

УДК 664.047:664.012.3.621

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ СУШАРКИ, РОЗРОБЛЕНІ В ІНСТИТУТІ
ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ НАН УКРАЇНИ

Снєжкін Ю.Ф.*, академік НАН України

*доктор техн.наук., професор, директор Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, м. Київ, 03057, email: ittf_ntps@ukr.net, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>

<https://doi.org/10.31472/tpe.4.2025.1>

Виконано опис конструкцій сушильних установок, розроблених в ІТТФ НАН України. Установки забезпечують можливість зневоднення різних видів матеріалів і сільгоспсировини. В статті представлені ефективні розпилюючі, тунельні, камерні, стрічкові, вакуумні, роторно-дискові, трубчаті, барабанні, шнекові сушарки, а також сушильні установки, які для нагріву теплоносія використовують альтернативні джерела енергії (теплові насоси, геотермальну і сонячну енергію). Наведені технічні характеристики сушарок і особливості їх застосування.

Бібл. 14, табл. 1, рис. 15.

Ключові слова: сушильні установки, альтернативні джерела енергії, енергоефективність, теплоносії, тепловий насос, теплогенератор, калорифер.

Актуальність для України обумовлена проблемою більш ефективного зневоднення вологих матеріалів в різних галузях промисловості. На сушіння в світі витрачається 10 – 12 % всієї енергії. В Україні на зневоднення різних матеріалів витрачається теж 10 % відсотків кінцевого споживання енергоресурсів промисловістю, населенням, транспортом, сектором послуг та сільським господарством. При цьому тільки в промисловості на процеси сушіння витрачається біля 28 % всієї енергії, а в оточуюче середовище надходить біля 18 млн тонн водяної пари, що дорівнює 7 % викидів в Україні парникових газів в CO_2 -еквіваленті [1].

Мета роботи: більш широке використання в промисловості та сільському господарстві, розроблених науковцями ІТТФ НАН України, енергоефективних сушарок різних типів та конструкцій. Ознайомлення широкого кола спеціалістів з конструктивними особливостями цих сушарок, їх техніко-економічними характеристиками. Матеріалами для роботи слугували наявні в ІТТФ архівні матеріали: креслення сушарок, описи їх роботи, техніко-економічні характеристики та показники при напрацюваннях дослідних та виробничих партій висушених продуктів та матеріалів. Використано аналітичні і практичні методи, порівняльно-аналітичний та системний підходи.

Виклад основного матеріалу: В Інституті технічної теплофізики НАН України (ІТТФ) на основі багаторічних аналітичних та експериментальних досліджень розроблені основи теплофізичних процесів тепловологопереносу при зневодненні різних матеріалів. Розвинуті

концепція і методологічні принципи аналітичного і експериментального дослідження процесів тепловологопереносу в складних аеродинамічних і температурно-вологісних умовах сушильних камер. Розроблені нові методи управління кінетичними характеристиками системи висушуючий матеріал-парагозове середовище.

В результаті створено понад 140 нових конструкцій сушильних установок і в тому числі біля 60 сушарок реконструйовано та модернізовано. Створено 10 типів обладнання, яке використовують при роботі сушарок (теплогенератори, циклони, озонатори та інше). Вся конструкторська документація на це обладнання зберігається в архіві ІТТФ. Більшість розроблених установок захищено авторськими свідоцтвами і патентами, а значна їх частина впроваджена в виробництво. Загальна кількість впроваджених в виробництво сушарок – понад 300.

Технічні способи реалізації процесів сушіння дуже різні і їх доцільно розглядати в ув'язці з конструкційними особливостями сушарок. Найбільше використання в сушильній техніці отримав конвективний метод сушіння, при якому використання нагрітого повітря в якості сушильного агенту, який одночасно є тепловіддачем і волопоглиначем, обумовлює порівняну простоту конструкцій конвективних сушарок.

Розпилювальні сушильні установки

Одним із сучасних способів конвективного сушіння матеріалів у рідкому стані є сушіння розпилюванням. Цей спосіб широко застосовується для зневоднення істинних і колоїдних розчинів, суспензій, емульсій,

пульпи та «рухомих паст» в хімічній, харчовій, фармацевтичній, мікробіологічній та інших галузях промисловості.

В ІТТФ вперше встановлено, що внутрішні процеси переносу теплоти і вологи, які протікають в окремій частині дисперсної системи, мають визначальний вплив на тривалість зневоднення і кінцеві фізико-хімічні характеристики матеріалу, що зневоднюється. Результати цих досліджень складають наукову основу для створення та удосконалення процесів розпилювального зневоднення на основі встановлених теплофізичних особливостей, що дозволило створити 19 енергоефективних сушарок, які широко впроваджені в фармацевтичній, мікробіологічній, хімічній і харчовій галузях промисловості [2].

Випарювально-сушильний агрегат АВС-200

Призначений для одержання порошкових форм різних особливо термочутливих медичних препаратів, таких як антибіотики, штучних замінників крові та інших засобів, виробництва яких вимагають стерильних умов. Агрегат впроваджено в понад 100 підприємств.

Випарювально-сушильний агрегат заснований на двостадійному зневодненні методом розпилювання високовологих термолабільних продуктів в окремих апа-

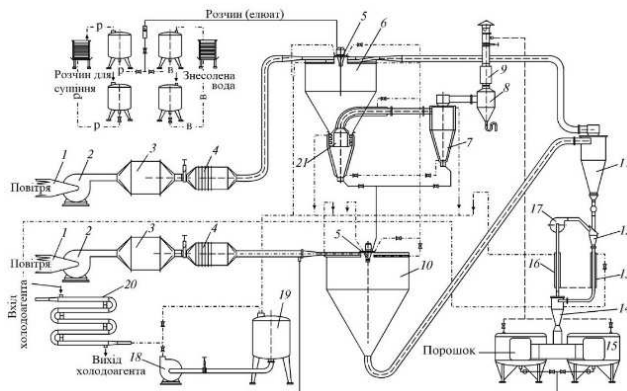
ратах (рис.1, поз.6,10), де випарювання основної маси вологи відбувається при температурі вологого термометру (40 - 55 °С), а завдяки короткочасному перебуванню в зоні термічної дії створюються умови для збереження біологічно активних речовин вихідного продукту.

Тунельні сушарки

Одним з існуючих способів конвективного сушіння твердих матеріалів є їх зневоднення в тунельних сушарках. Твердий матеріал може бути різноманітної форми, структури і різних розмірів. Теплоносій (нагріте повітря, продукти спалювання палива, газоповітряна суміш) обтікає матеріал в різних умовах і є одночасно теплопередатчиком та вологопоглиначем.

