



DOI: 10.31388/2220-8674-2021-2-34

УДК [621.3.047.2:621.311.243]:631.365

В. М. Боярчук, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-8294-8759

С. В. Коробка, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-4717-509X

Р. Є. Кригуль, к.т.н.

ORCID: 0000-0003-1295-4162

М. І. Бабич, к.т.н.

ORCID: 0000-0002-3061-9176

І. Г. Стукалець, к.т.н.

ORCID: 0000-0001-7107-4865

*Львівський національний аграрний університет*

e-mail: krrroma@ukr.net

## ОБҐРУНТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ГЕЛІОТЕРМІЧНИХ УСТАНОВОК НА ПРИКЛАДІ ПОВІТРЯНОГО ГЕЛІОКОЛЕКТОРА

*Анотація.* Розроблено нову конструкцію повітряного сонячного геліоколектора для сонячної сушарки, що включає подвійне скління та селективну поверхню виготовлену із тонкого металу міді з вхідними та вихідними отворами на її основі. Встановлено, що для сприймаючої поверхні з подвійним склінням необхідно використовувати скло з тепловідбиваючим покриттям із твердого типу К-класу з коефіцієнтом випромінювання  $\varepsilon=0,1\dots 0,15$ . Це дає можливість отримати максимально широкий спектр прямих сонячних променів, які опромінюють поверхню поглинаючої пластини та зменшують дифузійну складову випромінювання, що забезпечує збільшення ефективності сонячного колектора.

*Ключові слова:* сонячний тепловий повітряний геліоколектор, селективне покриття, повітряна сонячна система опалення.

*Постановка проблеми.* Плаский повітряний геліоколектор (ПГК) – це пристрій для збору сонячної енергії у видимому і інфрачервоному діапазоні та перетворені його в теплову енергію. Абсорбер – штучний матеріал, здатний до абсорбції (наприклад, мідний хвилястий лист покритий чорною селективною фарбою). Основна вимога до абсорберів, що використовуються в ПГК – це висока вбираюча здатність щодо компонента, який абсорбується, а саме сонячна енергія. Цінною якістю абсорберів є можливість регенерації, що здешевлює технологічний процес. Наприклад збирання сонячної енергії у видимому і інфрачервоному діапазоні та перетворені її в теплову енергію. У ряді випадків абсорбенти повинні забезпечувати



селективність абсорбції. Крім того, абсорбент повинен бути хімічно індиферентним щодо абсорбату та хімічно стабільним (не розщеплюватися, не окиснюватися, не осмолюватися тощо), дешевим та корозійнонеактивним.

Дослідження ефективності роботи плоских повітряних сонячних колекторів зводиться до знаходження напрямів на зменшення тепловтрат, збільшення теплопродуктивності, інтенсифікації теплообміну між абсорбером і теплоносієм. Також важливим є вибір найбільш продуктивної форми поверхні абсорбуючих пластин, що мають добрі енергетичні характеристики. Зокрема, збільшення теплопродуктивності, зменшення тепловтрат, малі витрати тиску на перенесення повітряних мас через колектор, не вимагають додаткових затрат енергії та коштів на виготовлення. У зв'язку з цим, тема досліджень, присвячена дослідженню ефективності роботи плоского сонячного повітряного геліоколектора з хвилястою поглинаючою поверхнею є актуальною.

*Аналіз останніх досліджень.* На сьогодні існує багато сонячних геліоколекторів, що випускаються промисловістю. Ці геліоколектори використовуються в основному для отримання низько потенційного теплоносія. Тому що існуючі їхні конструкції не дозволяють здійснити нагрів до більш високих температур, а саме 30 – 60 °С. Серед встановлених сонячних колекторів в країнах Європи 92 % складають плоскі колектори, що мають ККД 50 – 60 %, і всього 8 % складають колектори на основі вакуумних труб.

В праці [1,5,6] проаналізовано роботу розробленої експериментальної конструкції геліоколектора та розраховано його тепловий баланс, ККД, визначено основні складові втрат енергії у навколишнє середовище та їхнє співвідношення на основі результатів серії досліджень установки в літній період у звичайному робочому режимі та в режимі стагнації. Однак в запропонованій методиці не приймалися до уваги складові величини температурних діапазонів та різниці температур між паралельними поверхнями, а саме тильною поверхнею абсорбера та повітряного каналу.

