

УДК: 53:51:631.234:005.336.1

DIRECTIONS FOR INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF THREE-LAYER COATING OF GREENHOUSES

K. Shupchynska, O. Oliynyk, I. Tkachenko

Zaporizhzhia National University

N. Antonenko

Zaporizhzhia Polytechnic National University

Key words:

*Arched greenhouse
Energy consumption
Thermal conductivity*

Article history:

Received 13.07.2020
Received in revised form
27.07.2020
Accepted 11.08.2020

Corresponding author:

K. Shupchynska
E-mail:
shup.ka21@gmail.com

ABSTRACT

The object of the research in the field of economic activity was the optimization of existing structures of greenhouses on the example of arched greenhouses. Physical and technical parameters of the construction materials and the environment were used as criteria.

The common tendencies and advantages of modification greenhouses by improving the main structure were analyzed.

In the process of studying, there were obtained the results on technical characteristics of the greenhouse which indicate variations in the reduction of energy consumption in terms of modification of the structure by changing the number of layers of the ceiling of the greenhouse arch type.

The problem of choosing the number of the greenhouse ceiling layers, which can reduce heat loss of the structure and temperature changes in the ceiling layers was solved. An arch-type greenhouse covered with polyethylene film (polycarbonate) was considered. The comparison of a single-layer coating and the air layer coating was obtained. The significance of physical characteristics of materials and conditions were taken into account. This makes it possible to use polycarbonate polyethylene film very profitable in the context of a constant increase in heating services. This provides an opportunity for the development of small businesses.

An important component in the construction of agricultural structures is the economic component of the structure. Comparison of construction costs and savings in the heating period proves the prospects for the reconstruction of the greenhouse.

Summing up the results, it can be concluded that the right choice of material, shape and design of the greenhouse allows to reduce or increase heat loss depending on the needs of the greenhouse. It is necessary to take into account in advance the fluctuations of temperature in the selected region, length of day, lighting of the area and conditions of cultivation of agricultural products.

DOI: 10.24263/2225-2924-2020-26-4-15

НАПРЯМКИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТРИШАРОВОГО ПОКРИТТЯ ТЕПЛИЦЬ

К. С. Шупчинська, О. М. Олійник, І. Г. Ткаченко

Запорізький національний університет

Н. М. Антоненко

Національний університет «Запорізька політехніка»

Оптимізація наявних конструкцій тепличного господарства на прикладі теплиці арочного типу, де критерієм є фізико-технічні показники матеріалів конструкції та середовищ, надзвичайно важлива для господарської діяльності.

У статті проаналізовано тенденції та переваги модифікації тепличного господарства й удосконалення головної конструкції — теплиці. За рахунок продемонстрованих у процесі дослідження технічних характеристик покриття теплиці отримано результати, що свідчать про варіації зменшення енерговитрат в умовах модифікації конструкції шляхом зміни кількості шарів перекриття теплиці арочного типу.

Вирішено завдання вибору кількості шарів перекриття теплиці, яке здатне зменшити теплові втрати конструкції та зміну температури в шарах перекриття. Розглянуто теплицю арочного типу з покриттям «поліетиленова плівка-полікарбонат» та повітряного прошарку між покриттям й порівняно її енерговитрати з теплицею з одношаровим покриттям з поліетиленовою плівки. Враховано значимість фізичних характеристик матеріалів та умов, в яких відбувалися розрахунки. В процесі дослідження встановлено, що енерговитрати за умови збільшення кількості шарів перекриття зменшуються. Також встановлено, що в разі покриття теплиці «поліетиленова плівка — полікарбонат» економія витрат на опалення електроенергією за тарифами 2020 р. складатиме до 200 тис. грн за п'ять сезонів. Це відкриває можливості малому бізнесу розвивати тепличне господарство шляхом оптимізації наявних конструкцій, оскільки правильний вибір матеріалу, форми та конструкції теплиці дає змогу зменшити чи збільшити теплові втрати залежно від потреб тепличного господарства за рахунок параметрів, що використовуються. При цьому необхідно заздалегідь враховувати коливання температур у вибраному регіоні, тривалість дня, освітленість місцевості та умови вирощування сільськогосподарської продукції.

Ключові слова: теплиця арочного типу, енерговитрати, теплопровідність, тепловіддача.