В тунельних сушарках ІТТФ НАН України використані розроблені в Інституті високотемпературні режими зневоднення

Суттєвий ефект пришвидшення зневоднення відбувається при одночасно значним підвищенні температури теплоносія в 1,5 – 3 рази і його вологовмісту в 2 – 10 разів. Це дозволяє суттєво підвищити температуру матеріалу в процесі сушіння, пришвидшити процес переносу вологи в ньому, відділити або зовсім уникнути (особливо для тонких виробів) заглиблення зони випарювання. Використання високотемпературного висо-



Показники	
Продуктивність по випареній волозі, кг/год:	
випарювальної камери	140
сушильної камери	70
агрегату в цілому	210
Температура теплоносія на вході, °С:	
у випарювальну камеру	150-200
в сушильну камеру	150-200
Температура теплоносія на виході, °С:	
з випарювальної камери	40-50
з сушильної камери	85-95
Споживана потужність, кВт	200
Габаритні розміри (висота x ширина x довжина), м	9,0 x 6,0 x 12,5
Маса (матеріалоемність) агрегату, кг	13000

Рис. 1. Принципова схема двостадійного випарювально-сушильного агрегату АВС-200 для

зневоднення розчинів антибіотиків та біологічно активних препаратів:

1 – фільтр; 2, 17, 18 – вентилятори; 3 – калорифер паровий; 4 – калорифер електричний;

5 – відцентровий дисковий розпилювач; 6 – розпилювальна камера для концентрування (випарювання);

7 – циклон «вологий»; 8 – конденсатор-відвідник; 9 – фільтр спеціальний;

10 – розпилювальна сушильна камера; 11 – циклон; 12 – ежекторний затвор;

13, 16, 20 – теплообмінники; 14 – циклон вивантажувальний; 15 – стерильна камера для

висушеного порошку; 19 – ємність для охолодження води; 21 – спеціальний каплевловлювач

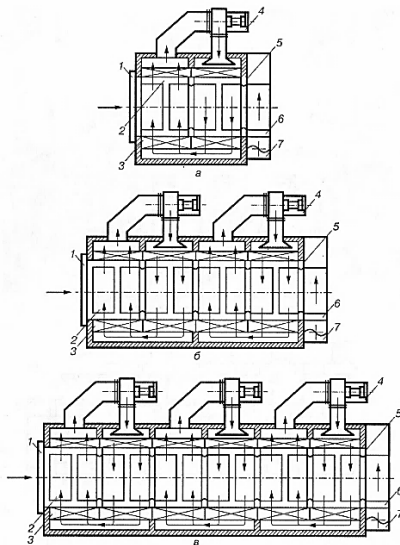
коволого теплоносія в сушарках дозволило в кілька разів пришвидшити зневоднення ряду будівельних, рослинних, тваринних матеріалів, та інших матеріалів [3]. Було розроблено 23 тунельні установки, які широко впроваджені в Україні і за кордоном.

Тунельні зонні сушильні установки на парових калориферах СП-1, СП-2, СП-3 і теплогенераторах

Сушарки СП-1, СП-2, СП-3 призначені для зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів (деревина, фрукти та їх вичавки, овочі, ягоди, пряно-ароматичні трави, м'ясо, риба та інше).

Прийнята схема руху теплоносія в зонах сушильної установки з частковим викидом відпрацьованого теплоносія і підсмоктуванням свіжого повітря, а також його постійний підігрів в калориферах дозволяє створювати та підтримувати розроблені тепловологісні режими в зонах сушарки відповідно до виду матеріалу що зневоднюється. Питомі витрати на 1 кг випареної вологи нижчі ніж в аналогічних тунельних сушарках [4,5].

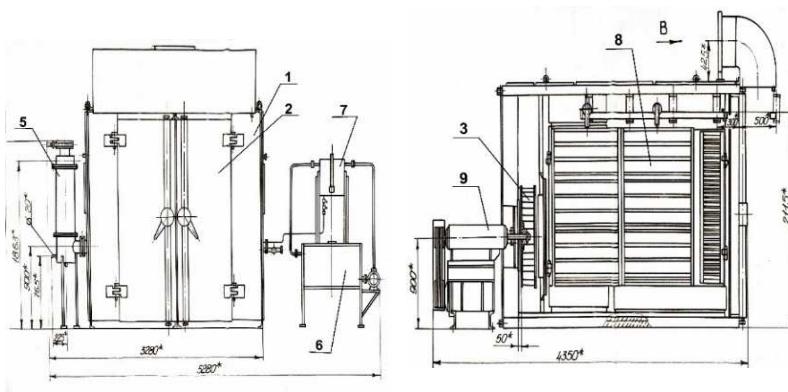
Тунельна сушарка СП-3 у 1982 році була успішно зда- на Всесоюзній міжвідомчій комісії Укр-консервпрому СРСР при зневодненні вичавок насінневих фруктів до



Показники	СП-1	СП-2	СП-3
Температура сушіння, °С	30-140	30-140	30-140
Продуктивність по випареній волозі, кг/год при зневодненні до $W \leq 6\%$	350-370	740-770	1150-1200
Випаровування вологи з одиниці поверхні, кг/м ²	1,4-1,48	1,48-1,54	1,54-1,6
Випаровування вологи з одиниці об'єму, кг/м ³	19,7-20,9	20,9-21,5	21,5-22,6
Коефіцієнт використання об'єму сушильної камери	0,24	0,24	0,24
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, кДж/кг	3768-4187	3768-4187	3768-4187
Габарити сушарки, (довжина x висота x ширина) м:	15 x 3 x 10	17 x 3 x 10	22 x 3 x 10
Матеріалоемність, т	16	24	32

Рис. 2. Схеми зонних парових тунельних сушарок (а – однозонна; б – двузонна; в – тризонна):

1 – ворота сушарки; 2 – вагонетка; 3 – калорифер; 4 – центробіжний вентилятор; 5 – ущільнювач; 6 – зона охолодження; 7 – осьовий вентилятор



Показники	
Продуктивність, кг/год	200-400
Температура в камері, °С	120-180
Час обробки, год (не більш)	1,0
Встановлена потужність, кВт: електродвигуна електронагрівачів	30 120
Габаритні розміри (без короба відсмоктування та копильної рідини) довжина x ширина x висота, м:	4,35 x 3,28 x 2,51
Маса (без клітей), т	4,5

Рис. 3. Креслення установки копчення риби:

1 – камера; 2 – двері; 3 – аеродинамічне колесо; 4 – електронагрівач; 5 – конденсатор; 6 – бак копильної рідини; 7 – мірний бачок; 8 – кліть з піддонами; 9 – привід аеродинамічного колеса

низької кінцевої вологості і рекомендована для серійного виробництва, а також рекомендована до атестації на вищу категорію якості.