У праці [2,7] розроблено новий повітряний колектор з абсорбером хвилястого типу, що працює виключно від сонячної енергії за принципом одночасної вентиляції приміщення та обігріву для субтропічних кліматичних умов м. Анкари (Туреччина). Підібрано селективне покриття для поглинальної поверхні абсорбера в основі якого є високі показники оптичних та експлуатаційних характеристик, а саме теплова потужність та енергетичний ККД запропонованого геліоколектора. Однак під час випробувань не бралася до уваги проникність ламінарного потоку на зменшення конвективної складової тепловтрат скляного покриття та поглинальної панелі (абсорбера). Це



не дозволяє розраховувати перехідні режими роботи колектора та теплопродуктивність.

У роботі [3,8] автори наводять методіку контролю якості для сонячних колекторів, яка дасть змогу оптимізувати показники якості сонячних колекторів, а саме показники безпеки, продуктивності і ефективності та встановити ефективність їх роботи за коефіцієнтом корисної дії, що виражений як комплексний показник якості. Однак в запропонованій методиці не приймалися до уваги складові конвективного і радіаційного теплообміну скляної поверхні.

Автори у роботі [4,9] проаналізували відомі методи розрахунку повітряних сонячних колекторів. Запропонували метод розрахунку системи сонячного теплопостачання із геліопанелями. Розробили алгоритм комп'ютерного розрахунку системи сонячного теплопостачання із геліопанелями із врахуванням впливу прямої та розсіяної сонячної радіації на ефективність геліопанелі. Однак, в запропонованій методиці не приймалась до уваги радіаційна складова коефіцієнта тепловіддачі від поглинаючої панелі до скляного покриття, яка розглядається під час розрахунку довгохвильового (теплого) випромінювання.

Розроблені методи підбору та розрахунку повітряного сонячного колектора виконано здебільш для країн зі спекотним кліматом, наприклад, для субтропічних кліматичних умов Туреччини, Ірану, Болгарії, Греції, Хорватії тощо. Більшість методик підбору та розрахунку теплотехнічних характеристик повітряного сонячного колектора здійснено за допомогою імітаційних моделей під час комп'ютерного моделювання. Наведені конструкції повітряних сонячних колекторів потребують модифікації та удосконалення з метою підвищення ефективності роботи в умовах помірного континентального клімату України та зменшення капітальних і експлуатаційних затрат. Таким чином, вирішальним аспектом для прийняття рішення під час використання повітряного сонячних колекторів в геліосушарці є обґрунтування його оптимальних конструктивно-технологічних параметрів.

*Формулювання мети статті.* Метою даного дослідження є підвищення ефективності використання сонячної енергії у геліосушарці на підставі розробки нової конструкції абсорбера з хвилястою поверхнею для повітряного геліоколектора, а також вдосконалення його методики розрахунку енергетичних характеристик.

*Основна частина.* Найпростішим є ПГК у вигляді коробки з теплоізолюваними стінками, подвійним заскленням і селективною поверхнею на її днищі. За подвійного засклення мінімізується потік конвективних тепловтрат від поглинаючої поверхні через великий

коефіцієнт теплопереносу поперек турбулізованого потоку повітря. Режим ламінарного потоку зменшує конвективну складову тепловтрат, що допускає одношарове прозоре покриття. Проте одночасно зменшується й коефіцієнт тепловіддачі від поглинаючої панелі, що вимагає подовження контактного шляху для повнішого засвоєння поглинутої сонячної енергії. В іншому випадку підвищується температура поглинаючої поверхні і зростає радіаційна складова тепловтрат. Відтак, за даними дослідження [2,10], ККД колектора не може перевищувати 24 %. Вищу ефективність мають колектори, у яких потік теплоносія скеровується у щілину між тильною стороною сприймаючої поверхні і дном колектора, що схематично відображено на рис. 1.

З метою збільшення ефективності тепловідводу від нагрітої панелі, повітряний потік потрібно турбулізувати вибором перерізу щілини, швидкості потоку або додатковими конструктивними елементами. Натомість у щілині під скляним покриттям слід передбачити відведення перегрітого повітря з її верхньої частини. Для цього достатньо зробити кілька вхідних отворів невеликого діаметру безпосередньо під покрівельним склом, а верхні вихідні отвори – біля поглинаючої панелі.

