

УДК 664.047

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНЕ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЗНЕВОДНЕННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ

Снєжкін Ю.Ф., академік НАН України, Шапар Р.О., канд. техн. наук

Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Канніст, 2а, Київ, 03057, Україна

<https://doi.org/10.31472/ttpe.2.2020.1>

Визначено способи підвищення енергоефективності конвективного сушіння термолабільних рослинних матеріалів, наведено зонні тунельні, стрічкові та теплонасосні сушильні установки для реалізації розроблених режимів зневоднення.

Определены способы повышения энергоэффективности конвективной сушки термолабильных растительных материалов, приведены туннельные, ленточные и теплонасосные сушильные установки для реализации разработанных режимов.

We determined the methods of increasing the energy efficiency of convective drying of thermally labile plant materials, are presented zone tunnel, belt and heat pump drying installations for the implementation of the developed dehydration regimes.

Бібліографія 25, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: термолабільні рослинні матеріали, енергоефективність процесу, тепломасообмін, багатостадійні режими зневоднення, сушильне обладнання.

Re – число Рейнольдса;

t – температура;

W^c – вологість матеріалу по відношенню до абсолютно сухої маси;

к.к.д. – коефіцієнт корисної дії;

т.у.п. – тонна умовного палива.

Постановка і аналіз проблеми.

Природно-кліматичні умови нашої країни сприятливі для вирощування плодівих і овочевих культур. Проте, обсяг врожаю, що реалізується на вітчизняному ринку незначний, а на міжнародному – майже відсутній. Якщо проаналізувати ситуацію на прикладі яблук, то на міжнародному ринку Україна не входить навіть в число 40 найбільших експортерів яблук в світі, її частка становить лише 0,08 % [1]. Як результат, у виробників виникають проблеми із реалізацією зібраних плодів і овочів. Безумовно, існує можливість зберігання врожаю за умови низьких температур, але це енерго- й фінансово витратний крок. А тому, через мікробіологічне псування впродовж неправильно організованого зберігання щорічно втрачається до 30 % врожаю. Крім того, частина врожаю гине, залишаючись на місці вирощування за неможливістю транспортування і спричиняє збитки аграріям та призводить до забруднення довкілля, порушення екологічної рівноваги та активного розповсюдження мікроорганізмів.

Чи є вихід, або позитивні зміни в цьому напрямку? Так. Одним із прикладів позитивних змін є відкриття групою компаній "T.B.Fruit", що є найбільшим українським переробником фруктів, заводу з вироб-

ництва яблучного пектину потужністю 3000 тонн в рік на Львівщині (2019 р.) [2]. Насамперед, і це дуже важливо, стає можливим скорочення, а в подальшому і відмова від імпорتنних поставок пектину для цільового використання у медичній та фармацевтичній галузі, а також у харчовій промисловості.

Важливою складовою позитивних змін є налагодження органічного землеробства в нашій країні. Виробництво екологічно чистої органічної продукції в Україні збільшується завдяки програмі "Розвиток органічного ринку в Україні" (2012-2016 рр.) [3]. Найбільша кількість аграріїв з вирощування таких продуктів зосереджена у Київській, Одеській, Херсонській і Харківській областях і, наразі, географія господарств розширюється. Безумовно, вартість таких продуктів вища, але ціна компенсується їхньою високою якістю та безпечністю [4,5].

З огляду на таку тенденцію, відповідно до Директиви Ради ЄС, станом на кінець 2019 року розблоковано поставки українських фруктів і овочів на європейські ринки за умови, що продукція органічна і експортуватиметься з офіційно встановленими місць виробництва [6]. Таким чином, поступово створюється реальна можливість забезпечення споживачів свіжими органічними фруктами

і овочами, одночасно збільшуючи вітчизняне перероблення на соки, пюре, концентрати, сушені плодово-овочеві продукти.

Відповідно з інформацією інвестиційного центру Продовольчої і сільськогосподарської організації ООН (ФАО), Україна, маючи значний надлишок яблук на внутрішньому ринку, практично не експортує сушеної продукції, хоча інші країни, зокрема, наприклад, чилійські аграрії, які є найбільшими світовими експортерами, заробляють на експорті сушених яблук 32 млн дол. США на рік [7].