Камерні сушарки

Камерні сушарки є конвективними апаратами періодичної дії, які, в основному, працюють за атмосферного тиску. Використовуються головним чином в невеликих виробництвах для зневоднення різноманітних продуктів і матеріалів. Матеріал в цих сушарках сушиться на лотках (деках, піддонах), встановлених на стелажах, або вагонетках, які знаходяться в сушильній камері. Сушильну камеру завантажують і вивантажують матеріалом періодично. В цих сушарках матеріал під час зневоднення знаходиться в стані покою.

В інституті розроблено 12 камерних сушарок, які використовуються в харчовій, легкій та промисловості будівельних матеріалів. Всі впроваджені сушарки підтвердили високу ефективність при експлуатації.

Установка бездимного копчення риби

Установка призначена для процесу гарячого бездимного копчення в пару копильних препаратів за рахунок нагріву риби високотемпературною пароповітряною сумішшю, рециркулюючою в замкнутому аеродинамічному контурі. Також вона використовується для термообробки рибних виробів.

Однострічкові та багатострічкові сушарки

В однострічкових та багатострічкових сушарках зневоднення матеріалів здійснюється безперервно за атмосферного тиску. В камері сушарки шар матеріалу що зневоднюється рухається на нескінченній стрічці, яку натягнуто між ведучим і відомим барабанами. Вологий матеріал подається на один кінець стрічки, а зневоднений відводиться з іншого кінця. Матеріал розкладається

тонким шаром на перфорованих листах, ситах або стрічках, які безперервно рухаються.

В інституті розроблено 8 однострічкових сушарок, які використовуються в харчовій промисловості для зневоднення фруктово-овочевої сировини та для отримання порошку із жому в сільському господарстві для сушіння стеблових матеріалів, в легкій промисловості для сушіння-зрілення тканин та візерунків на них, в промисловості будівельних матеріалів для зневоднення теплозвукоізоляційних плит та створена сушарка для отримання рекомбінованого тютюну.

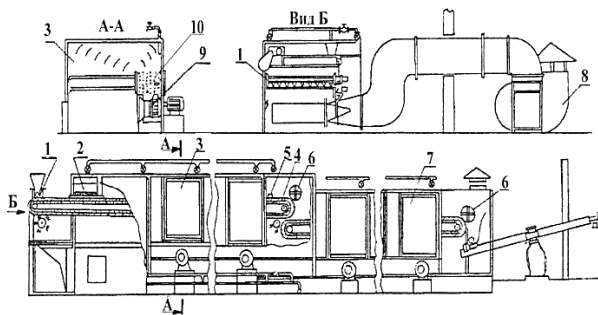
Розроблено 7 багатострічкових сушарок, які використовуються в харчовій промисловості для зневоднення фруктово-овочевої сировини та макаронних виробів, та в легкій – для сушіння коконів тутового шовкопряда. Розроблені сушарки впроваджені і підтвердили високу ефективність при експлуатації

Двосекційна багатозонна стрічкова сушарка

Сушарка призначена для зневоднення колоїдних капілярно-пористих матеріалів (фрукти, овочі, пряно-ароматичні трави та інше).

На рис. 4 надана схема агрегату гіротермічної обробки, сушіння й охолодження (АГСО), що виконана у вигляді двосекційної багатозонної стрічкової сушильної установки у якій чисте повітря нагрівається у парових калориферах.

Особливістю функціонування цієї сушарки є поєднання кількох технологічних процесів в одній установці – це гіротермічна обробка сировини, зневоднення та його детермопластифікація висушеного до низької вологості матеріалу і низькі витрати енергії на 1 кг випареної вологи [5].



Показники	
Температура сушіння, °С	30-140
Потужність по сировині, т/год	1,0-1,2
Потужність по сухому продукту (при кінцевій вологості W ≤ 6%)	0,16-0,20
Витрати пару, т/год	3,0-4,0
Витрати теплоти на 1 кг випареної вологи кДж/кг	3400-3800
Габарити сушарки (довжина x ширина x висота), м	45,0 x 2,5 x 2,2
Матеріалоємність, т	60,0

Рис. 4. Схема стрічкової сушильної установки АГСО:

- 1 – шнек-розкладник; 2 – зона гіротермічної обробки; 3 – зона сушіння; 4 – сушильна стрічка; 5 – розпушувач; 6 – скидач; 7 – зона охолодження; 8 – викидний вентилятор; 9 – вентилятор сушильної зони; 10 – паровий калорифер

Сушарка АГСО була успішно здана приймальній комісії Держагропрому України у 1987 році при зневодненні фруктів до низької кінцевої вологості при виробництві з них харчових порошків і рекомендована в серійне виробництво.

Конвеєрна сушарка на теплогенераторах СКО-90

Сушарка призначена для зневоднення овочів, фруктів та іншої рослинної сировини, що дозволяє її пересипання з одної конвеєрної стрічки на іншу.

Сушарка має п'ять безмежних стрічкових конвеєрів здвигнутих один відносно іншого по довжині сушильної камери (поз.4) і, які приводяться до руху приводом (поз.7, рис.5).

Сушарка працює на підприємствах де немає промислового пару, теплогенератор працює на дизельному, пінному паливі або газу; між продуктами спалювання палива та теплоносієм нема контакту [4,5].

Сушарка СКО-90 успішно здана Міжвідомчий приймальній комісії у 1990 році при зневодненні насінневих фруктів і винограду до рівноважної вологості і рекомендована в серійне виробництво, а також рекомендована к атестації на вищу категорії якості.

Вакуумні сушарки

Вакуум сушінню піддають матеріал в тому випадку, коли контакт з киснем повітря і нагрів до високих температур може призвести до погіршення його якості. Пари, які виходять з матеріалу шкідливі або мають цінність і повинні бути уловлені (наприклад, пара спирту).

В середнє і глибоковакуумних сушарках волога видаляється під тиском нижче трійної точки (для водяної пари 0,61 кПа при температурі біля 0°C). В цих умовах в матеріалі відбувається сублімація (возгонка) льоду.

В Інституті створені абсорбційні установки для сублімаційного сушіння, які мають менші енерговитрати в порівнянні з існуючими сублімаційними сушарками за рахунок значно менших витрат електроенергії для її роботи. Також розроблена вакуум сушарка, яка працює при неглибокому вакуумі з паровими калориферами.

Розроблені вакуум сушарки використовується в фармацевтичній і хімічній промисловості для зневоднення термолабільних матеріалів. Впроваджені сушарки підтвердили високу ефективність при експлуатації.

Загалом було розроблено 6 вакуум-сушарок.