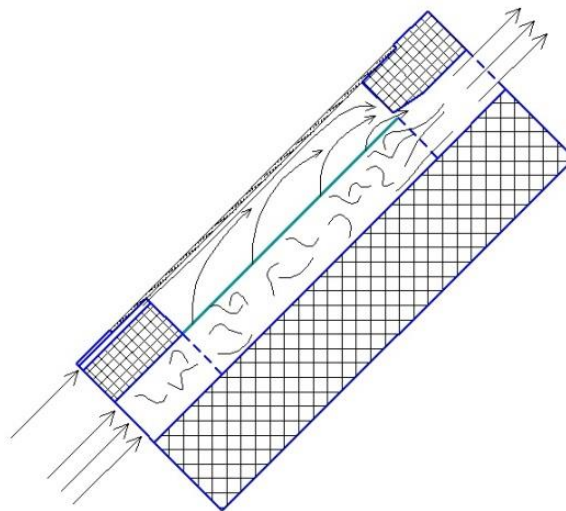


Рисунок 1. Схематична будова повітряного ГК

Якщо отвори сполучити з нижньою щілиною, то за рахунок підсмоктування створиться слабка тяга для ефективного вентилявання простору під скляним покриттям. При цьому виникаючі зародки вертикальних потоків будуть частково відсікатися дотичним до скляного покриття слабким ламінарним потоком свіжого атмосферного повітря. Таким чином відпадає необхідність подвійного засклення, а невелике зменшення температури вихідного потоку компенсується збільшенням теплопродуктивності колектора. За такого конструктивного виконання, принаймі, вирівнюється температурне



поле прозорого покриття, зменшується рівень конвективних та радіаційних складових тепловтрат. Завдяки такій конструкції характеристики повітряного колектора у певних межах можна регулювати ще й зміною нижнього та верхнього зазорів між скляним покриттям і корпусом. Довжину колектора також варто обмежувати значенням 1,5 м, інакше локальні хаотичні конвективні мікропотоки, за наявності тяги зливаються у суцільний стійкий потік вздовж прозорого покриття [3] з неминучим зростанням конвективних тепловтрат.

Передача тепла від сприймаючої поверхні до корисного потоку повітря відбувається через проміжний шар металевої підкладки з високим коефіцієнтом теплопровідності. Для підвищення ефективності тепловіддачі до тильного боку сприймаючої панелі прикріплюють додаткові опори у вигляді гнутих тонколистових мідних швелерів висотою 2–3 см. Опори підвищують жорсткість тонкого листа, що запобігає його коливанням при взаємодії з турбулізованим потоком повітря.

З метою зменшення крайових ефектів потік вхідного повітря попередньо турбулізується нагнітальним вентилятором. А при малих швидкостях турбулентний режим забезпечують поперечні вставки, між поздовжніми швелерними стійками та профільованою поверхнею днища колектора.

Якщо відношення довжини повітропроводу до його діаметра перевищує 10, то вклад крайових ефектів розвинутого турбулентного потоку несуттєвий і пов'язані з ним ефекти тепловіддачі можна не враховувати. При малих швидкостях потоку режим розвинутої турбулентності підтримується вдовж колектора за умови  $L/2l > 10$ , де  $L$  – довжина каналу  $L$ , а  $2l$  – його подвійна висота [2]. Для колектора довжиною 1 м висота каналу з турбулізованим потоком не повинна перевищувати 5 см. Сукупність перелічених конструктивних рішень сприяє підвищенню коефіцієнта тепловіддачі від металевої підкладки при зменшених швидкостях потоку, вихідної температури потоку і енергетичної ефективності колектора у цілому.

У повітряних геліоколекторах [3], при температурах близьких до кімнатної, потік радіаційних тепловтрат приблизно удвічі перевищує вільно конвективний, тому для його зменшення необхідно використовувати скло з тепло відбиваючим покриттям твердого типу (K-glass або K-скло). Перевагою цього покриття є висока механічна стійкість, що дозволяє використовувати їх на відкритих поверхнях, а недоліком – дещо вищий (за «м'яке» покриття) коефіцієнт випромінювання  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,15$ . За складом це оксиди металів, найчастіше олово леговане фтором. Але такі покриття доцільно наносити тільки на спеціальне скло з малим вмістом заліза, яке пропускає всередину значно більший потік сонячної енергії порівняно

з звичайним віконним склом, що видно з порівняння їх спектральних коефіцієнтів пропускання на рис. 2.

