

## ЕНЕРГЕТИЧНИЙ БАЛАНС ГЕЛІОСУШАРКИ

*к.т.н. А. Татомир, здобувач С. Коробка  
Львівський національний аграрний університет*

**Аналіз проблеми.** Під час оцінки енергетичної ефективності геліосушарки з використанням плоского дзеркального концентратора та теплового акумулятора потрібно об'єктивно порівняти корисно застосовувану та витрачену на сушіння теплову енергію, а також закономірності її оптимізації.

**Огляд останніх досліджень і публікацій.** Під час розробки нового сушильного обладнання економія паливно-енергетичних ресурсів має першочергове значення. Тому ставиться питання про створення енергоефективних сушильних апаратів, в яких вимоги до технології сушіння та енергетики не тільки органічно поєднувалися б, а й доповнювали одна одну.

У сучасних технологіях, пов'язаних із перетворенням сонячної енергії, зокрема у геліосушарці, важливе місце займають обладнання (повітряний колектор, тепловий акумулятор, сушильна камера, плоский дзеркальний концентратор) і процеси. Об'єктивно оцінити ступень енергетичної досконалості яких можна встановити тільки за результатом їх термодинамічного аналізу. Найпростішим методом термодинамічного аналізу є енергетичний, заснований на законі збереження енергії. Він дає змогу оцінити абсолютні та відносні втрати енергії обладнання і виявити процеси з найбільшими втратами. Однак цей метод прирівнює всі види енергії, зокрема і теплової, що не зовсім коректно з позицій другого закону термодинаміки, оскільки будь-який вид енергії може повністю перетворюватись у теплову, а зворотній процес супроводжується неминучими втратами [1].

Під впливом цих вимог в останні десятиріччя був розроблений енергетичний метод аналізу, який обґрунтований у працях Р.К. Клаузіуса, Дж.В. Гіббса, Дж. Даффі, А.С. Гінзбурга, А.Ф. Сафарова, Ж. Гюї, А. Стодоли, Я. Шаргуга та Р. Петели та ін. Їх основна ідея – введення, поряд із загальним фундаментальним поняттям енергії, додаткових показників – фізичних параметрів навколишнього середовища (температури  $T_{нс.ср.}$ , сонячної активності  $I_{Нср}$ , відносної вологості  $\varphi_{н.с.}$ ). Такий підхід дає змогу врахувати той факт, що енергія, залежно від зовнішніх умов, може мати різну цінність для практичного використання [2].

Розрахунки складових енергетичних балансів і різних характеристик технічних систем геліосушарки, з урахуванням фізичних параметрів навколишнього середовища, дають можливість найпростіше і достатньо наглядно розв'язувати багато наукових і технічних задач. Вони допомагають уникнути частих помилок, які пов'язані із ігноруванням якісного аспекту перетворень [3].

Особливістю геліосушарки є те, що вхідними і вихідними речовинами, які обробляють у ній, є повітря і фрукти. У результаті роботи геліосушарки вони набувають необхідної температури, вологості та інших теплофізичних параметрів [4].

У геліосушарці зовнішнім середовищем служить зовнішнє повітря, параметри якого можуть бути різними залежно від місця і часу. Основними складниками зовнішнього середовища (повітря) є його суха частина та водяна пара [5].

Зменшення затрат енергії, яку споживає геліосушарка, диктує необхідність оптимізації її параметрів, що найповніше можна досягнути на основі енергетичного аналізу, який враховує не тільки кількість, але й якість затраченої енергії [6].

**Постановка завдання.** Оцінити енергетичну ефективність геліосушарки з використанням плоского дзеркального концентратора та теплового акумулятора.

**Виклад основного матеріалу.** Експериментальні дослідження виконували на геліосушарці, схема якої наведена на рис. 1 [7].