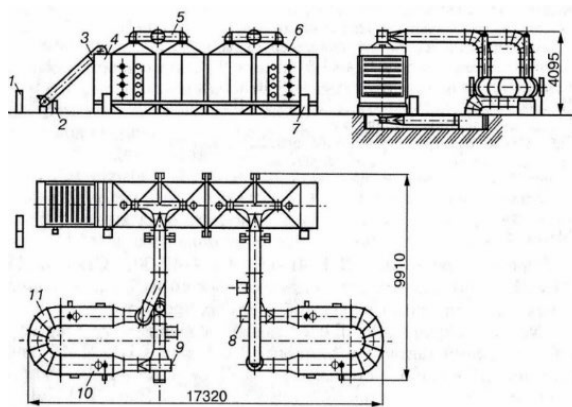
Абсорбційна установка для сублімаційного сушіння з двома теплообмінниками-генераторами

Сушарка призначена для поглинання водяних парів при сублімаційному сушінні термолабільних матеріалів.

Особливістю функціонування сушарки є низькі витрати теплоти на роботу абсорбційної установки за рахунок того, що пари холодоагенту, які видалені з розчину першої ступені кип'ятильника використовуються для кінцевого випарювання розчину в його другій ступені.

Роторно-дисківі або білові сушарки

Роторно-дисківа або білова сушарка представляє із себе горизонтальну установку з проходженням через неї нагрітого теплоносія, що забезпечує зневоднення рідких та пастоподібних матеріалів. Ефективність зневоднення матеріалу основана на теплообміні між тонким шаром матеріалу, що знаходиться на поверхні диску і теплоносієм, який обдуває ці диски з матеріалом. Конструкція дисків, які закріплені на роторі сушарки і на яких знаходиться тонкий шар матеріалу при контакті з нагрітим теплоносієм забезпечує високу ступінь випаровування вологи з матеріалу. Матеріал що



Показники	
Продуктивність по випареній волозі, кг/год	630
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волозі кДж/ кг,	5577
Встановлена потужність електродвигунів, кВт	41,2
Кількість теплогенераторів ТГ-2,5А	4
Кількість вентиляторів у14-46-8	2
Робоча площа конвеєрних стрічок, м ²	90
Габарити сушарки (довжина х ширина х висота), мм:	17320 х 9910 х 4095
Матеріалоемність, кг	13700

Рис. 5. Сушарка СКО-90 на теплогенераторах:

1 – щит управління; 2 – привідна станція; 3 – загрузочний конвеєр; 4 – сушильна камера;

5 – колектор; 6 – витяжний короб; 7 – привод стрічок; 8, 9 – вентилятори;

10 – теплогенератор; 11 – повітропровід

зневоднюється безперервно подається на вхід сушарки, інтенсивно висушується на дисках і спеціальними скребками видаляється з них. Роторно-білові сушарки застосовують для зневоднення, перш за все, матеріалів, які мають підвищену адгезію.

Створені та впроваджені в Інституті роторно-дисккові сушарки для зневоднення кислих розчинів, морквяного коагулянту та отримання дистильованої рідини на содових заводах та глиняного порошку підтвердили високу

ефективність і надійність при експлуатації. Загалом було розроблено 7 роторно-дисккових або білових сушарок.

Роторно-дисква сушарка для зневоднення кислих розчинів

Сушарка призначена для зневоднення кислого розчину для вилучення сульфату натрію з відпрацьованих кислих розчинів, що дозволяє використати його, як товарний продукт при спеціальній обробці та повернення сірчаної кислоти в існуючий технологічний процес.

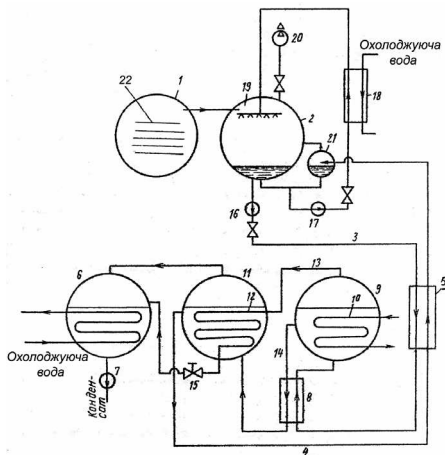
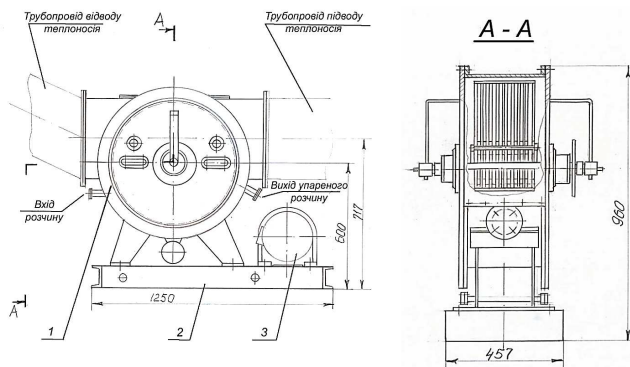


Рис. 6. Схема абсорбційної установки з двома теплообмінниками-регенераторами:
 1 – сублиматор; 2 – абсорбер; 3, 4 – лінії слабого і міцного розчинів; 5, 8 – кип’ятильники-регенератори; 6 – конденсатор; 7, 16 – насоси, 9, 11 – перша і друга ступені кип’ятильника; 10, 12 – гріючі поверхні; 13, 14 – трубопроводи; 15 – регулюючий вентиль; 18 – охолоджувач; 19 – зрошувач; 20 – вакуум-насос; 21 – змішувач; 22 – матеріал

Показники	
Продуктивність по випареній вологі, кг/год	80 – 90
Температура теплоносія, °С	8 – 10
Максимальна швидкість сушіння, %/хв.	7 – 13
Тиск в сублиматорі, кПа	0,27 – 0,31



Показники	
Продуктивність, кг вологи/год	80-100
Ступінь упарювання, %	10-32
Температура теплоносія, °С:	
на вході	400-700
на виході	200-220
Температура розчину, °С:	
на вході	90
на виході	75
Поверхня тепломасообміну, м ²	75
Число дисків, шт.	21
Число обертання дисків, об/год	5-15
Габарити (довжина x ширина x висота), м	1,25 x 0,69 x 0,96
Маса, кг	550

Рис. 7. Схема роторно-дисквої сушарки:
 1 – корпус сушарки; 2 – рама; 3 – мотор-редуктор; 4 – патрубок підводу розчину; 5 – горловина входу теплоносія; 6 – горловина виходу теплоносія; 7 – патрубок відводу розчину; 8 – диски.
 Сушарка має велику поверхню тепло-масообміну в одиниці об’єму, а спосіб упарювання розчину в плівці є найбільш ефективний в порівнянні з іншими способами

Трубчаті сушарки

Дослідження, проведенні в Інституті, показали, що теплова обробка окремих елементів матеріалу (ниток) замість обробки цього матеріалу по всій його масі (куличі, бобіни) дозволяє інтенсифікувати процес в сотні і тисячі разів, це відбувається за рахунок збільшення поверхні теплообміну і його інтенсивності, яка властива тілам малих розмірів. Така особливість теплообміну дозволила створити поточні технологічні лінії, агреговане обладнання з проміжною тепловою обробкою одиначної нитки в процесі її руху. [7].