Постановка проблеми. Сільськогосподарська діяльність в Україні завжди посідала одне з провідних місць у формуванні економіки країни. На теренах концепції розвитку сільськогосподарського сектору важливо відзначити, що перспективність малих господарств займає значну частку [1]. Завдяки столітнім традиціям раціонального використання українцями природних ресурсів, землі та води, вирощування сільськогосподарських культур виникає необхідність удосконалення умов вирощування в межах малих господарств.

Факторами довготривалої стійкості розвитку аграрного сектору економіки за економічними й соціальними показниками є, зокрема, господарсько-організаційна та галузева структура. Близько 43% валової продукції сільського господарства виробляється громадянами на земельних ділянках особистого селянського господарства. Як правило, це не експортно-орієнтована продукція, логістика зберігання якої є недостатньою. Виробництво такої продукції вимагає значних трудових затрат: фрукти та ягоди — 80,9%, картопля — 97,8%, овочі — 86,1%, молоко — 74,9% [2].

Незважаючи на концепції розвитку сільськогосподарського сектору, сьогодення диктує свої правила ринку тепличного господарства, змушуючи все більше підлаштовуватися під покупця. Це зумовлено змінами потреб споживача, частіше виникає необхідність свіжої продукції незалежно від пори року. Стрімкий розвиток «здорового та правильного харчування» призвів до збільшення попиту, тому необхідно знаходити правильні рішення відповідно до таких умов.

Вирощування продукції в тепличних господарствах є не тільки енергоємним виробництвом, а й затратним з точки зору фінансування й технічного оснащення. За таких умов виникає потреба в удосконаленні конструкції теплиці та надання рекомендацій щодо вибору керівником господарства шляхів мінімізації затрат на обслуговування та збільшення енергоефективності вже збудованих конструкцій. Пропонується використовувати в сільському господарстві вже раніше відомі методи утеплення конструкцій протягом зимового періоду шляхом накладення додаткового поверхневого шару.

Одним із завдань залишається правильний вибір стратегії розвитку та вдосконалення тепличного господарства.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематикою енергоефективності тепличного господарства займаються вже багато років і головним чином це зумовлено бажанням зменшити затрати на оснащення та будівництво споруд сільського господарства й отримання готової продукції.

У [4] А. М. Пенджиевим запропоновано варіант удосконалення збереження тепла в конструкції, для чого розглядалися теплиці траншейного типу з урахуванням внутрішнього мікроклімату. І. В. Юдаєв у [5] довів переваги використання полікарбонату для перекриття конструкції, що пов'язано з фізичними характеристиками матеріалу. У [6] проводилися дослідження можливостей геліотехнічного обладнання теплиць для акумулювання тепла й обігріву теплиць сонячною енергією, а в [9] наводяться приклади ефективного використання теплиць такого типу.

Розрізняють велику кількість видів теплиць, серед них найпопулярнішими є теплиці арочні, двоскатні та краплевидні. Перевагами теплиць арочного типу є передусім міцність конструкції, кількість світла, що проходить через поверхню та менша кількість швів, що є економічно вигідним для господаря [13; 14]. Зокрема, важливо враховувати технологію побудови теплиць арочного типу та виконання будівельних робіт. Детальні дослідження будівництва фермерських теплиць мобільним обладнанням проводяться С. В. Мишко у [15], де розглядається технологія, доступна для вітчизняного виробника. А. А. Блажнов у [10] досліджує типи теплиць і сумісність конструкції з кліматичними умовами та

доводить, що теплиця арочного типу є найбільш прийнятною в регіонах з частими опадами взимку.

Невід’ємною складовою конструкції виступає не тільки форма теплиці, а й матеріали, з яких її будують. У [11] досліджено теплофізичні властивості матеріалів і показано загальні можливості полікарбонату. У [12] проведено порівняльний аналіз будівельного матеріалу на прикладі скла та стільникового полікарбонату. В результаті було виявлено, що полікарбонат має ряд переваг порівняно зі склом, починаючи зі світлопроникності, крихкості та закінчуючи покращеними властивостями теплоізоляційними характеристик. Отже, сукупність усіх наявних переваг свідчить про доцільність використання полікарбонату порівняно з раніше актуальним матеріалом — склом.