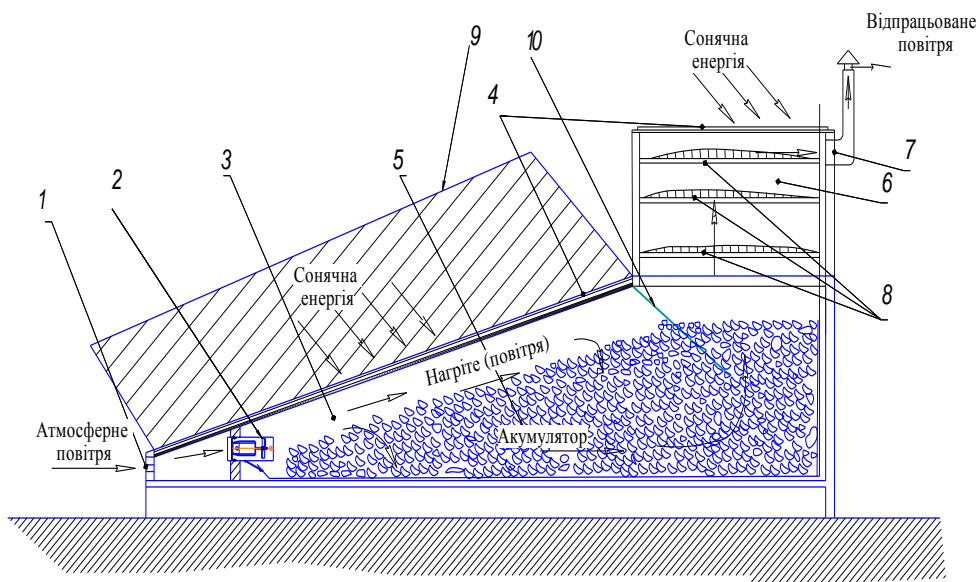


Рис. 1. Геліосушарка з тепловим акумулятором та плоским дзеркальним концентратором:

- 1 – вхідний канал; 2 – вентилятор; 3 – повітропровід; 4 – повітряний колектор;
- 5 – тепловий акумулятор; 6 – сушильна камера; 7 – витяжний канал; 8 – решета;
- 9 – плоский дзеркальний концентратор; 10 – заслінка.

Вхідними даними для розрахунку енергетичного балансу геліосушарки є: маса закладання вологого матеріалу  $m_{\phi}$ , кг; кількість висушеного продукту  $G$ , кг/год; початкова вологість матеріалу (на загальну масу)  $W_n$ , %; кінцева вологість матеріалу  $W_k$ , %; витрата сушильного агента  $Q_{тн}$ , кг/год.

Енергетичний баланс геліосушарки – це порівняння корисно застосованої та витраченої теплової енергії на сушіння.

Тепловий баланс геліосушарки за один цикл сушіння, кДж:

у денний час:

$$Q_{иср} + Q_{кон} = Q_{наг.р.} + Q_{\phi.} + Q_{вст} + Q_{та} + Q_{від.тн.} + \sum Q_{втр.}, \quad (1)$$

у вечірній:

$$Q_{та} + Q_{кон} = Q_{наг.р.} + Q_{ф.} + Q_{вип} + Q_{від.тн.} + \sum Q_{втр.}, \quad (2)$$

де  $Q_{нсп}$  – енергія сонячного випромінювання, яку поглинув абсорбер, кДж;  $Q_{кон}$  – енергія (теплота), яку віддає сушильній камері нагрітий теплоносіє, кДж;  $Q_{наг.р.}$  – енергія (теплота), витрачена на нагрівання решет, Вт;  $Q_{ф.}$  – енергія (теплота), витрачена на нагрівання продукту, кДж;  $Q_{вип.}$  – теплота, витрачена на випаровування вологи, кДж;  $Q_{та}$  – теплота, накопичена (відведена) в тепловому акумуляторі, кДж;  $Q_{від.тн.}$  – теплота, що видаляється з відпрацьованим теплоносієм з сушильної камери, кДж;  $\sum Q_{втр.}$  – втрати теплоти в навколишнє середовище через огороження геліосушарки, кДж.