Враховуючи вище зазначене, варто відмітити, що в нашій країні є реальні передумови щодо впровадження сучасних та традиційних технологій перероблення плодів та овочів на сушені продукти і забезпечення прибутковості агропромислової галузі в цьому напрямку.

Виробництво сушених продуктів у нашій країні в невеликій кількості налагоджено кількома підприємствами, зокрема ФОП "Триполка І.Ф.", (с. Гибалівка, Шаргородський район, Вінницька область), ДП "Уманський консервний комбінат", ТОВ "Файні Ябка" (смт Обертин, Тлумачський район, Івано-Франківщина), ПП "Щедроты Прикарпаття" (с. Новий Вербіж, Івано-Франківщина) тощо [5].

Для збільшення обсягу виробництва сушених продуктів маємо всі підстави: наявність сировинних ресурсів, наявність енергоефективних екологічно безпечних технологій і обладнання розроблених Інститутом. В основу теплотехнології виробництва сушених продуктів покладено метод швидкісного енергоефективного конвективного сушіння попередньо підготовленої сировини чистим гарячим повітрям. Технологія передбачає одержання сухофруктів, чипсів, фруктово-овочевих порошоків. Під час технологічного перероблення не використовують додаткові смакові інгредієнти, штучні барвники, консерванти, що забезпечує природність і натуральність сушеним продуктам.

Промислове виробництво сушених плодів і овочів відкриває перспективи виходу натуральної конкурентоспроможної екологічно чистої сушеної продукції на національний і міжнародний ринки. Не менш важливим є соціальний аспект, який полягає у створення постійних та гарантованих робочих місць на вітчизняних підприємствах. Отже, відновлення і налагодження вітчизняного виробництва є практичною реалізацією концепції стратегічного розвитку аграрного сектору і проявом поєднання захисту довкілля,

економічного зростання й соціального розвитку держави і є актуальним для забезпечення власних потреб і для нарощування експорту [8].

Відповідно з [5,9] витрати енергоресурсів на процеси сушіння в різних галузях промисловості України дорівнюють 6,0...6,5 млн.т.у.п., зокрема в агропромислому секторі – 1,2 млн. т.у.п, що складає 15...20 % від загальних витрат.

Враховуючи зростання вартості енергетичних ресурсів, високу енергоємність процесу зневоднення і посилені вимоги до екологічної безпеки виробництва, пріоритетними напрямками в технологіях сушіння є енерго-і ресурсозбереження, створення новітніх енергоефективних теплотехнологій та обладнання, модернізація існуючого і пошук нових джерел енергії.

Виклад основного матеріалу. Сушіння є найбільш природним і доцільним способом консервування завдяки зниженню природної вологості та уповільненню процесів розвитку мікрофлори у сушених продуктах.

Процеси термічного зневоднення та термовологісна обробка термолабільних сировинних матеріалів характеризуються з одного боку, як будь який тепловий процес, високою енергоємністю та низьким к.к.д, а з другого – підвищеними вимогами до якості кінцевого продукту та його безпечності. Натуральність сушених продуктів і екологічна чистота технологічного процесу виступають на перший план. Критерії якості та економічності процесу поєднуються в одну задачу – підвищення ефективності процесу сушіння та створення неенергоємних теплотехнологій і обладнання для їхньої реалізації.

Шляхи зниження питомих енерговитрат під час сушіння, розроблення способів інтенсифікації процесу залежно від певного методу і об'єкту зневоднення, теплотехнології та сушильного обладнання ґрунтуються на узагальненні закономірностей тепломасообміну і є предметом теоретичних й експериментальних досліджень багатьох вітчизняних та іноземних вчених і достатньо широко висвітлено в наукових працях А.А. Долінського, К.Д. Малецької, О.Г. Бурдо, В.М. Атаманюка, В.О. Потапова, М.І. Погожих, С.П. Рудобашти, П.В. Акуліча, Т. Kudra [10-17].

Аналіз сушильного обладнання показує, що ринок України представлений переважно конвективними установками шафового, тунельного, стрічкового типів різної продуктивності, вітчизняного та закордонного виробництва здебільшого застарілого типу, енерговитрати яких варіюють в широкому діапазоні від 4500 до 8000 кДж на 1 кг випареної вологи, при теоретичних – на рівні

2730 кДж/кг, що негативно позначається на собівартості та конкурентоспроможності сушеної продукції. Крім того, технічні характеристики сушильних установок, що пропонуються іноземними виробниками не завжди відповідають дійсності.