Загалом принципи, які використовуються при розрахунках теплопровідності, широко використовуються в будівництві житлових і сільськогосподарських споруд, фундаментальність яких була досліджена та підтверджена експериментально М. А. Міхєєвим. У [20] Р. Берман розглядав теплопровідність твердих тіл на основі теплового потоку за рахунок багаторічних досліджень властивостей матеріалів. В. Ф. Формалєв наводить у [21] точні аналітичні результати розв’язання задач теплопровідності при вивченні анізотропних тіл. У [19] розглянуто графоаналітичний метод для дослідження процесів теплообміну в циліндричній конструкції з урахуванням усіх технічних характеристик шарів, а також розраховано залежність теплового потоку від температури середовища та матеріалу.

Мета дослідження: визначення напрямів підвищення енергоефективності теплиць арочного типу шляхом зміни кількості шарів покриття та їхніх теплофізичних характеристик.

Викладення основних результатів дослідження. Розглянемо теплицю арочного типу з такими припущеннями: конструкція має вигляд пів циліндра, при стиках покриття не виникає додаткового накладення шарів, у разі накладення шарів на початкову конструкцію й утворення повітряного прошарку внутрішні та зовнішні умови не змінюються.

Для розрахунку можливих температур на стиках тришарової циліндричної конструкції використовуються формули, отримані М. А. Міхєєвим у [16]. Повна енерговитратність багатошарової циліндричної конструкції визначається за формулою:

$$Q = q_l \cdot l, \quad (1)$$

де q_l — лінійна щільність теплового потоку; l — довжина конструкції.

Спочатку розраховуємо діаметри отриманих шарів конструкції циліндричної стінки:

$$d_{i+1} = d_i + 2\delta_i,$$

де d_i , d_{i+1} — внутрішній і зовнішній діаметр i -го шару; δ_i — товщина i -го шару. Розраховуємо термічний опір від теплоносія до циліндричної стінки (від більш теплого середовища до менш нагрітого) за формулою:

$$R_{l, \text{вн}} = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1},$$

де α_1 — [Вт/(м²·К)], коефіцієнт тепловіддачі повітря до стінки циліндра. Термічний опір циліндричної конструкції елементарного шару розраховується за такою формулою:

$$R_{l,i} = \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i},$$

де λ_i — [Вт/(м·К)], коефіцієнт теплопровідності i -го шару.

Термічний опір тепловіддачі від стінки циліндричної конструкції до холодного теплоносія (зовнішнього середовища теплиці) розраховується за формулою:

$$R_{l,зв} = \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_4}.$$

Лінійна щільність теплового потоку набуває такого вигляду:

$$q_l = \frac{\pi(t_{вн} - t_{зв})}{R_l},$$

де $R_l = \frac{1}{\alpha_1 \cdot d_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 \cdot d_4}$ — лінійний термічний опір теплопровідності через циліндричну стінку. У результаті отримуємо залежність зміни внутрішньої t_i та зовнішньої t_{i+1} температури i -го шару теплиці від коефіцієнта теплопровідності (який є характерним для матеріалу при будівництві споруд будь-якого типу), лінійної щільності та діаметра циліндричної конструкції:

$$t_{i+1} = t_i - \frac{q_l}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i}.$$

Враховуючи ефективну теплопровідність повітря за [19], потрібно розглядати окремо вклад кожного теплового потоку, а саме:

$$q_2 = 5,67\varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 \right] \pi d_2 + \frac{2\pi\varepsilon_k \lambda_{в}}{\ln(d_3/d_2)} (t_3 - t_2),$$

де $\varepsilon_k = \frac{\lambda_{екв}}{\lambda_{в}}$ — коефіцієнт конвекції; $\lambda_{в}$ — коефіцієнт теплопровідності повітря.

Кінцеве співвідношення для лінійного теплового потоку набуває вигляду:

$$q_l = 5,67\varepsilon_{пр} \left[\left(\frac{t_2 + 273}{100} \right)^4 - \left(\frac{t_3 + 273}{100} \right)^4 \right] \pi d_2 + \frac{\pi(t_{вн} - t_{зв})}{\frac{1}{\alpha_1 d_1} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2\lambda_i} \ln \frac{d_{i+1}}{d_i} + \frac{1}{\alpha_2 d_3}},$$

де для повітряного прошарку, за умови $(Gr \cdot Pr) \geq 10^3$, ефективна теплопровідність повітря з урахуванням конвекції визначається як $\lambda_{екв} = \lambda_{в} \varepsilon_k$, $\varepsilon_k = 0,18 \sqrt[4]{Gr \cdot Pr}$.