Енергію сонячного випромінювання, поглинена абсорбером визначають за формулою, кДж:

$$dQ_{нсп} = K_z \cdot K_{від.} \cdot A_{погли} \cdot I_{нсп} \cdot S_{нк} \cdot d\tau, \quad (3)$$

де  $K_z$  – коефіцієнт забруднення корпусу повітряного колектора,  $K_z = 0,95$ ;  $K_{від.}$  – коефіцієнт багаторазового відбивання сонячної радіації від абсорбера до світлопроникального матеріалу повітряного колектора,  $K_{від.} = 0,23$ ;  $A_{погли}$  – середня поглинальна здатність абсорбера;  $I_{нсп}$  – енергія сонячної радіації з урахуванням прозорості атмосфери за відрізок часу доби, Вт/м<sup>2</sup>,  $S_{нк}$  – площа повітряного колектора, м<sup>2</sup>.

Енергію, яку віддає сушильній камері нагрітий теплоносіє визначається за формулою, кДж:

$$dQ_{кон} = S_{нк} \cdot v_{тн} \cdot \rho_{тн} \cdot c_{тн} \cdot (T_{тн.2} - T_{тн.1}) \cdot d\tau. \quad (4)$$

Енергію, витрачену на нагрівання решет знаходять за формулою, кДж:

$$dQ_{наг.р.} = h_{шар} \cdot \rho_{пр} \cdot (3 \cdot S_{реш}) \cdot c_{пр} \cdot (T_{тн.3} - T_{тн.2}) \cdot d\tau. \quad (5)$$

Енергію, витрачену на нагрівання продукту, розраховують за формулою, кДж:

$$dQ_{ф.} = m_{ф.} \cdot c_{пр} \cdot (T_{ф.2} - T_{ф.1}) \cdot d\tau. \quad (6)$$

Енергію, що витрачену на випаровування вологи з продукту, обчислюють за виразом, кДж:

$$dQ_{вип.} = \rho_m \cdot Q_n \cdot S_{ск} \cdot d\tau. \quad (7)$$

Енергія, що відводиться (підводиться) від теплового акумулятора визначається за формулою, кДж:

$$dQ_{та} = \pm V_{та} \cdot \rho_{та} \cdot c_{та} \cdot (T_{та.2} - T_{та.1}) \cdot d\tau. \quad (8)$$

Енергію, відпрацьованого теплоносія, видаленого в навколишнє середовище розраховують за формулою, кДж:

$$dQ_{від.тн.} = (1 - K_{цир}) \cdot \rho_{тн} \cdot c_{тн} \cdot v_{тн} \cdot S_{ск} \cdot (T_{вих.тн.} - T_{н.с.}) \cdot d\tau. \quad (9)$$

Втрата теплоти через корпус геліосушарки, кДж:

$$dQ_{втр.1} = S_{зс} \cdot K \cdot (T_{кам} - T_{н.с.}) \cdot d\tau. \quad (10)$$

де  $h_{шар}$  – висота шару фруктового матеріалу на решетах, см;  $v_{тн}$  – швидкість теплоносія, м/с;  $\rho_{та}$ ,  $\rho_{тн}$ ,  $\rho_{пр}$  – густини, відповідно теплоносія, продукту, теплоакumulюючого матеріалу, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{тн}$ ,  $c_{ф.}$ ,  $c_{та}$  – питома теплоємність теплоносія, продукту, теп-

лоакумулюючого матеріалу кДж/(кг·К);  $\rho_m$  – середня густина потоку вологи, кг/м<sup>2</sup>·с;  $Q_n$  – середня питома теплота пароутворення вологи, кДж/(кг·вл·°С);  $m_f$  – маса вологих фруктів до сушіння, кг;  $V_{та}$  – об'єм теплового акумулятора, м<sup>3</sup>;  $T_{ф1}, T_{ф2}$  – температура продуктів, °С;  $T_{та1}, T_{та2}$  – температура теплового акумулятора, °С;  $T_{тн1}, T_{тн2}, T_{вихтн}$  – температура теплоносія, °С;  $T_{нс}$  – температура навколишнього середовища, °С;  $\tau_{нагр}$  – тривалість періоду нагріву фруктів, год;  $K_{цир}$  – коефіцієнт циркуляції повітря;  $S_{гс}$  – площа геліосушарки, м<sup>2</sup>;  $S_{реш}$  – площа решет, м<sup>2</sup>;  $T_{кам}$  – середня температура в сушильній камері за період сушіння, °С;  $K$  – коефіцієнт теплопередачі через корпус геліосушарки, Вт/(м<sup>2</sup>·°С).