З метою раціонального та ефективного використання енергоресурсів під час конвективного зневоднення проведено аналіз витрат теплоти (рис. 1), відповідно з яким для більшості сушильних процесів тільки 35...45 % теплоти використовується корисно на випаровування вологи з матеріалу, решта – 65...55 %, невиправдані

втрати: з відпрацьованим теплоносієм у навколишнє середовище, на нагрівання матеріалу і вологи, через поверхню сушильної установки. В середньому співвідношення витрат становить 40:60 %, що вказує на їх неефективність [5,18]. Підвищення ефективності сушіння досягається різними способами, починаючи з підготовки матеріалу, інтенсифікації зневоднювання й встановлення оптимальних параметрів ведення процесу до вибору малоенергоємного сушильного обладнання і базується на результатах експериментальних досліджень та дослідно-промислових випробувань (рис. 2).

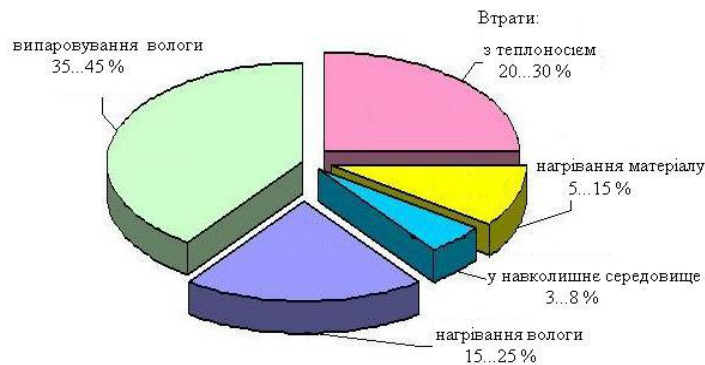


Рис. 1. Розподіл витрат теплоти під час сушіння.



Рис. 2. Напрями підвищення ефективності конвективного сушіння.

Не ставлячи перед собою завдання розглянути кожен етап напряду, докладніше зупинимося на декількох способах інтенсифікації безпосередньо самого процесу сушіння.

Плоди і овочі як природний сировинний матеріал і об'єкт зневоднення є складною біологічною системою, що представлена такими важливими для організму людини термолабільними речовинами, як вуглеводи, органічні кислоти, пектинові та каротинові сполуки, вітаміни, мінеральні речовини, які є додатковим джерелом найцінніших речовин природного походження. Механізм тепло- і вологопереносу має свої специфічні особливості, що залежать від характеру взаємодії вологи з твердим каркасом і є функцією хімічного складу, структурних та теплофізичних характеристик, щільності паренхімних тканин тощо. Все це зумовлює певні умови та режимні параметри проведення попередньої обробки та сушіння. В процесі виробництва при порушенні теплових режимів можливі негативні явища, які призводять до втрати цінних складових вихідного матеріалу. Зміна хімічного складу та властивостей термолабільних зневоднювальних матеріалів залежать від тривалості, температурного рівня та інтенсивності теплової обробки, фактором, що їх лімітує, є гранично допустима температура зневоднювального матеріалу.

Базуючись на узагальненні закономірностей тепломасообміну під час попередньої обробки та сушіння відповідно з результатами раніше опублікованих робіт [19,20], фактор: *температура – час* виступає на перший план. Уникнення перевищення температури матеріалу за допустиме значення і скорочення теплових витрат забезпечується:

