

## АНОТАЦІЯ

*Бордун М. В.* Конструкції енергоефективних споруд закритого ґрунту. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 192 «Будівництво та цивільна інженерія» (19 – Архітектура та будівництво). – Державний вищий навчальний заклад «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури» Міністерства освіти і науки України, Дніпро, 2020.

Дисертаційна робота присвячена розробці та обґрунтуванню конструктивно-технологічних рішень енергоефективних споруд закритого ґрунту для індивідуальних фермерських господарств.

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету і завдання дослідження, представлено новизну і практичне значення отриманих результатів. Наведено відомості про апробацію основних результатів дисертації, кількість публікацій, структуру та обсяг роботи.

**В першому розділі** «Об’ємно-планувальні та конструктивні рішення агроспоруд закритого ґрунту та їх обґрунтування» розглянуто та проаналізовано вітчизняні та закордонні наукові дослідження стосовно сучасних конструкцій споруд закритого ґрунту, наведено їх переваги та недоліки. Запропоновано класифікацію споруд закритого ґрунту за характерними ознаками, визначено основні способи підвищення енергоефективності, а саме: застосування нових енергоефективних матеріалів для світлопрозорих покриттів та конструкцій теплиці; розробка ефективних конструктивних рішень, геопросторового розташування, орієнтації за сторонами світу для збільшення сонячних теплонадходжень та зменшення теплових втрат через огорожуючі конструкції; системи добового і сезонного зберігання, перерозподілу та використання сонячної енергії в системах опалення споруд закритого ґрунту в холодний період.

Розглянуто типи світлопрозорих покриттів споруд закритого ґрунту, які є основним конструктивним елементом, запропоновано їх класифікацію. Виконано аналіз технічних характеристик світлопрозорих матеріалів для покриття споруд закритого ґрунту (плівка, скло і полікарбонат), визначено найбільш ефективний – сотовий полікарбонат.

Розглянуто методи дослідження процесів теплообміну в спорудах закритого ґрунту, а також розрахункові програмні комплекси для вирішення задач теплопередачі.

Виконаний аналіз відомих теоретичних і експериментальних досліджень, а також наявного практичного вітчизняного та закордонного досвіду дозволив підтвердити той факт, що розробка агроконструкцій закритого ґрунту з високими енергоефективними характеристиками є актуальною задачею, що має вагоме наукове та соціальне значення.

**У другому розділі** «Рациональне проектування світлопрозорого покриття споруд закритого ґрунту» виконано аналіз і узагальнення основних технічних характеристик сотового полікарбонату, а саме: опір теплопередачі, питома вага, світлопропускання, вартість та ін.; обґрунтовано його використання в якості світлопрозорого покриття для споруд закритого ґрунту, як такого, що має значні переваги серед представлених сьогодні на ринку матеріалів.

Розглянуто методи оцінки вартості життєвого циклу світлопрозорого покриття споруд закритого ґрунту: метод розрахунку чистої поточної (дисконтованої) вартості (NPV - net present value); метод розрахунку сукупної вартості (сукупних витрат, загальних витрат) (aggregate value - AV); метод розрахунку загальної річної вартості (aggregate annual value - AAV).

Теплиця, як і будь-який об'єкт будівництва, проходить наступні стадії життєвого циклу: створення, експлуатація і ліквідація. Тому, при оцінюванні вартості огорожуючих світлопрозорих конструкцій теплиці, необхідно враховувати витрати, пов'язані із життєвим циклом споруди. Для оцінювання вартості життєвого циклу споруди обрано метод розрахунку сукупної

вартості (сукупних витрат, загальних витрат) (aggregate value - AV), який полягає в перетворенні всіх витрат на будівництво, витрат на експлуатацію споруди за весь передбачуваний термін його служби та на ліквідацію споруди в розрахункову суму на рік очікуваного знесення споруди (так звані накопичені витрати).