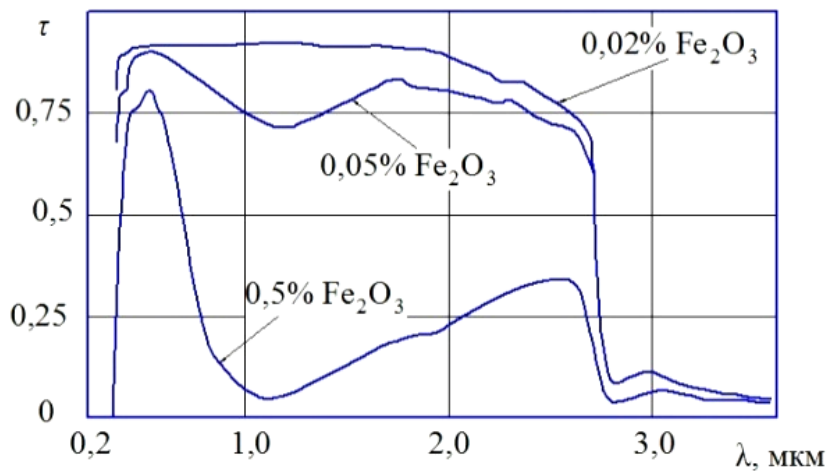


Рисунок 2. Спектри пропускання скла з різним вмістом заліза

Скло з великим вмістом заліза нагрівається як сонячним потоком, так і зворотнім потоком випроміненим від нагрітої поверхні сприймаючої панелі з наступний його відведенням у навколишнє середовище. Відтак, неселективно прозоре скло з тепловідбиваючою плівкою, яка велику частину радіаційного потоку повертає назад, забезпечить відчутне підвищення ефективності сонячного колектора. Виходячи з наведених оцінок, пропонується конструкція колектора, схема якого наведена на рис. 3 та рис. 4.