Розроблені в Інституті горизонтальні і вертикальні трубчаті сушарки використовуються на підприємствах по виготовленню штучних і шовкових ниток в текстильній і хімічній галузях промисловості. Всі впроваджені сушарки підтвердили високу ефективність при експлуатації.

Швидкісна сушарка для зневоднення одиначних ниток

Сушарка призначена для швидкісного конвективно-зневоднення одиначної штучної нитки.

Нитка з нешліхтувального навою (поз. 5. рис.8) проходить ділянку шліхтовки (6) і надходить в сушильну камеру (3). Зневоднена до необхідної кінцевої вологості нитка (4) намотується на ткацький навої (1).

Використання швидкісної сушарки дозволило в 2 – 3 рази збільшити роботу шліхтувальної машини при збереженні високої якості нитки за рахунок відсутності перегріву та рівномірної усадки нитки.

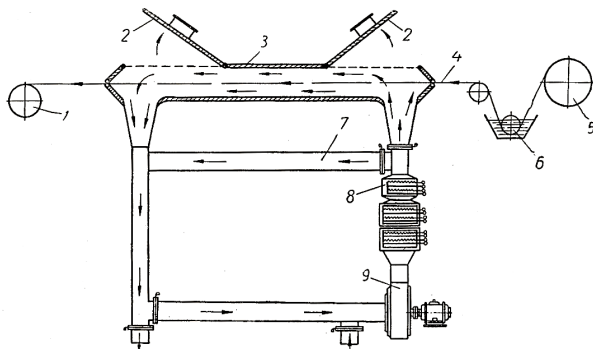


Рис. 8. Схема швидкісної сушарки:

1 – ткацький навої; 2 – верхня частина сушильної камери; 3 – сушильна камера; 4 – нитка;
5 – нешліхтувальний навої; 6 – ділянка шліхтовки; 7 – відвідний повітропровід;
8 – повітронігрівач; 9 – вентилятор

Барабанні сушарки

Барабанні сушарки належать до конвективних установок із перемішуванням шару матеріалу під час зневоднення застосовуються для безперервного сушіння кускових, зернистих і сипучих матеріалів за атмосферного тиску.

Основним елементом барабанної сушарки є встановлений під невеликим кутом до горизонту циліндричний барабан, який спирається за допомогою бандажів на ролик. Барабан приводиться в обертання електродвигуном через зубчасту передачу і редуктор. Частота обертання барабана не перевищує $0,12 \text{ с}^{-1}$; положення в осьовому напрямі фіксується упорними роликами. Матеріал подається в барабан живильником.

Процес сушіння в барабанній сушарці відбувається при взаємодії сипучого фракційного матеріалу та газоподібного сушильного агента, в якості якого використовуються продукти згоряння палива в суміші з повітрям.

Барабанна сушарка для виробництва пресованого біопалива

Розроблена барабанна сушарка призначена для виробництва однокомпонентних та композитних брикетів або гранул біопалива.

Технологічна лінія включає барабанну сушарку (рис. 9, 10), яка має динамічне регулювання кута нахилу барабана, що забезпечує широкий діапазон регулювання, як продуктивності сушарки, так і питомих енергетичних витрат процесу зневоднення та забезпечує зни-

Показники	
Продуктивність сушарки по вологому матеріалу, кг/год	800-850
Параметри теплоносія:	
температура, °С	200-210
вологівміст, г/кг с.п.	100-110
швидкість, м/сек	6,0-6,5
швидкість руху нитки, м/хв	80
Габарити сушильної камери, м:	
короб	0,15-1,8
довжина	2,5
Вологість нитки, %:	
початкова	70-80
кінцева	14-15
Питомий витрат теплоти в сушарці, кКал/кг	800-850

ження енерговитрат на даній стадії до 24% в порівнянні з звичайною барабанною сушаркою [8]..

Температура сушильного агенту – 250-400 °С; видкість обертання сушильного барабану – 2 – 6 об/хв.; кут нахилу барабану, градуси β - $3 < \beta < 3$; питомі витрати теплоти - 4700 – 5200 кДж/кг вол.; продуктивність -2500-2800 кг/год; потужність твердопаливного генератора – 1,3 МВт.

Шнекові сушильні установки

Шнекова сушарка призначена для зневоднення сипучих матеріалів. Основною частиною сушарки є короб сферичної форми, в середині якого знаходиться шнековий транспортер закритого типу. Шнек обертається за допомогою електроприводу. З одного кінця сушарки розташовується завантажувальний устрій, з іншого вивантажувальний. Теплоносій може подаватись в шнекову сушарку прямою, або протитоком, в залежності від термолабільності матеріалу. Для термолабільних використовують прямоток, а для термічно стійких матеріалів протиток.

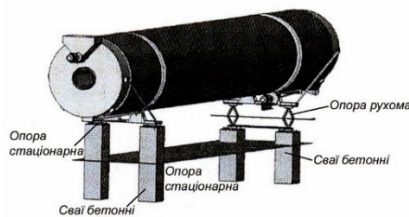


Рис. 9. Сушарка барабанна



Рис. 10. Фото сушарки

Сушарка для яєчної шкаралупи

Сушарка призначена для термообробки та сушіння відходів при використанні яєць в харчовій промисловості з метою їх використання в якості мінеральної добавки в корма для тварин. Сушарка має конвеєр гвинтовий, агрегат для нагріву теплоносія, привід електрообладнання та повітропроводи.

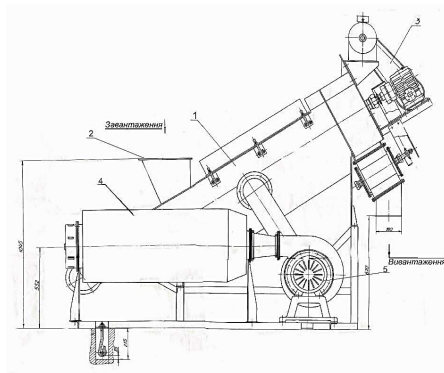
Особливістю функціонування сушарки є процес, коли в одному апараті відбувається зневоднення та стерилізація.

Сушарки на альтернативних джерелах енергії

Одним з найбільш перспективних напрямів розвитку світової енергетики є використання альтернативних джерел енергії, що знімає ряд проблем, які виникають у процесі функціонування традиційної енергетики, в тому числі щодо шкідливого впливу на навколишнє середовище.

Перспективним шляхом підвищення енергетичної ефективності сушильного обладнання є оснащення конвективних сушарок енергоефективними системами підготовки сушильного агенту з використанням альтернативних джерел енергії.