У розділі встановлено залежність сукупної вартості життєвого циклу 1 кв. м теплиці від товщини полікарбонату з урахуванням дисконтування із різними відсотковими ставками на капітал.

На основі розрахунку сукупної вартості життєвого циклу при різних відсоткових ставках на капітал (aggregate value – AV), вартості енергії, капітальних затрат визначено раціональну товщину світлопрозорого покриття - полікарбонату - для споруд закритого ґрунту за критерієм енергоефективності і мінімальної вартості.

У **третьому розділі** «Розробка конструктивних рішень енергоефективних споруд закритого ґрунту» проведено дослідження радіаційного і теплового режиму світлопрозорого покриття, обґрунтовані параметри конструктивних рішень споруд закритого ґрунту з урахуванням основних факторів, які впливають на енергоефективність споруди, а саме: конструктивна форма, орієнтація і кут нахилу світлопрозорого покриття відносно сонячних променів, геопросторове розташування теплиці відносно поверхні землі.

Обрано найбільш раціональну конструктивну форму теплиці для умов м. Дніпра на основі порівняння обсягів сонячних теплонадходжень і теплових втрат через світлопрозорі конструкції теплиці протягом холодного періоду року (жовтень – квітень). Встановлено, що для форми типу «Веgetарій» різниця між тепловими втратами і сонячними тепло надходженнями є найменшою серед всіх розглянутих форм теплиць. Досліджено вплив орієнтації споруди відносно сторін світу на обсяг сонячних теплонадхожень протягом року. Встановлено, що найбільш вигідна орієнтація споруди за критерієм сонячних теплонадходжень є орієнтація в

південному напрямі. Також визначено, що із зміною орієнтації на південно-східний або південно-західний напрям теплонадходження до внутрішнього простору теплиці зменшуються лише на 1%.

Визначено найбільш раціональний кут нахилу світлопрозорого покриття в діапазоні від 20° до 90° в залежності від обсягу сонячних теплонадходжень. Найбільш раціональним кутом нахилу є діапазон від 35° до 45°.

Обґрунтовано раціональне геопросторове розташування теплиці відносно поверхні землі за критерієм сонячних теплових надходжень і теплових втрат через огорожувальні конструкції. Раціональним є наземне розташування теплиці. Із заглибленням теплиці в ґрунт теплові втрати через огорожуючі конструкції зменшуються, проте сонячне тепло надходження також зменшуються.

Запропоновані для подальшої реалізації енергоефективні конструктивні рішення споруд закритого ґрунту, можуть бути використані у практиці проектування і будівництва споруд закритого ґрунту для індивідуальних фермерських господарств. Розроблені конструктивні рішення впроваджено при розробці проектних пропозицій по реконструкції Центру-притулку Бетані в м. Малацки в рамках виконання міжнародного наукового проекту InStep Project International Sustainable Engineering Practices (Ref.21810098).

**В четвертому розділі** «Дослідження ефективності використання акумуляторів тепла в системі опалення споруд закритого ґрунту» проведено експериментальні дослідження температурно-вологісного режиму теплиці у весняний період (березень – квітень), розташованої в м. Дніпро, із розмірами в плані 7,9 x 7,3 і висотою 3,1 м, матеріал світлопрозорого огородження - сотовий полікарбонат товщиною 8 мм. Безперервні вимірювання температури і вологості повітря здійснювались в середині і зовні теплиці в період з 23.03.2019 р. – 06.04.2019 р. Вимірювання проводилися протягом встановленого періоду цілодобово з інтервалом вимірювань – 1 година. Встановлено, що діапазон коливань температур в теплиці протягом

експериментального періоду складає від  $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$  до  $52\text{ }^{\circ}\text{C}$ , що не відповідає встановленим нормам температури внутрішнього повітря для нормального росту і розвитку рослин.

