235.
12. *Л. Вальядарес-Рендон, Герд-Шмід, Шан-Ліен Ло.* Огляд енергозбереження за допомогою методів сонячного контролю та оптимальної орієнтації будівлі для стратегічного розміщення систем затінення фасаду. *Енергетика та будівлі.* Том 140. 1 квітня 2017 р. С. 458-479.
13. *Шановал С., Желих В., Венгрин І., Козак К.* Моделювання теплових процесів у сонячному колекторі, суміщеному із зовнішнім огороженням енергоефективного будинку. Конспект лекцій з цивільної інженерії, 2020. № 47, 510-517.

References

1. *Feyst Vol'fgang.* Osnovni polozhennya shchodo proektuvannya pasivnikh budinkiv / Feyst Vol'fgang; [perekl. z nimets'koï z dodatkami]; vid. A. Є. Єлокхова. Moskva : Vidavnistvo asotsiatsii budivel'nikh vuziv, 2008. 144 s. {in Russian}
2. *L. Val'yadares-Rendon, Gerd-Shmid, Shan-Lien Lo.* Oglyad energozberezhennya za dopomogoyu metodiv sonyachnogo kontrolyu ta optimal'noï orientatsii budivli dlya strategichnogo rozmishchennya sistem zatinennya fasadu. Energetika ta budivli, tom 140, 1 kvitnya 2017 r., storinki 458-479. {in Ukrainian}
3. *Tabunshchikov Yu. A., Brodach M. M.* Matematichne modelyuvannya ta optimizatsiya teploefektivnosti budivel'. Moskva : AVOK-PRES, 2002. 194 s.
4. *Marsh A.* Computer-optimised Shading Designn [Electronic resource] / Andrew Marsh : Welsh School of Architecture, Cardiff University, Wales, UK. URL: www.companyshe.com/1023649200/documents/2003_IBPSA. { in English}
5. *Sergijchuk O. V.* Typologichni ta konstruktyvni rishennja pasyvnyh zhytlovyh budivel' / 65-ta nauk.-prakt. konf. KNUBA : tezy dopovidej. Kyi'v : KNUSA, 2004. Ch. 1. S. 152. {in Ukrainian}
6. *Martynov V.L.* Optymizacija orijentacii' energoefektyvnyh budivel' z dotrymannjam norm osvitenosti ta insoljacji' / Energoefektyvnist' u budivnyctvi ta arhitekturi: nauk.-tehn. sb. / Kyi'v. nac. un-ti bud-va ta arhit. Kyi'v : KNUBA, 2013. Vyp. 5. S. 84–89. {in Ukrainian}
7. *Farenjuk G.G., Farenjuk Je.G.* Pro zakonimirnosti teploperedachi cherez svitloprozori konstrukcii' / Vikonni tehnologii'. Naukovo-tehnichnyj zhurnal. Kyi'v : TOV «Ekodar», 2001. № 7. S. 38–40. {in Ukrainian}
8. *Shnerh O.A.* Pidvyshhennja efektyvnosti geliosystem teplopostachannja shljahom dyskretnoi' orijentacii' sonjachnyh kolektoriv : dys. ... kand. tehn.

nauk: 11.00.11 / Shnerh O.A. Kyi'v, 1994. 166 s. Bibliografija. : S. 141-153. {in Ukrainian}

9. *Fallahtafi, R. and Mahdavinejad, M. (2015), "Optyimizacija formy ta orijentacii' budivli dlja krashhoi' energoefektyvnoi' arhitektury" / International Journal of Energy Sector Management. Vol. 9 № 4. C. 593-618. <https://doi.org/10.1108/IJESM-09-2014-0001>. {in Ukrainian}*

10. <https://www.nachi.org/building-orientation-optimum-energy.htm>

11. *Kristof Mitterer, Hartvig M.Kjuncel', Sebast'jan Herkel', Andreas Holm. Optyimizacija energoefektyvnosti ta komfortu meshkanciv zavdjaky klimatychnomu dyzajnu budivli. Kordony arhitekturnyh doslidzhen', (2012) 1, 229-235. {in Ukrainian}*

12. *L. Val'jadares-Rendon, Gerd-Shmid, Shan-Lien Lo. Ogljad energozberezhennja za dopomoguju metodiv sonjachnogo kontrolju ta optymal'noi' orijentacii' budivli dlja strategichnogo rozmishhennja system zatinennja fasadu. Energetyka ta budivli. Tom 140. 1 kvitnja 2017 r. S. 458-479. {in Ukrainian}*

13. *Shapoval S., Zhelyh V., Vengryn I., Kozak K. Modeljuvannja teplovyh procesiv u sonjachnomu kolektori, sumishhenomu iz zovnishnim ogorodzhennjam energoefektyvnogo budynku. Konspekt lekcij z cyvil'noi' inzhenerii', 2020. № 47. S. 510-517. {in Ukrainian}*

UDC 514.18

PhD, prof. **Vyacheslav Martynov**,

arx.martynov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0822-1970

Ph.D., Associate Professor **Tatiana Chyrva**,

tetyana.chyrva@gmail.com, ORCID: 0000-0002-6657-5443

Kyiv National University of Construction and Architecture

OPTIMIZATION OF THE ORIENTATION OF ROTATING ENERGY-EFFICIENT BUILDINGS

The solution to the problem of increasing the energy efficiency of buildings is possible due to the optimization of the azimuthal orientation of detached and blocked buildings from the point of view of minimizing heat loss through the thermal insulation shell of the building, taking into account the heat input from solar radiation and the influence of wind. Therefore, for the purpose of determining the optimal orientation, graphical and analytical methods for modeling the heat balance of both individual faces and the building as a whole during the heating period under various initial conditions were created for the first time, which were implemented in the form of the Optorient program, designed to optimize the azimuthal orientation of faceted energy-efficient buildings of a certain geometry, which discretely change orientation during the day or year. When calculating the orientation of an energy-efficient building,

regulatory requirements regarding their lighting and insolation are taken into account. The developed structure of orientation optimization of buildings that change orientation discretely, with a geometric shape in the form of a polyhedron or a cylinder, approximated by planes. The optimal orientation of the building can be determined for a time interval during a day or a year, while the variable parameter is the azimuth orientation of the building. Heat losses through the enclosing constructions of the building's heat-insulating shell are minimized during the heating period, as well as heat gain - for the summer period. At the same time, the peculiarities of heat transfer of opaque and translucent structures are taken into account, where the parameters of their heat transfer resistance, volume and geometric shape of the building are unchanged. And to determine the optimal orientation of an energy-efficient building, analytical and graphical solutions are proposed. An algorithm for determining the azimuthal orientation of the building was developed, taking into account the regulatory requirements for lighting and insolation.

Keywords: energy-efficient buildings, optimal parameters, optimization of building orientation, graphic models, geometric modeling, architectural design.