- сушінням у режимах багатостадійного зневоднення, у т.ч. високотемпературного високовологого методу із поступовою зміною параметрів сушильного агента відповідно до закономірностей переносу теплоти і вологи у матеріалі. Доцільність використання багатостадійних режимів зневоднення обґрунтована характером зміни чисельного значення Ребіндера (рис. 3). З підвищенням температури сушильного агента чисельне значення Ребіндера за абсолютною величиною також збільшується. В першому періоді процесу сушіння теплота витрачається на випаровування вологи з матеріалу, тому величина Ребіндера має мінімальні значення і процес зневоднення протікає ефективно. Від першої критичної вологості $W_{к1}^c = (320...430 \%)$ до другої $W_{к2}^c = (100...120 \%)$ температура матеріалу плавно зростає і разом з нею зростає величина числа Ребіндера. При досягненні матеріалом другої критичної вологості чисельне значення Ребіндера різко зростає, тобто значна частина теплоти сушильного агента витрачається на нагрівання матеріалу, а не на випаровування вологи з нього, що доводить необхідність зниження температури сушильного агента для запобігання підвищенню температури вище безпечного рівня. Завдяки підтримці температури матеріалу на безпечному рівні, виключається негативні структурно-деформаційні перетворення, перегрівання матеріалу і руйнування термолабільних речовин зневоднювальних плодів і овочів [18,21,22]. Режимми процесу сушіння корегуються залежно від виду сировини, ступеня її зрілості, сезону року, параметрів повітря у виробничому приміщенні, кліматичних умов.

Стадійні режими запобігають виникненню незворотних процесів, які здатні призвести до погіршення

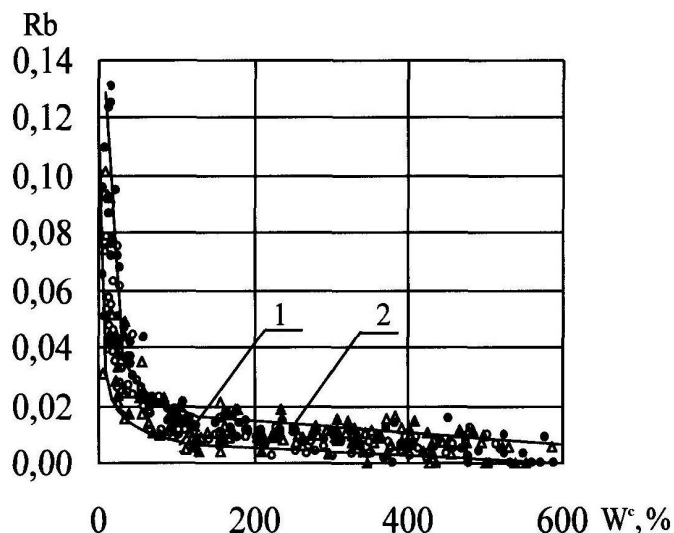


Рис. 3. Зміна числа Ребіндера в процесі сушіння: 1 – $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$; 2 – $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$.

якості продукту, оскільки температура матеріалу не перевищує гранично допустиму величину. Використанням встановлених режимів досягається інтенсифікація процесу та скорочення тривалості теплового впливу на матеріал. Розрахунки [5] показують, що організація процесу сушіння за стадійними режимами сприяє скороченню питомих теплових витрат на 1 кг випареної води у діапазоні 12...15 %;

- сушінням конденсаційним способом з використанням теплового насосу. Зниження вологовмісту відпрацьованого сушильного агента за рахунок конденсації видаленої води у випарнику теплового насосу приводить до зростання масопереносу, що особливо ефективно коли інтенсифікація процесу обмежена величиною максимально допустимої температури матеріалу [23];

- поєднанням різних способів сушіння, зокрема сушінням у режимі конвективно-конденсаційного зневоднення. Відповідно до цього, на початковому етапі, коли матеріал має найбільшу природну вологість, використовують високу температуру сушильного агента, яка забезпечує інтенсивне випаровування води без зниження якості зневоднювального матеріалу, а на заключному етапі – в режимі низькотемпературного зневоднення [24,25].

Для реалізації вищезазначених шляхів створено три покоління енергозберігаючих теплотехнологій, зонні сушильні установки тунельного і стрічкового типу, що входять до технологічних ліній, вартість яких нижча порівняно з вартістю відповідного обладнання закордонного виробництва.

Сушіння сировинних матеріалів здійснюється у середовищі чистого гарячого повітря без обробки інертними і хімічно синтезованими речовинами. Зневодненню піддають цільні плоди і овочі нарізані на шматочки різної форми без додаткового перетворення їх до пасто- або пюреподібного стану, завдяки чому скорочуються теплові витрати та ступінь теплового впливу на термолабільний матеріал, що позитивно відбивається на якості сушеного продукту.