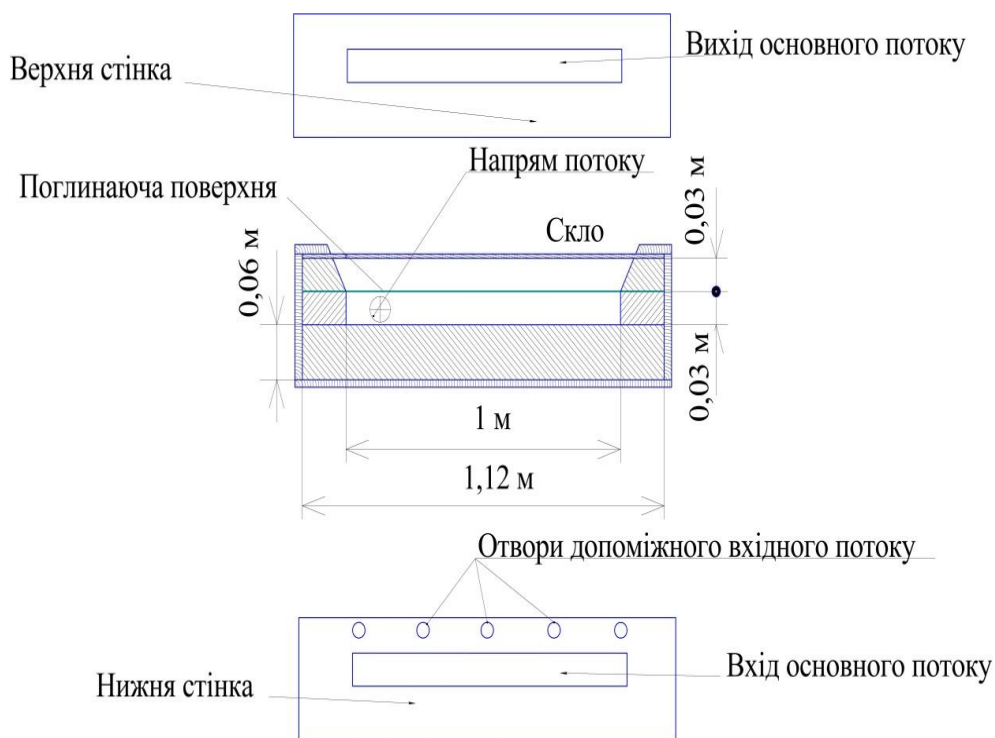


Рисунок 3. Схематична конструкція повітряного колектора

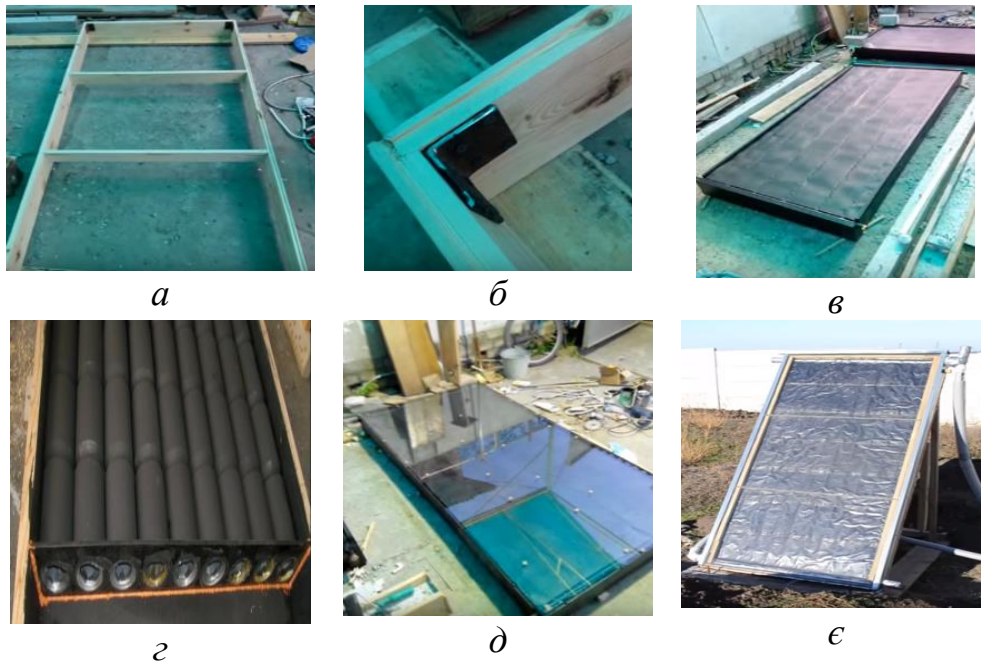


Рисунок 4. Етапи складання елементів конструкції дослідного зразка повітряного геліоколектора: *а* – складання каркасу колектора; *б* – перевірка геометрії корпусу колектора; *в* – закріплення абсорбера; *г* – розміщення повітряних каналів; *д* – встановлення одношарового скла з тепловідбиваючим покриттям твердого типу 0,02 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; *є* – монтаж та пусконаладження дослідного зразка ПГК [3,5].

**Висновки.** Стінки колектора теплоізовані пінопластовими плитами товщиною 6 см з коефіцієнтом теплопровідності  $\lambda=0,040$  Вт/м·К. Тепловтрати від поглинаючої поверхні до навколишнього середовища проходять через скляне покриття і теплоізоляцію. Загальна площа теплоізоляції включає суму площ скляного покриття і днища  $F_{ск}=1,5$  м<sup>2</sup>, бокових  $F_6=0,18$  м<sup>2</sup> і торцевих стінок повітряних камер  $F_{вх}=0,06$  м<sup>2</sup> теплового контакту з нагрітим повітрям. Таким чином, запропоновані інженерні рішення, дають змогу одержати максимально великий спектр потоку прямих сонячних променів, які опромінують поверхню поглинальної пластини та знизити розсіюну складову випромінювання, що є частиною радіаційного потоку і забезпечує підвищення ефективності сонячного колектора.

#### Список використаних джерел

1. Parametric study on the thermal performance and optimal design elements of solar air heater enhanced jet impingement on a corrugated absorber plate / Alsanossi M. Aboghrara et al. *International journal of photoenergy*. 2018. 1469385. 21 p. DOI: 10.1155/2018/1469385.

2. Experimental study of solar photovoltaic/thermal (PV/T) air collector drying performance / D. Kong et al. *Solar Energy*. 2020. Vol. 208. P. 978-989. DOI 10.1016/j.solener.2020.08.067.



3. Drying kinetics of cabuya (*Piper retrofractum* Vahl) fruit as affected by hot water blanching under indirect forced convection solar dryer / L. C. Hawa et al. *Solar Energy*. 2021. Vol. 214. P. 588-598. DOI 10.1016/j.solener.2020.12.004.

4. Sreekumar A. Techno-economic analysis of a roof-integrated solar air heating system for drying fruit and vegetables, *Energy Conversion and Management*. 2010. Vol. 51. № 11. P. 2230-2238. DOI: 10.1016/j.enconman.2010.03.017.

5. Aziz M., Prawisudha P., Prabowo B., Budiman B. A. Integration of energy-efficient empty fruit bunch drying with gasification/combined cycle systems. *Applied Energy*. 2015. Vol. 139. P. 188-195. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.11.038.

6. Korobka S., Babych M., Krygul R., Zdobytskyj A. Substantiation of parameters and operational modes of air solar collector *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 3, № 8 (93). P. 16-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.132090.