Для зменшення коливань температур досліджено ефективність використання добового акумулятора тепла. Запропоновано теплотехнічну модель для розрахунку параметрів теплоакумулятора, яка враховує теплонадходження від сонячної радіації, теплові втрати через огорожуючі конструкції і тепло, яке накопичується в акумуляторі. На основі запропонованої математичної моделі теплотехнічних процесів в теплиці, як приклад, визначено раціональні параметри добового водяного теплоакумулятора для експериментальної теплиці. Запропонована математична модель теплиці дозволяє обрати оптимальний об'єм і розміри добового теплоакумулятора для будь-якої теплиці.

Досліджено ефективність використання сезонного теплоакумулятора із різними теплоакумуляуючими матеріалами для раціональної конструкції теплиці типу «Вегетарій» із розмірами в плані  $5,0 \times 8,0$  і висотою  $3,9$  м. Визначено найбільш ефективний матеріал для акумуляування теплової енергії - глауберова сіль.

Запропоновано технічне рішення сезонного багат шарового теплоакумулятора (пат. України 137026, А01G 9/14) для ефективного зберігання і використання теплової енергії в системі опалення теплиці. Використання в конструкції багат шарового теплоакумулятора мережі воздуховодів, обладнаних керованою системою датчиків і заслонок, теплоізоляційних шарів дозволяє зберігати тепло протягом тривалого часу, що в свою чергу знижує потребу в енергії при експлуатації споруди закритого ґрунту.

**Ключові слова:** споруда закритого ґрунту, теплиця, енергоефективність, сонячні теплонадходження, теплові втрати, світлопрозорі конструкції, акумуляція тепла, життєвий цикл.

## ABSTRACT

*Bordun M.V.* Energy-efficient structures of greenhouses. – Qualifying scientific work as a manuscript.

The dissertation for obtaining a degree of Doctor of Philosophy in specialty 192 «Construction and Civil Engineering» (19 – Architecture and Construction) – State Higher Education Institution “Prydniprovskya State Academy of Civil Engineering and Architecture”, Dnipro, 2020.

The research deals with the development and substantiation of structural and technological solutions for energy-efficient structures of greenhouses in private farming.

**In the introduction** the relevance of the research is grounded, the aim and the tasks are defined; originality and practical value of the findings are given. Information on the evaluation of results, the number of papers published, the structure and the length of the research are also provided.

The first section “Spatial and structural solutions for greenhouses” deals with the analysis of national and foreign scientific studies on modern greenhouse structures, considering their benefits and drawbacks.

The classification of greenhouses according to specific features was proposed. The main methods to improve energy-efficiency were defined. It was proposed to use new energy-efficient materials for light transparent coverings of greenhouses, to develop functional structural solutions, geospatial location, orientation to cardinal directions for better solar heat and lower heat losses due to protective structures, as well as systems for 24-h and seasonal storage, redistribution and application of solar energy in heating greenhouses in cold period.

The types of light transparent covering for greenhouses as a key structural element were considered. The classification of these materials was presented.

The analysis of technical characteristics of light transparent coverings for greenhouses (plastic sheet, glass, polycarbonate) was carried out. As a result,

cellular polycarbonate was defined as the most effective.

The research methods for heat transfer in greenhouses, as well as software packages to solve heat transfer problems were studied.

The analysis of well-known theoretical and experimental studies, along with national and foreign experience made possible to prove that the design and development of greenhouses with high energy-efficient characteristics is quite relevant and is of significant scientific and social value.

**The second section** “Rational design of light transparent covering of greenhouses” deals with the analysis and synthesis of the main technical characteristics of cellular polycarbonate, such as heat transfer resistance, specific weight, light transmission, price, etc. The application of this material for greenhouses as the beneficial one was substantiated.

The assessment methods for the lifecycle cost of light transparent coverings of greenhouses: NPV (net present value) method, AV (aggregate value) method, AAV (aggregate annual value) method were considered.

A greenhouse, as any other construction facility, has the following lifecycle stages: construction, maintenance and disposal. Therefore, assessing the cost of protective light transparent coverings, it is necessary to take into account the expenditures on the lifecycle of the structure. The total cost calculation method (aggregate value - AV) was chosen to assess the value of the life cycle of the structure. This method implies that all construction costs, operating costs during the entire service life and costs on the disposal of the structures will be equal to the total cost of the building estimated on year of the expected demolition (so-called accumulated costs).