Сушильні комплекси широко впроваджено на понад 60 промислових підприємствах, у т.ч. у Чехословаччині, В'єтнамі. Нагрівання чистого повітря в сушарках здійснюють безконтактно за допомогою традиційних видів палива та з використанням вторинних і відновлюваних джерел енергії, у т.ч. біомаси. Конструктивні особливості сушарок дозволяють реалізувати встановлені багатостадійні режими, розподілити інтенсивність теплового впливу на матеріал залежно від його вологості та часу перебування в тій чи

іншій зоні, а також автоматично підтримувати і контролювати певний тепловологісний режим в кожній зоні для конкретної сировини, що забезпечує скорочення теплових витрат. Прийнята система рециркуляції сушильного агента у зонах також сприяє скороченню витрат теплоти на процес зневоднення і знижує викиди та зменшує теплове забруднення навколишнього середовища.

Для прикладу на рисунку 4 наведено загальний вигляд промислової технологічної лінії ЛПП – 20 і схему агрегату гіротермічної обробки, сушіння й охолодження (АГСО), що виконаний у вигляді двосекційної багатозонної стрічкової сушильної установки у якій чисте повітря нагрівається у парових калориферах. Технологічну лінію впроваджено на кількох підприємствах України, зокрема на Саливонківському цукровому заводі, смт Гребінка, Київщина, у смт Підгайчики, Івано-Франківщина.

Секції сушильної установки з'єднано загальним повітроводом, а вихідна частина стрічкового конвеєра першої секції (поз.4) розташована над прийомною частиною стрічкового конвеєра другої секції. На початковій частині стрічкового конвеєра встановлено шнек-розкладник (поз.1), за допомогою якого регулюють висоту шару матеріалу на стрічці. Для запобігання випаданню матеріалу зі стрічки збоку встановлено обмежувальні пластини. Змінювання навантаження матеріалу є простим у технічному виконанні, водночас при цьому є резерви для інтенсифікації процесу зневоднення.

Перша секція агрегату має зону високотемпературної високоволової обробки (поз.2) і температурні зони (поз.3), друга, поряд з температурними, має ще й зону охолодження (поз.7) для детермопластифікації висушеного матеріалу. Кількість зон визначається необхідною продуктивністю сушильної установки, видом сировинного матеріалу і величиною залишкової вологості кінцевого продукту.

Всередині зони високотемпературної високоволової обробки встановлено перфоровані трубки, через які подають гостру пару. Під сушильною стрічкою встановлено піддон для збору конденсату. Калорифери і вентилятори (поз.9), як і у сушильних зонах (поз.3), розташовано збоку установки безпосередньо в її корпусі. Над поверхнею сушильної стрічки у стелі установки розміщено направляючі лопатки, що рівномірно розподіляють потік теплоносія по всій ширині стрічки для запобігання локальних перегрівів зневоднювального матеріалу.

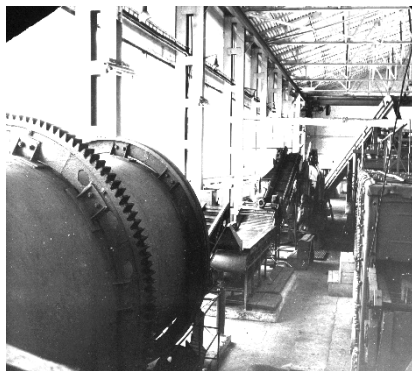
Над стрічкою встановлено механізми для ворухіння і перекидання матеріалу (поз.6). Перед механізмом

для перекидання матеріалу в першій секції встановлено розпушувач (поз.5). За допомогою цих пристроїв вирівнюється градієнт вологості по висоті матеріалу. Під сушильною стрічкою першої секції на її початку і наприкінці встановлено металеві щітки, що обертаються й очищують поверхню стрічки від налиплих шматочків матеріалу.