Показники	
Температура сушильного агенту, °С	250-400
Швидкість обертання сушильного барабану, об/хв.	2-6
Кут нахилу барабану, градуси β	$- 3 < \beta < 3$
Питомі витрати теплоти, кДж/кг вол.	4700 – 5200
Продуктивність, кг/год	2500 – 2800
Потужність твердопаливного генератора, МВт	1,3
Теплова потужність парогенератора, МВт	1,3



Показники	
Продуктивність сушарки, кг	28
Температура теплоносія, °С	110-120
Абсолютна вологість матеріалу, %:	
початкова	30-40
кінцева	2,0-4,0
Потужність електрокалорифера, кВт	20
Число обертів шнека, об/хв	1,0; 1,4; 2,2
Габаритні розміри (довжина x ширина x висота), м	2,1 x 0,65 x 2,0
Маса, кг	600

Рис. 11. Креслення сушарки:

1 – шнековий апарат; 2 – завантажувальний бункер; 3 – привід шнека; 4 – електрокалорифер

Було створено 15 сушарок на альтернативних джерелах енергії, ось деякі з них.

Чотирьохзонна тунельна сушарка на теплогенераторах і тепловому насосі

Сушарка призначена для зневоднення фруктів, овочів, ягід, пряно-ароматичних трав до низької вологості в умовах високого вологовмісту повітря.

Сушарка має чотири робочі зони (рис. 12), в кожній зоні підтримуються свої тепловологісні параметри сушильного агенту та зону охолодження (7). Перші три зони працюють за традиційною схемою з викидом вологого повітря та підживленням свіжого повітря з атмосфери. Четверта зона має замкнутий контур циркуляції з теплонасосною системою осушки повітря. В цій зоні підтримується температура біля 60°C і вологовміст сушильного агенту 20 г/кг сухого повітря.[9,10]. Принцип роботи сушарки загалом такий, як у тунельних сушарках на теплогенераторах марки СО.

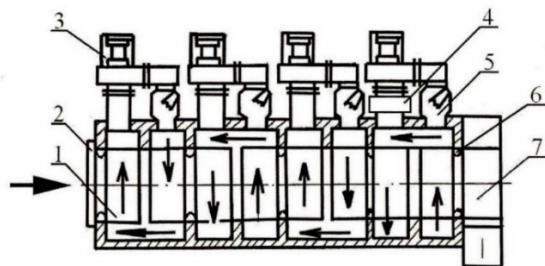


Рис. 12. Схема чотирьохзонної тунельної сушарки на теплогенераторах і тепловому насосі:
 1 – вагонетка; 2 – ворота сушарки; 3 – вентилятор; 4 – тепловий насос; 5 – теплогенератор;
 6 – ущільнювач; 7 – зона охолодження

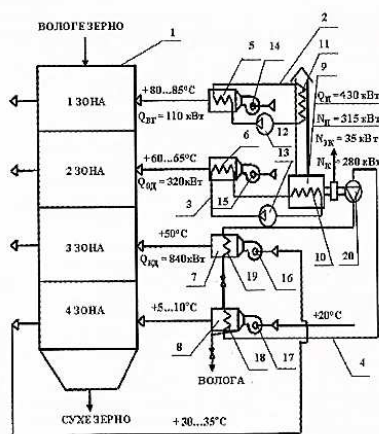
Дві сушарки впроваджені у В'єтнамі для сушіння ананасів і бананів при виробництві харчових порошків.

Теплонасосна зерносушарка на базі газового двигуна ДвГА

Зерносушарка призначена для зневоднення різних зернових чистим гарячим повітрям.

Теплонасосна зерносушарка безперервної дії на базі газового двигуна генератора ДвГА-315, або ДвГА-800 складається з шахти зерносушарки 1 (рис.13), яка має чотири відокремлених по ходу сушильного агенту зони (три – зневоднення і одна – охолодження), три контури циркуляції робочої речовини (2, 3, 4), теплообмінники (5, 6, 7, 8), тепловий двигун (9), теплоутилізатори (10, 11), циркуляційні насоси (12, 13), напірні вентилятори (14, 15, 16, 17) та тепловий насос, що складається з випарника (18), конденсатора (19), компресора (20) та терморегулюючого вентиля (21).

Показники	
Температура сушіння, °С	30-140
Продуктивність по випареній волозі, кг/год при зневодненні до $W \leq 6\%$	550-600
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волози, кДж/кг	4200-4400
Габарити сушарки (довжина x висота x ширина), м:	29 x 4 x 10



Показники	ДвГА-315	ДвГА-800
Температура сушіння, °С	50-85	50-85
Продуктивність видаленої волози, кг/год	945,5	3495,0
Продуктивність по сухому зерну, кг/год	13500	50000
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної волози, кДж/кг	3000,0	2200,0
Теплопродуктивність, кВт	1270,0	4180,0

Рис. 13. Схема зерносушарки на базі газового двигуна-генератора ДвГА-315:
 1 – сушильна шахта; 2, 3, 4 – контури циркуляції робочої речовини; 5, 6, 7, 8 – теплообмінники;
 9 – газовий двигун-генератор; 10, 11 – теплоутилізатори; 12, 13 – циркуляційні насоси;
 14, 15, 16, 17 – напірні вентилятори; 18 – випарник; 19 – конденсатор; 20 – компресор

Теплова енергія отримана від роботи газового дизель-генератора використовується для підігрівання зерна в першій зоні в кількості $Q_{вг} = 110$ кВт та для проведення сушіння зерна в другій зоні в кількості $Q_{од} = 320$ кВт. В третій зоні для продовження сушіння використовується теплота утворена в тепловому насосі, величина якої на конденсаторі складає $Q_{кд} = 840$ кВт. [5,11].

Особливістю функціонування сушарки є високий коефіцієнт використання палива 0,86-0,88, та низькі питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи які в 1,5-2,0 рази менші ніж в традиційних зерносушарках.

Геотермальні сушарки

В геотермаобних сушарках для сушіння використовують чисте повітря, яке може нагріватись в залежності від режиму сушіння та матеріалу, що зневоднюється, тальки в водяних калориферах (10) та безконтактно

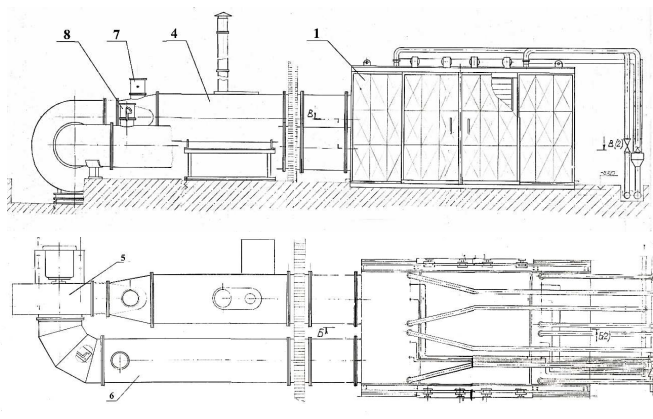
тільки в теплогенераторі (4), або і в водяних калориферах (10) і в теплогенераторі (4) одночасно. Водяні калорифери використовують геотермальну воду з температурою до 80 °С. Теплогенератор працює на газу, рідкому паливі або біопаливі, і може нагрівати теплоносії до 140 °С [12].