The dependence of the total cost of 1 sq. m of greenhouse life cycle on the thickness of polycarbonate, taking into account discounting with different interest rates, is shown in the section.

Based on the aggregate value, energy cost, capital expenditures, it was possible to identify rational thickness of the light transparent covering – polycarbonate – for energy-efficient greenhouses at low cost.

**In the third section** “Structural solutions for energy-efficient greenhouses” the investigation of radiation and thermal behavior of light transparent covering was conducted. The parameters of structural solutions for greenhouses were grounded. They are based on the main factors which influence the energy-efficiency of the structure: its design shape, orientation and inclination angle of the light transparent covering towards sun rays, geospatial location towards ground surface.

The most rational design shape of the greenhouse for the climatic conditions of Dnipro was chosen based on the compared amount of solar heat and heat losses through the light transparent coverings over the cold period (October – April).

It was found out that for the “Vegetarium” design, the difference between heat losses and solar heat is the lowest among all designs considered.

It was studied how the orientation of the structure to the cardinal directions influences the amount of solar heat during a year. It was found that the south is the best direction. If orientation changes to the south-eastern or south-western direction the heat gains to the inside space of greenhouse will reduce by one per cent.

The most efficient inclination angle of the light transparent covering is at the range from 20° to 90°, depending on solar heat. The most efficient inclination angle is from 35° to 45°.

The rational geospatial location of a greenhouse towards ground surface according to solar heat and losses through protective covering was explained. It was concluded that the greenhouse should be located on the ground. When the greenhouse is made deeper into the ground, heat losses through the enclosing structures will decrease, but solar heat gains also will decrease.

The suggested energy-efficient structural solutions could be used in the further design and construction of greenhouses for individual farms. The developed solutions were implemented into design proposal for the Betany shelter reconstruction in Malatsky under the InStep Project, International Sustainable Engineering Practices (Ref.21810098).

**The fourth section** “Investigation of heat accumulators efficiency in heating greenhouses” provides the experimental results of the temperature and humidity conditions in the greenhouse in spring (March-April), located in Dnipro. The dimensions in the plan are as follows: 7.9 x 7.3, height - 3.1 m, the material of the light transparent covering - cellular polycarbonate, 8-mm thickness. Continuous measurements of temperature and humidity were carried out inside and outside of the greenhouse in the period from 23.03.2019 to 06. 04.2019. The measurements were taken during the established period around the clock with a measurement interval of 1 hour.

It was identified that the temperature fluctuation range in the greenhouse over the experimental period was from -1 °C to 52 °C, which does not conform to the indoor temperature rate to provide regular growth of plants.

To reduce temperature fluctuations, the efficiency of 24-h heat accumulator was studied. A heating model to calculate the heat accumulator parameters was proposed. It takes into account solar heat, solar losses through protective covering, as well as heat in the accumulator. Based on the proposed mathematical model of heating processes in the greenhouse, rational parameters of a 24-h water heat accumulator for the experimental greenhouse were defined as an example. The proposed mathematical model of the greenhouse allows choosing the optimal volume and size of the daily heat accumulator for any greenhouse.

The efficiency of seasonal heat accumulator with different heat-retaining materials for the rational design of “Vegetarium” greenhouse (5,0 x 8,0 and 3,9 m height) was studied. Sodium sulphate decahydrate was found as the most efficient material to retain heat energy.

A seasonal multilayer heat accumulator as a technical solution (patent of Ukraine 137026, A01G 9/14) was proposed for effective storage and application of heat energy in the greenhouse heating system. The network of ducts equipped with a controlled system of sensors and dampers, and also thermal insulation layers between accumulator material layers in a multilayer heat accumulator allows storing heat for a long time, which in its turn reduces energy needs during

operation of the greenhouse. It can store the heat for a long time, which makes the greenhouse energy efficient.