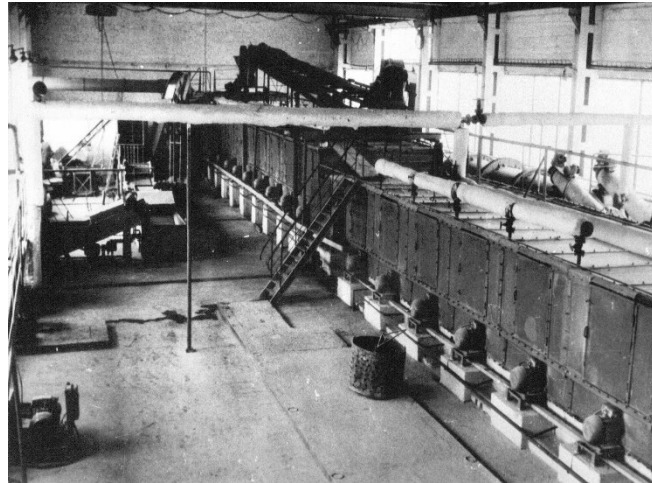
Останні дві зони другої секції сушильної установки є рекуператором-охолоджувачем (поз.7) в якому вишунений матеріал детермопластифікують, при цьому

повітря нагрівається і надходить далі в сушильну зону, маючи температуру значно вищу за зовнішнє повітря. Протитечійний рух теплоносія здійснюється викидним вентилятором (поз.8), розташованим на початку установки. Перехресний рух теплоносія відносно матеріалу, що знаходиться на стрічці, здійснюється вентиляторами сушильних зон і зони охолодження (поз.9).

Кожна секція установки АГСО має автономний механізм регулювання швидкості руху сушильних стрічок, а система контролю і паропостачання установки



Ділянка підготовки сировини до зневоднення.



Ділянка сушіння.

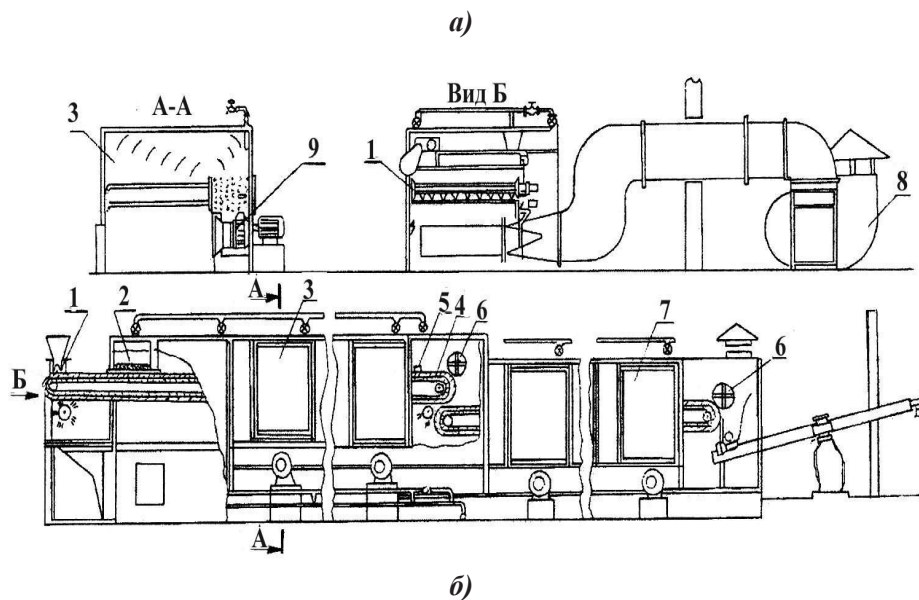


Рис. 4. Загальний вигляд технологічної лінії ЛПП – 20 (а) та схема стрічкової сушильної установки АГСО (б): 1 – шнек-розкладник; 2 – зона гіротермічної обробки; 3 – зона сушіння; 4 – сушильна стрічка; 5 – розпушувач; 6 – скидач; 7 – зона охолодження; 8 – викидний вентилятор; 9 – вентилятор сушильної зони.

дає змогу підтримувати в ній заданий тепловологісний режим, автоматично контрольований на пульті керування: швидкість руху теплоносія до 3,0 м/с, температура в інтервалі від 20 до 140 °С, вологовміст – від 10 до 200 г/кг сухого повітря.

Перевагою наведеної стрічкової сушильної установки є безперервність процесу зневоднення, механізація завантаження сировинного матеріалу, можливість регулювання висоти шару (навантаження на робочу поверхню стрічки) в першій та другій секціях АГСО, невисокі витрати на її обслуговування. До недоліків можна віднести обмежену швидкість, обов'язкову наявність котельної для паропостачання та неможливість зневоднення кісточкових плодів.