Підставляючи експериментальні дані в формули (1) (10), розраховали показники енергетичного балансу геліосушарки, що наведені в таблиці.

Таким чином, структура розподілу сонячної енергії, що надходить на повітряний колектор, свідчить, що геліосушарка за один цикл сушіння використовувала енергію сонячного випромінювання в межах від 100 до 800 Вт/м<sup>2</sup>, перетворивши її в теплову (1995,2 кДж), яку поглинув теплоносій (1656,9 кДж) і затратив на нагрівання продукту (712,3 кДж) та випаровування вологи 710,7 кДж, а частину – тепловий акумулятор (338,7 кДж).

Енергетичний ККД геліосушарки з використанням плоского дзеркального концентратора та теплового акумулятора – це відношення кількості теплоти, корисно витраченої на випаровування вологи з фруктів, до кількості теплоти, що відводиться від теплового акумулятора і кількості використаної енергії сонячного випромінювання.

Без теплового акумулятора

$$\eta_{б.та.} = \frac{Q_{вип.} + Q_{від.тн.}}{Q_{кон.} + Q_{нсп.}} \cdot 100\%, \quad (11)$$

$$\eta_{б.та.} = \frac{1215,1 + 312,3}{2893,5 + 885,6} \cdot 100\% = 40,2\% ; \quad (11)$$

Із використанням

$$\eta_{з.та.} = \frac{Q_{вип.} + Q_{та.} + Q_{від.тн.}}{Q_{кон.} + Q_{нсп.}} \cdot 100\% . \quad (12)$$

$$\eta_{з.та.} = \frac{1215,6 + 615,5 + 312,3}{2893,5 + 885,6} \cdot 100\% = 56,7\% .$$

**Тепловий (енергетичний) баланс геліосушарки**

Складові	Значення складових балансу, кДж		Відношення $Q/Q_{заг} \cdot 100\%$	
	денний час	нічний час	денний час	нічний час
<b>Надходження теплоти</b>				
Енергія сонячного випромінення, яку поглинає абсорбер	578,2	–	36,4	–
Теплота, що виробляє абсорбер	995,2	–	67,3	–
Теплота, що надходить у сушильну камеру від теплоносія, нагрітого в повітряному колекторі і тепловим акумулятором	1656,9	1236,5	100	86,3
Теплота, що підводиться тепловим акумулятором	328,7	–	20,5	–
Теплота, відведена від теплового акумулятора		286,7		35,9
<b>Втрата теплоти</b>				
Теплота, витрачена на нагрівання решет	1628,3	1234,7	83,2	100
Теплота, затрачена на нагрів продукту	712,3	502,7	0,7	2,9
Теплота, затрачена на випаровування вологи	710,7	507,2	36,4	31,2
Теплота, видалена відпрацьованим теплоносієм	179,3	132,9	24,9	34,7
Втрати теплоти в навколишнє середовище	41,26	24,5	12,3	12,4

Отже, енергетичний ККД геліосушарки без використання теплового акумулятора  $\eta_{б.ма.}=40,1\%$ ; з їх застосуванням  $\eta_{з.ма.}=56,7\%$ . Під час використання теплового акумулятора енергетичний ККД геліосушарки зростає в 1,2 рази.

**Висновки.** Викладено методику розрахунку складових енергетичного балансу і енергетичного ККД, а також проаналізовано енергетичну ефективність геліосушарки з використанням плоского дзеркального концентратора та теплового акумулятора.

Геліосушарка за один цикл сушіння поглинала енергію сонячного випромінювання в межах від 100 до 800 Вт/м<sup>2</sup>, перетворивши її в теплову (1995,2 кДж), яку поглинув теплоносій (1656,9 кДж) і затратив на нагрівання продукту (712,3 кДж) та випаровування вологи (710,7) кДж, а частину – тепловий акумулятор (338,7 кДж).