**Key words:** greenhouse, energy-efficiency, solar heat, solar losses, transparent protective covering, heat accumulation, lifecycle.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

### Наукові праці, у яких опубліковані основні результати дисертації

1. Бабенко М. М., Бордун М. В., Несін О. А. та ін. Рациональне проектування теплиці за критерієм вартості життєвого циклу. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : Сб. науч. трудов. Дніпро, 2017. Вып. 99. С. 15 – 21.

2. Савицький М. В., Бабенко М. М., Несін О. А., Бордун М. В. Оптимізація геопросторового розташування теплиці за критерієм енергоефективності. *Строительство, материаловедение, машиностроение* : Сб. науч. трудов. Дніпро, 2017. Вып. 100. С. 124 – 130.

3. Savytskiy M., Bordun M., Spurydonenkov V. The Sustainable Design of the Greenhouse by Criteria of Heat Losses and Solar Heat Gains. *Proceedings of EcoComfort 2020. Lecture Notes in Civil Engineering*. Lviv, 2020. Vol. 100. P. 393 – 401. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-57340-9_48). (Scopus).

4. Bordun M., Savytskiy M., Babenko M., Rabensiefer R. Energy Efficiency of Greenhouses in Accordance with its Geospatial Location. *Hungarian Building Engineering Journal*. Budapest, 2019. № 1-2. P. 33 – 36. URL: <http://epgeplap.hu/lapszamok/cikk/2019/1/1116>.

### Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Бордун М. В., Савицький М. В., Данішевський В. В. Використання теплоаккумуляторів в системах теплопостачання споруд закритого ґрунту. *Інноваційні технології життєвого циклу об'єктів житлово-цивільного, промислового і транспортного призначення* : Тези XVII міжнар. наук.-практ. конф., м. Одеса, 9 – 13 верес. 2019 р. Дніпро, 2019. С. 8.

6. Бордун М. В., Савицький М. В., Данішевський В. В. Акумуляція сонячної енергії для опалення теплиць. *Проблеми механіки залізничного транспорту: Безпека руху, динаміка, міцність рухомого складу та енергозбереження* : Тези допов. XV міжнар. конф., м. Дніпро, 22 – 23 жовт. 2020 р., Дніпро, 2020. С. 17 – 21.

7. Адегов О. В., Бордун М. В., Сопільняк А. М., Шляхов К. В. Індивідуальний житловий будинок з інтегрованою енергоефективною спорудою (вегетарієм). *Моделювання та оптимізація будівельних композитів* : матеріали міжнар. семін., м. Одеса, 21 – 22 листоп., 2019. Одеса, 2019. С. 7 – 9.

### **Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації**

8. Бабенко М. М., Бордун М. В., Савицький М. В. та ін. Зелені будівлі для сталого розвитку житлового будівництва : монографія. Дніпро : Удовиченко О. М., 2018. 99 с.

9. Babenko M. M., Savytskyi M. V., Bordun M. V., Shekhorkina S. Y. and other. Inspiring materials for triple zero buildings design : monograph. Dnipro : Udovichenko O. M., 2019. 127 p.

10. Savytskyi M., Babenko M., Bordun M., Yurchenko Ye., Koval O. The efficiency of using solar energy for heating of greenhouses. *Innovative lifecycle technologies of housing, industrial and transportation objects* : monograph / under the gen. ed. M. Savytskyi. Dnipro, 2018. P. 61 – 67.

11. Bordun M. V. Residential buildings with integrated agro-industrial energy-efficient constructions. *Science and technology: perspectives of the XXI century* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. молодих вчених, м. Дніпро, 30 – 31 берез., 2017 р. Дніпро, 2017. С. 23 – 24.

12. Теплиця з багатошаровим теплоаккумулятором: Пат. 137026 Україна: МПК А01G 9/14 (2006.01). № u201902967; заявл. 26.03.2019; опубл. 25.09.2019, Бюл. № 18.