Геотермальні сушарки призначені для зневоднення фруктів, овочів, пряно-ароматичної сировини та інших термолабільних матеріалів.

Сонячна сушарка з тепловим акумулятором

Сушарка призначена для низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів рослинного та тваринного походження (фруктів, овочів, трав, м'яса, риби).

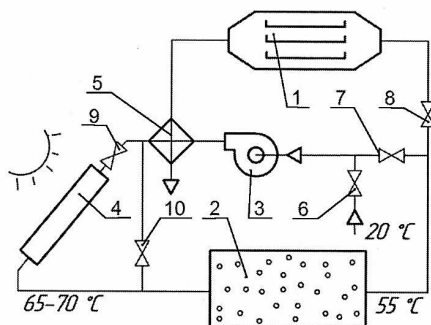
При необхідності установка може працювати в режимі акумулявання теплової енергії. У цьому режимі заслінки (7 і 9) відкриті, а заслінки (6, 8, 10) закриті.



Показники	
Продуктивність по випареній волозі до (при зневодненні до $W \leq 6\%$), кг/год	160 - 200
Температура теплоносія, °С	30-140
Температура води на вході в калорифер, °С	80
Питомі витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, кДж/кг	4400-4700
Витрати геотермальної води, м³/год	40-60
Витрати дизельного палива (при роботі ТГ), кг/год	28
Встановлена електропотужність, кВт:	15,0
Габарити сушарки (довжина x ширина x висота), м:	12,0 x 2,7 x 2,61
Маса, т	11,0

Рис. 14. Креслення геотермальної сушарки:

- 1 – сушарка; 2 – вагонетка; 3 – подача геотермальної води; 4 – теплогенератор; 5 – вентилятор; 6 – повітропровід; 7 – патрубок викиду теплоносія; 8 – патрубок всмоктування свіжого повітря; 9 – двері; 10 – водяні калорифери



Показники	
Температура сушіння, °С	40 – 55
Тривалість сушіння абрикос, год	43 – 48
Швидкість теплоносія в сушарці, м/с	0,5 – 1,0
Теплоакуюлюючий матеріал (органічні сполуки) з температурою плавлення, °С	32 – 85
З температурою кристалізації, °С	73 - 30

Рис. 15. Схема сонячної сушарки з тепловим акумулятором:

- 1 – сушильна камера; 2 – теплоакумулятор; 3 – вентилятор; 4 – геліонагрівач; 5 – рекуперативний теплообмінник; 6, 7, 8, 9, 10 – заслінки

Повітря циркулює через геліонагрівач (4) і теплоаккумулятор (2) по замкнутому контуру [13].

Особливості функціонування установки є скорочення тривалості сушіння в порівнянні з чисто сонячною сушаркою в 1,3 – 1,5 рази та отримання продукту високої якості [14].

Висновки:

Описані в статті сушарки створені для їх використання у восьми різних галузях промисловості (харчовій, хімічній, фармацевтичній, мікробіологічній, енергетичній, легкій, сільському господарстві і промисловості будівельних матеріалів). Найбільше застосування сушарки знайшли в сільському господарстві, в харчовій, хімічній, фармацевтичній промисловостях, а найчастіше промисловістю використовуються стрічкові, тунельні, камерні, розпилюючі, барабанні і роторно-дискові сушарки.

Всі впроваджені сушарки показали надійність при експлуатації та високі техніко-економічні показники.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Energy Consumption fyl Enviromentak Aspects of Drying Processes. Science and Innovation*, 2023, 19(2),44-55. <https://doi.org/10.15407/science.19.02.044>
2. *А.А. Долінський, К.Д.Малецька, Розпилююча сушарка*. Т.1 К.: Наукова думка 2011, 376 с. ISBN 978-360-175-5
3. *О.О. Кремньов, І.М. Пієвський. Тепломасообмінні процеси в виробництві гіпсових і гіпсобетонних матеріалів*. К.: Наукова думка 1989, 376 с. ISBN 5-12-000909.
4. *Ю.Ф. Снежкін, Л.А. Боряк, О.О. Хавін. Енергозберігаючі теплотехнології харчових порошків і вторинних сировинних ресурсів*. К.: Наукова думка.1983, 227 с. . ISBN966-00-0158-4.
5. *Ю.Ф.Снежкін, Т.А.Резакова. Стан та перспективи розвитку геотермальної енергетики України. Збірник праць «Проблеми екології та експлуатації об'єктів енергетики»*. К.:ІВЦ Алкон НАН України, 2022, 45-49 ISBN № 978-966-8449-71-0
6. *Снежкін Ю.Ф., Шанар Р.О. Енергоефективне обладнання для зневоднення термолабільних матеріалів. Теплофізика та теплоенергетика. 2020,42 (2), 5-17 <https://doi.org/10.3147/tpe.2/2020/>*

Таблиця. Галузі застосування сушарок

	Тип сушарки	Галузі								
		Енергетика	Сільське господарство	Харчова промисловість	Фармацевтична промисловість	Хімічна промисловість	Промисловість будівельних матеріалів	Легка промисловість	Мікробіологічна промисловість	Відходи виробництва
1	Розпилювальні		x	x	x	x	x		x	x
2	Тунельні		x	x		x	x			
3	Камерні	x	x	x		x	x	x		
4	Однострічкові	x	x	x			x	x		
5	Багатострічкові		x	x				x		
6	Вакуумні	x		x	x	x			x	
7	Роторно-дискові і білові	x	x	x	x	x	x			x
8	Трубчаті					x		x		
9	Барабанні	x	x		x	x	x			
10	Шнекові і карусельні		x	x		x				
11	Сушарки на відновлювальних джерелах енергії		x	x	x	x				