7. Duffie J. A., Beckman W. A. Solar engineering of thermal processes. 4-d edition. Copyright 2013 by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey. 944 p.

8. Karim M. A., Amin Z. M. Mathematical modelling and performance analysis of different solar air collectors. *IJUM Engineering Journal*. 2015. Vol. 16, № 2. P. 43-55. DOI: 10.31436/iiumej.v16i2.603.

9. Sharma S. P., Som Nath Saha. Thermohydraulic Performance of Double Flow Solar Air Heater with Corrugated Absorber. *International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering*. 2017. Vol. 11, № 7. P. 750-756. doi.org/10.5281/zenodo.1131465.

10. Vishwakarma A., Jaurker A. R. Experimental Investigation for Enhancement of Heat Transfer in Double Pass Solar Air Heater Using Transverse Discrete Rib Geometry. *International Journal of Emerging Trends in Engineering and Development*. 2014. Vol. 4. P. 366–377.

Стаття надійшла до редакції 10.10.2021 р.

**V. Boyarchuk, S. Korobka, R. Krygul, M. Babych, I. Stukalets**  
**Lviv National Agrarian University**

## **SUBSTANTIATION OF THE CONSTRUCTION OF HELIOTHERMAL INSTALLATIONS ON THE EXAMPLE OF AIR SOLAR COLLECTOR**

### *Summary*

We developed a new design of an air solar collector made in the form of an inseparable power unit, which includes a frame with heat-insulated walls, single glazing and a selective surface on its bottom. We defined a number of generalizing dependences





for the determination of thermal efficiency of an air solar collector, namely, an influence of the mass air flow  $q_a$  on a temperature difference of the heat-transfer agent  $t_o$  and insulation  $E$ , on heat productivity  $q$  and the efficiency of the solar collector. Based on the experimental data, we obtained linear regression dependencies of the average daily ambient temperature  $t_{at}$  on energy illumination  $E$  and the average temperature of the heat-transfer agent carrier  $t_{at}$  of the average daily ambient temperature  $t_{at}$ . We verified the adequacy of the results of theoretical and experimental studies. We established that we achieve the maximum values of the efficiency of the solar collector – from 65 to 80.6 % at a temperature of the outlet flow of the heat-transfer agent  $t_o$  from 30 to 60 °C and mass air flow,  $q_a$  from 170 to 190 m<sup>3</sup>/h. We determined that an increase in the level of insulation  $E$  from 100 to 1000 W/m<sup>2</sup> makes it possible to increase heating productivity of the collector  $q$  from 320 to 1260 W and the temperature of the heat-transfer agent at the collector outlet  $t_o$  from 10 to 60 °C. We can use the obtained results in development and improvement of technical means for drying fruits, for improvement of technological and energy efficiency of the process.

The research carried out in this study is a final stage of a comprehensive study for improvement of the efficiency of the process of fruits drying based on development of design and justification of operating modes of a solar dryer, which will reduce a cost of energy resources due to solar energy. Because the developed air solar collector relates to the air solar heating system of a solar dryer. The solar dryer was developed at «Zorya» private farm located in the zone of western Polissya, namely in the city of Korts, Rivne region (Ukraine).

**Key words:** air solar collector, transparent coating, absorber, solar energy, temperature, heat exchange, heat loss.

**В. М. Боярчук, С. В. Коробка, Р. Е. Крыгуль, М. И. Бабич, И. Г. Стукалец**  
**Львовский национальный аграрный университет**

## **ОБОСНОВАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ГЕЛИОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НА ПРИМЕРЕ ВОЗДУШНОГО ГЕЛИОКОЛЛЕКТОРА**

### ***Аннотация***

Разработана новая конструкция воздушного солнечного гелиоколлектора для солнечной сушки, включающая двойное остекление и селективную поверхность, изготовленную из тонкого металла меди с входными и выходными отверстиями на ее основе. Установлено, что для воспринимающей поверхности с двойным остеклением необходимо использовать стекло с теплоотражающим покрытием из твердого типа К-класса с коэффициентом излучения  $\varepsilon = 0,1 \dots 0,15$ . Это дает возможность получить максимально широкий спектр прямых солнечных лучей, которые облучают поверхность поглощающей пластины и уменьшают диффузионную составляющую излучения, обеспечивают увеличение эффективности солнечного коллектора.

**Ключевые слова:** воздушный гелиоколлектор, прозрачное покрытие, абсорбер, солнечная энергия, температура, теплообмен, теплопотери.