Енергетичний ККД геліосушарки без теплового акумулятора  $\eta_{б.ма.}=40,1\%$ ; з ними  $\eta_{з.ма.}=56,7\%$ . Під час використання теплового акумулятора енергетичний ККД геліосушарки зростає в 1,2 рази.

#### Бібліографічний список

1. Гальчак В. П. Дослідження параметрів та режимів роботи повітряно-гравійного акумулятора в конвективній геліосушарці / В. П. Гальчак, С. В. Коробка // Вісник Львівськ. НАУ : Агроінженерні дослідження. – Львів : Львівськ. НАУ. – 2014. – № 15. – С. 326–336.
2. Коробка С. В. Исследование параметров и режимов работы конвективной гелиосушилки фруктов / С. В. Коробка // MOTROL Commission of motorization and energetics in agriculture. – 2013. – 15, № 4. – С. 134–139.
3. Коробка С. В. Оцінка сучасного стану використання геліосушарок в АПК / С. В. Коробка // Теоретичні основи і практичні аспекти використання ресурсощадних технологій для підвищення ефективності агропромислового виробництва і розвитку сільських територій: Тези Міжнар. наук.-практ. форуму. – Львів: Львівськ. НАУ, 2013. – С. 187–193.
4. Коробко Б. В. Энергетика та сталий розвиток: Інформаційний посіб. для українських ЗМІ./ Б. В. Коробко. /–К.: Вища школа, 2006. — С. 44.
5. Goncharova S. V. Mathematical modeling of cross-flow belt dryer for polymer drying. Drying'98 / S. V. Goncharova, V. T. Chelnokov // Proc. 11<sup>th</sup> Int. Drying Symp. (IDS'98), Halkidiki, Greece, August 19–22. – 1998. – Vol. A. – P. 407–413.
6. Шаргут Я. В. Эксергия / Я. В. Шаргут, Р. И. Петель. – М. : Энергия, 1968. – 278 с.
7. Пат. 97139 У Україна, МПК А23L3/00. Геліосушарка з тепловим акумулятором / С. В. Коробка. Опубл. 25.02.2015; Бюл. № 4.

#### **А. Татомир, С. Коробка Енергетична ефективність геліосушарки.**

Подано методику розрахунку складових енергетичного балансу геліосушарки і енергетичного ККД. Енергетичний аналіз ефективності геліосушарки базується на визначенні кількості отриманої енергії сонячного випромінювання, яку поглинув абсорбер та перетворив на теплову енергію, до енергетичних затрат теплової енергії, корисно затраченої на нагрівання теплоносія та фруктів, що знаходяться на решетах в сушильній камері. Енергетичний ККД геліосушарки – відношення кількості теплоти, корисно витраченої на випаровування вологи з фруктів, і кількості використаної енергії сонячного випромінювання.

**Ключові слова:** тепловий баланс, геліосушарка, геліосушіння, сонячна енергія.

**A. Tatomyr, S. Korobka. Evaluation of energy efficiency solar dryer.**

The method of calculating the components of energy balance solar dryer and energy efficiency solar dryer. Energy efficiency analysis solar dryer based on determining the amount of solar radiation received which absorbed absorber and converted into heat energy. Energy costs to useful thermal energy spent on heating the coolant and fruits that are on sieves in a drying chamber. Energy efficiency solar dryer is the ratio of heat, useful expended in the evaporation of moisture from fruit, and used the number of solar energy.

**Keywords:** heat balance, solar dryer, solar drying, solar energy.

**А. Татомыр, С. Коробка. Энергетическая эффективность гелиосушилки.**

Приведена методика расчета составляющих энергетического баланса гелиосушилки и энергетического КПД гелиосушилки. Энергетический анализ эффективности гелиосушилки базируется на определении количества полученной энергии солнечного излучения, поглощенной абсорбером и превратившееся в тепловую энергию. Энергетических затрат тепловой энергии полезно затраченного на нагрев теплоносителя и фруктов, находящихся на решетках в сушильной камере. Энергетического КПД гелиосушилки – отношение количества теплоты, полезно затраченной на испарение влаги из фруктов, и количествам использованной энергии солнечного излучения.

**Ключевые слова:** тепловой баланс, гелиосушилка, гелиосушка, солнечная энергия.