Таких недоліків немає у тунельних сушильних установках. На рисунку 5 надано загальний вигляд технологічної лінії ЛТО – 2, яка укомплектована зонною тунельною сушильною установкою СУМ – 2. Технологічні лінії з тунельними установками впроваджено у м. Снятин Івано-Франківської обл., м. Хотин Чернівецької обл., м. Переяслав-Хмельницький Київської обл. і в інших містах України та далекого зарубіжжя.

Корпус сушарки – тунель, що складається з двох автономних ізольованих сушильних зон і зони охолодження. Тунель сушарки виконано з металевих камер (модулів) в яких передбачено перегородки і ґрати для спрямованого потоку сушильного агента. Продуктивність сушильної установки підвищують за рахунок збільшення кількості

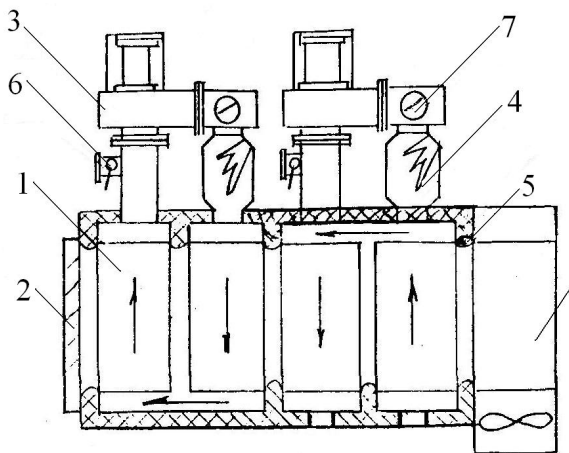
теплових зон. У кожній сушильній зоні дві напівзони, в яких розміщують два візки.

У зоні охолодження розміщується один візок. На візку встановлено 140 перфорованих піддонів. Нижні чотири піддони виконано без отворів для запобігання налипанню соку на рейковий шлях. Через тунель проходить рейковий шлях, замкнутий поза тунелем, він має для маневрування поворотні кола і запасний шлях.

До кожної зони сушіння підведено опалювально-вентиляційну установку, що складається з вентилятора і теплогенератора (поз.3 і 4). На всмоктувальному і нагнітаючому патрубках вентилятора встановлено заслінки для регулювання надходження і скидання повітря. Для сушіння використовують чисте повітря, яке нагрівається безконтактно у теплогенераторі, що розташований в окремому приміщенні і працює на газі, рідкому паливі або на біопаливі.

Нагрітий сушильний агент подають до зони зневоднення, де він охоплює матеріал, укладений на піддони, що встановлені на візку в першій напівзоні. Потім, у просторі між стіною сушильної установки і бічними поверхнями візків, теплоносій змінює свій напрямок на 180°, і, рівномірно розподіляючись по висоті візка, обдуває матеріал зліва направо у наступній напівзоні. Після цього теплоносій через бічні рециркуляційні канали надходить до вентилятора. Частина відпрацьованого теплоносія викидається назовні, замість нього підсмоктується така ж кількість свіжого атмосферного повітря.

Таким чином, під час проходження візків з



а)

б)

Рис. 5. Схема (а) і фото (б) сушильної установки СУМ – 2:

1 – сушильна зона; 2 – ворота сушарки; 3 – вентилятор; 4 – теплогенератор; 5 – ущільнення;
6 – заслінка з біофільтром; 7 – заслінка вихлопна; 8 – зона охолодження.

матеріалом по сушильним зонам змінюється напрямок обдування матеріалу, завдяки чому створюються додаткові умови для рівномірного сушіння матеріалу. Рух теплоносія і зневоднювального матеріалу в сушильних установках здійснюється за протитечійно-перехресною схемою з частковою рециркуляцією.

Прийнята схема рециркуляції теплоносія в зонах сушильної установки з частковим викидом відпрацьованого повітря і підсмоктуванням свіжого дозволяє створювати та підтримувати розроблені тепловологісні режими в зонах сушарки відповідно до виду зневоднювального матеріалу: температуру сушильного агента 20...140 °С, швидкість його руху 2,0...2,5 м/с.