З огляду на вищевказані припущення розглянемо конструкцію теплиці у формі пів циліндра (рис. 1) із внутрішнім радіусом $r_1 = 2,5$ м, довжиною конструкції $l = 20$ м та матеріалом покриття поліетиленова плівка та полікарбонат литий. Основні характеристики, що використовувалися при розрахунках, коефіцієнт теплопровідності поліетиленової плівки, повітря [8] та полікарбонат ТМ Macrolux [7] — $\lambda_1 = 0,35$ [Вт/(м·К)]; $\lambda_2 = 0,022$ [Вт/(м·К)]; $\lambda_3 = 0,21$ [Вт/(м·К)]

відповідно. Припускаємо, що $\alpha_1 = 5$ [Вт/(м²·К)] та $\alpha_2 = 2,5$ [Вт/(м²·К)] у заданих умовах набувають заданих значень, температура повітря у приміщенні теплиці $t_{\text{вн}} = 20^\circ\text{C}$ та зовні теплиці $t_{\text{зв}} = -20^\circ\text{C}$ (середній показник по Україні), товщина накладених шарів $\delta_1 = 0,004$, $\delta_2 = 0,1$ та $\delta_3 = 0,008$ м [3].

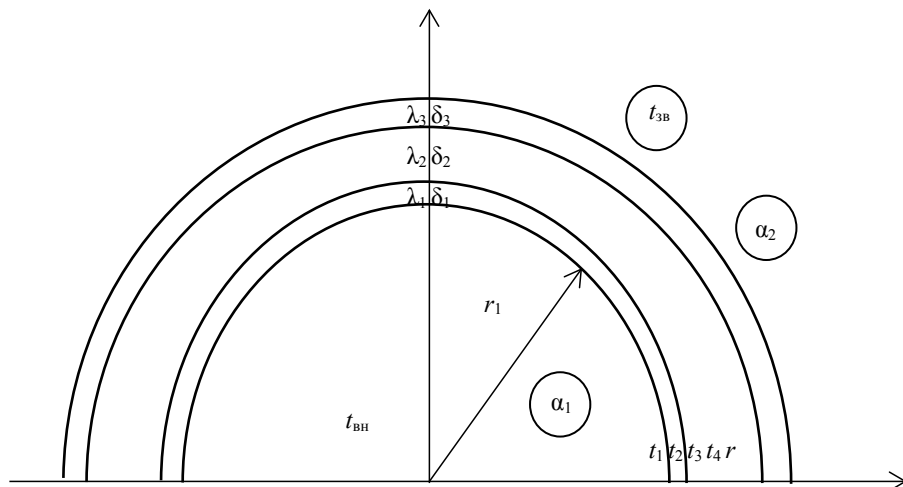


Рис. 1. Схема теплиці з урахуванням вхідних показників

На рис. 2 зображено залежність змін температур тришарової циліндричної стінки: 2а — схематична зміна температур на стиках циліндричної багатошарової стінки, 2б — залежність змін температур шарів «плівка-повітря-полікарбонат» за заданих умов залежно від радіуса конструкції.

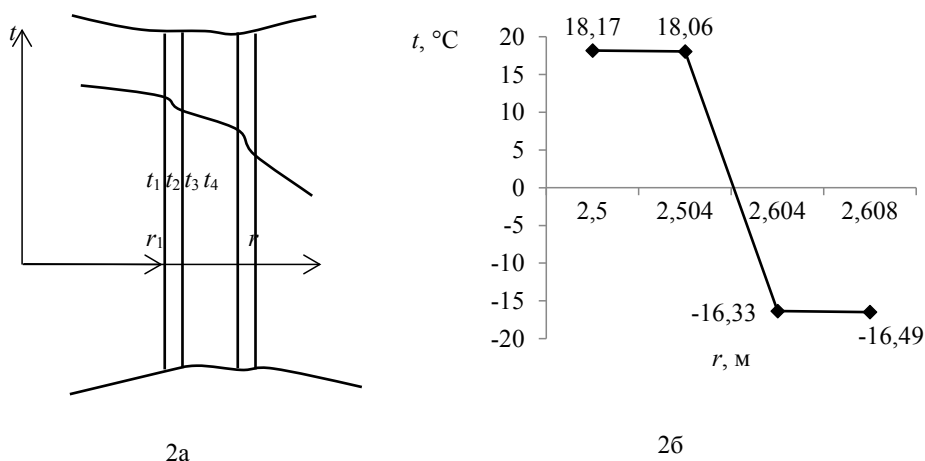


Рис. 2. Розподіл температур у тришаровій конструкції:

2а — схема зміни температури на стиках циліндричної конструкції;

2б — залежність зміни температур від радіуса тришарової циліндричної стінки теплиці

Під час порівняння енергоефективності варіантів з одношаровим покриттям і з додатковим — полікарбонатним, не враховується теплонадходження внаслідок зменшення прозорості конструкції.