7. *О.О. Кремньов, В.Р. Боровский, А.А. Долінський.* Швидкісне сушіння. К.: Держ.видавництво технічної літератури, 1963 р. 382 с.
8. *Д.М.Корінчук, Н.М.Сорокова, В.Л.Дахненко.* Обґрунтування сушіння в технології виробництва висококалорійного палива. Енергоефективність процесів сушіння: тематичний збірник статей за ред. Ю.Ф.Снежкіна, Р.О.Шапар. Т.1 К.:ТОВ Про Формат, 2021, 137-140. ISBN 978-617-7894-25-3
9. *Снежкін Ю.Ф.* Енергоефективні теплотехнології та обладнання для виробництва теплоти з відновлюваних джерел енергії. Теплофізика та теплоенергетика, 2022, 47(4), 7-13 <https://doi.org/10.31472/ttpe.4/2022/>.
10. *Ю.Ф. Снежкін.* Енергоощадні теплонасосні технології для систем тепlopостачання житлово-комунального господарства і промисловості. Енергоефективність процесів сушіння: тематичний збірник статей за ред. Ю.Ф.Снежкіна, Р.О.Шапар. Т.1 К.:ТОВ Про Формат, 2021, 167-176.. ISBN 978-617-7894-28-4
11. *Ю.Ф. Снежкін, М.М. Уланов.* Виробництво та комплексне використання когенераційних установок в теплонасосних зерносушильних комплексах. Енергоефективність процесів сушіння. Т.2. К.ТОВ Про Формат 2021, 268 с. ISBN 978-617-7894-28-4.
12. *Ю.Ф. Снежкін, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврін, Р.О. Шапар, О.О.Хавін.* Комплексне використання геотермальної енергії в агропромисловому секторі. Енергоефективність процесів сушіння: тематичний збірник статей за ред. Ю.Ф.Снежкіна, Р.О.Шапар. Т.2, К.:ТОВ Про Формат, 2021, 185-189. ISBN 978-617-7894-28-4
13. *Ю.Ф. Снежкін, Д.М. Чалаєв, В.А. Михайлік, Н.О. Дабіжа, Т.В. Корінчевська.* Застосування акумулювання теплової енергії в системах сонячного сушіння. Енергоефективність процесів сушіння: тематичний збірник статей за ред. Ю.Ф.Снежкіна, Р.О.Шапар. Т.2, К.:ТОВ Про Формат, 2021, 190-194. ISBN 978-617-7894-28-4
14. *Т.В. Корінчевська* Перспективні методи акумулювання теплової енергії. Наукові праці ОНАХТ. 2010, вип. 37. С.236-241.

**ENERGY-EFFICIENT DRYERS DEVELOPED
AT THE INSTITUTE OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS OF NAS OF UKRAINE**

Sniezhkin Yu*.

*Academician of the National Academy of Sciences of Ukraine, Institute of Engineering Thermophysics of NAS of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, Ukraine, 03057, ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-9049-3392>, email: itf_ntps@ukr.net

<https://doi.org/10.31472/ttpe.4.2025.1>

Energy-efficient dryers of various types and designs, developed by scientists of the Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, are presented for familiarization with them by a wide range of specialists and their wider use in industry and agriculture. The materials for the work were archival materials available at the ITTF: drawings of the latest energy-efficient dryers and auxiliary heat technology equipment for the implementation of technological processes, descriptions of the equipment's operation, technical and economic characteristics and indicators during the operation of experimental and production batches of dried products and materials. Analytical and practical methods, comparative-analytical and systemic approaches were applied.

References 14, figures 15, table 1.

Key words: drying plants, alternative energy sources, energy efficiency, coolant, heat pump, heat generator, heater.

1. *Energy Consumption fyl Enviromentak Aspects of Drying Processes*. Science and Innovation, 2023, 19(2),44-55. <https://doi.org/10.15407/>, [Science] 19.02.044
2. *A.A. Dolinsky, K.D.Maletska* [Spray dryer]. V.1, Kyiv.: [Scientific opinion], 2011, 376 p. ISBN 978-360-175-5
3. *O.O. Kremnyov, I.M. Pievsky* [Heat and mass transfer processes in the production of gypsum and gypsum concrete materials]. K.: [Scientific opinion],1989, 376 p. ISBN 5-12-000909.
4. *Yu.F. Sniezhkin, L.A. Boryak, O.O. Khavin Ю.Ф. Хавін*. [Energy-saving thermal technologies of food powders and secondary raw materials]. K.: [Scientific opinion],1983, 227 p. ISBN 966-00-0158-4.
5. *Yu.F. Sniezhkin, T.A. Rezakova* [State and prospects for the development of geothermal energy in Ukraine. Collection of works "Problems of ecology and operation of energy facilities"]. K.: IVC Alcon NAS of Ukraine, 2022, 45-49, ISBN № 978-966-8449-71-0

6. *Yu.F.Sniezhkin, R.O. Shapar*. [Energy-efficient equipment for dehydration of heat-labile materials]. [Thermophysics and Thermal Power Engineering]. 2020,42 (2), 5-17 <https://doi.org/10.31472/ttpe.2/2020/>

7. *O.O. Kremnev, V.R. Borovsky, A.A. Dolinsky* [Fast drying]. K.: [State Publishing House of Technical Literature], 1963, 382 p.

8. *D.M. Korinchuk, N.M. Sorokova, V.L. Dakhnienko* [Justification of drying in the technology of high-calorie fuel production], [Energy efficiency of drying processes: thematic collection of articles, edited by Yu.F. Sniezhkina, R.O. Shapar].. V.1 K.: Pro Format LLC, 2021, 137-140. ISBN 978-617-7894-25-3

9. *Sniezhkin Yu.F.* [Energy-efficient heat technologies and equipment for heat production from renewable energy sources]., [Thermophysics and Thermal Power Engineering], 2022, 47(4), 7-13 <https://doi.org/10.31472/ttpe.4/2022/>.

10. *Yu.F. Sniezhkin*. [Energy-saving heat pump technologies for heat supply systems of housing and communal services and industry]. [Energy efficiency of drying processes: thematic collection of articles, edited by Yu.F. Sniezhkin, R.O. Shapar].. V.1 K.: Pro Format LLC, 2021, P.167-176. ISBN 978-617-7894-28-4

11. *Y.F. Sniezhkin, M.M. Ulanov* [Production and integrated use of cogeneration units in heat-pumping grain drying complexes]. [Energy efficiency of drying processes], V.2. K.: Pro Format LLC, 2021, 268 p. ISBN 978-617-7894-28-4.

12. *Y.F. Sniezhkin, D.M. Chalaev, V.S. Shavrin, R.O. Shapar, O.O. Khavin*. [Integrated use of geothermal energy in the agro-industrial sector]. [Energy efficiency of drying processes: thematic collection of articles, edited by Yu.F. Sniezhkina, R.O. Shapar], V.2, K.: Pro Format LLC, 2021, 185-189. ISBN 978-617-7894-28-4

13. *Yu.F. Sniezhkin, D.M. Chalaev, V.A. Mikhailik, N.O. Dabizha, T.V. Korinchevska*. [Application of thermal energy accumulation in solar drying systems]. [Energy efficiency of drying processes: thematic collection of articles, edited by Yu.F. Sniezhkin, R.O. Shapar], V.2, K.: Pro Format LLC, 2021, 190-194. ISBN 978-617-7894-28-4

14. *T.V. Korinchevska* [Promising methods of thermal energy accumulation]. [Scientific works of ONAHT], 2010, issue. 37. P.236-241.

Отримано 26.08.2025

Received 26.08.2025

Прийнято до друку 04.11.2025
Accepted for publication 04.11.2025