Надалі планується розглядати вплив додаткового покриття на прозорість і теплонадходження від сонячної радіації, вплив зміни зовнішніх температур, а також поглинання температур внутрішнім середовищем теплиці. Зокрема, виконати порівняльний аналіз тепловтрат для каналів різної товщини та більшої кількості повітряних прошарків за рахунок додаткових перекриттів з будівельних матеріалів, а також виконати експериментальні дослідження та порівняти результати з отриманими аналітичним методом результатами.

Порівнявши значення енерговитрат одношарового та тришарового покриття, можна зробити висновок, що енергозатрати у тришаровій конструкції у 5 разів менші, а отже, це є головним показником, що свідчить про доцільність використання додаткового перекриття конструкції.

Середня ціна на один лист литого полікарбонату розміром 3,05 м·2,05 м складає 750 грн/м², на поліетиленову плівку ціна за рулон розмірами 6 м·50 м — 1817 грн [18]. Враховуючи розміри теплиці, отримуємо, що вартість покриття з полікарбонату становить 12 тис. грн, поліетиленової — 727 грн на задану площу перекриття. Виходячи з технічних характеристик матеріалу покриття, полікарбонат служить не менше 10 років, а плівка — 5 сезонів, тобто мінімальний термін використання 5 сезонів при правильному проектуванні. Якщо ж зовнішнім шаром буде виступати полікарбонат, термін слугування можна збільшити мінімум на 5 років. Тобто вартість перекриття теплиці арочного типу розмірами 5 м·20 м становить 13 тис. грн.

Враховуючи необхідність опалення взимку та період опалення в 90 днів, вартість опалення теплиці арочного типу електроенергією за тарифами сільської місцевості [17] з одношаровим покриттям з поліетиленової плівки складатиме від 25 тис. до 50 тис. грн. З урахування економії вище зазначених енерговитрат за рахунок тришарового покриття отримуємо, що затрати на опалювальний період у середньому становитимуть 6 тис. грн.

Тож лише в перший рік експлуатації одношарової теплиці витрати складатимуть у середньому 36 тис. грн, при тришаровому покритті необхідно буде витратити 19 тис. грн, проте вже з наступного сезону витрати складуть лише 6 тис. грн, що дає змогу зберегти в середньому від 15 до 200 тис. грн. за 5 сезонів.

Висновки

У рамках розвитку тепличного господарства малих підприємств і домашніх тепличних господарств виникає необхідність в енергоефективності, удосконаленні та реорганізації процесу виробництва споживаної продукції шляхом реструктуризації моделі побудови тепличних конструкцій. Ці зміни можливі за рахунок внесення технічних коректив у будову. Невід’ємною складовою змін залишається процес дослідження та порівняння технічних і фізичних характеристик, форм і структур матеріалів конструкції.

Наразі актуальність корегування плану вирощування тепличної продукції зумовлена низкою чинників, серед яких передусім можна виділити економічний.

Головним чином за рахунок змін ціни на опалення та використання водопостачання виникає необхідність зменшення затрат на вирощування готової продукції. В умовах проведених досліджень було розглянуто можливість проходження тепла крізь поліетиленову плівку й тришарову конструкцію, що складалася з поліетиленової плівки товщиною 0,004 м, повітряного прошарку (0,1 м) та стільникового полікарбонату (0,004 м). Розраховано кількість тепла в теплиці й температуру на стиках поверхонь, що дало змогу вирахувати енергозатрати на збереження температури в конструкції.

Обґрунтовано, що правильно підібрана форма теплиці, матеріал і метод модифікації покращують показники збереження тепла в конструкції, що забезпечує енергоефективність. Результати дослідження та порівняльний аналіз для теплиці з різною кількістю шарів покриття доводить ефективність збереження тепла в конструкції порівняно з одношаровою теплицю на прикладі використання матеріалу «поліетиленова плівка-полікарбонат» у 5 разів. Це призводить до економії витрат на опалення електроенергією до 200 тис. грн за 5 років.

Надалі планується розглядати енергоефективність тепличної конструкції з урахуванням теплопровідності. Більш детальний розгляд конвекції повітря в прошарку між шарами арочної (циліндричної) теплиці, зважаючи на широкий спектр параметрів впливу (нагрів поверхні під прямими сонячними променями, поверхнєве відбиття та розсіювання світла між шарами) дасть змогу визначити умови, за яких виникне можливість підвищення енергоефективності збудованої теплиці та більш точного й детального розрахунку витрат на опалення.

Література

1. Концепція Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2022 року / Міністерство аграр. політики та продовольства. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1437-2015-r#Text> (дата звернення: 20.07.2020).
2. Концепція розвитку фермерських господарств та сільськогосподарської кооперації на 2018-2020 роки / Міністерство аграр. політики та продовольства. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/664-2017-r#Text> (дата звернення: 20.07.2020).
3. Новиченок Н. Л., Шульман З. П. Теплофизические свойства полимеров. Минск: «Наука и техника», 1971. 120 с.
4. Пенджиєв А. М. Возможности экономии тепловой энергии в теплицах сельскохозяйственных предприятий. Научный результат. *Экономические исследования*. 2018. Т. 4, № 1. С. 66—79.
5. Юдаєв И. В. Изучение светопропускающих свойств сотового поликарбоната — покрывного материала круглогодичных теплиц. *Научный журнал КубГАУ*. 2016. № 120(06). С. 1—14.
6. Мазаєв Л. Р. Метод расчета и проектирования солнечной теплицы для региона Сибири: автореф. дисс. на соискание науч. степени канд. техн. наук : ВАК РФ05.20.02. Барнаул, 2011. 23 с.
7. Технічний довідник. URL: https://plastics.ua/assets/files/catalogs/building/Plastics_Tech-Reference.pdf (дата звернення: 21.07.20).
8. Чепурний М. М. Основи технічної термодинаміки. Вінниця: Поділля-2000, 2004. 358 с.
9. Горобець В. Г., Антипов Є. О. Застосування сонячних енергетичних установок та акумуляторів теплоти в системах тепло забезпечення теплиць. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2014. № 194(2). С. 100—107.

10. Блажнов А. А. Анализ строительных решений зимних теплиц. URL: [http://library.orelsau.ru/annual-subscription/Сборник%20Парахинские%20чтения%202018%20\(2\).pdf#page=100](http://library.orelsau.ru/annual-subscription/Сборник%20Парахинские%20чтения%202018%20(2).pdf#page=100) (Дата звернення: 21.07.2020).
11. Чигвінцева О. П., Киприч В. В. Дослідження теплофізичних властивостей органопластиків на основі термопластів. *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. 2016. № 53. С. 183—187.
12. Болоненкова Л. П., Габрінець В. О., Накашидзе Л. В., Митрохов С. О. Вибір конструкційних матеріалів для сонячного колектора. *Сонячна енергетика*. 2012. № 2(51). С. 51—54.
13. Кашин С. П. Теплицы и парники. Москва: Рипол-Классик, 2012. 576 с.
14. Бондарева О. Б. Приусадебное хозяйство. Донецк: Сталкер, 2007. 92 с.
15. Мишко С. В., Турчин В. О., Чебанов Т. Л., Чебанов Л. С. Технологія будівництва мобільних фермерських теплиць. *Нові технології в будівництві*. 2016. № 31. С. 115—118.
16. Михеев М. А., Михеева И. М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. Москва: «Энергия», 1977. 344 с.
17. Мінфін. Тарифи на електроенергію. URL: <https://index.minfin.com.ua/tariff/electric/> (дата звернення: 21.07.20).
18. Интернет-магазин Вашего урожая. URL: <https://fermershop.com.ua> (дата звернення: 20.07.20).
19. Абишева Л. С. Исследование сложного теплообмена в многослойной цилиндрической конструкции графоаналитическим методом. *Вестник Самарского гос. тех. ун-та. Серия «Технические науки»*. 2016. Т. 24. № 4. С. 99—107.
20. Берман Р. Теплопроводность твердых тел / пер. с англ. Л. Г. Асламазова; под ред. В. З. Кресина. Москва: Мир, 1979. 286 с.
21. Формалев В. Ф. Теплопроводность анизотропных тел. Часть 1. Аналитические методы решения задач. Москва: Физматлит, 2014. 349 с.