Одним із суттєвих недоліків наведеної тунельної установки є використання ручної праці на етапі завантаження сировини і вивантаження сушеного продукту. Проте, переваг додають можливість зневоднення різноманітних плодів та овочів, у т.ч. і кісточкових, мінімум механізмів і легкість їхнього монтажу, надійність в експлуатації і простота обслуговування.

Технічні показники впроваджених промислових ліній, до складу яких входять наведені вище сушильні комплекси АГСО та СУМ, наведено у таблиці.

Як видно з таблиці, описані вище технологічні лінії характеризуються невеликими витратами теплоти на 1 кг випареної вологи і високою річною продуктивністю по сировині: на технологічній лінії ЛПП вона складає 5000...6000 т, на технологічній лінії ЛТО – 1100...1200 т.

Відповідно до наших розрахунків, за витратами теплоти на 1 кг випареної вологи під час сушіння створені сушильні установки не поступаються такому відомому сушильному обладнанню, як "МНИИП" (Молдова), "Čačak" (Сербія), "Воздухотехника" (Чехія), "Sandvik" (Швеція) (рис. 6).

Стійку тенденцію на впровадження мають конвективні теплонасосні сушильні установки для низь-

Таблиця. Технічні характеристики впроваджених ліній

Тип ліній (сушильна установка)	Найменування показників			
	Продуктивність по сировині, т/годину, т/рік	Продуктивність по сушеному продукту, т/годину, т/рік	Продуктивність по харчовому порошку, т/годину, т/рік	Витрати теплоти на 1 кг випареної вологи, кДж/кг
ЛПП – 20 (АГСО)	1,0...1,2 / 5000...6000	0,16...0,2 / 800...1000	0,10...0,14 / 500...700	3300...3800
ЛТО – 2 (СУМ – 2)	0,23...0,25 / 1100...1200	0,04...0,045 / 200...230	0,025...0,032 / 125...155	3700...4000

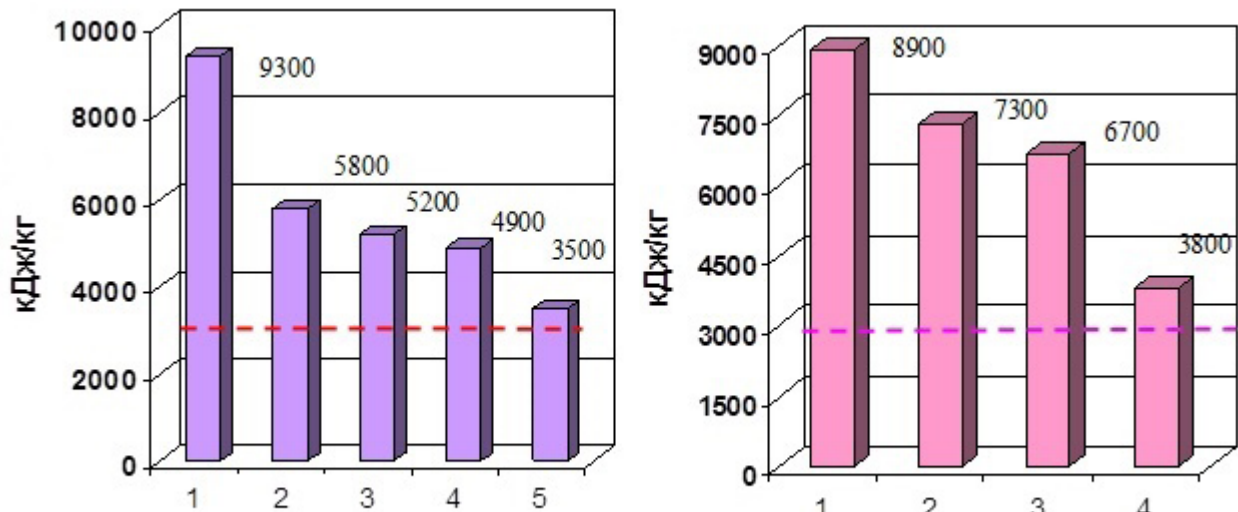
котемпературного зневоднювання [23].

Інститутом створено теплонасосні сушильні установки, які впроваджено на підприємствах різної форми власності України, зокрема у м. Києві, м. Харкові, м. Кривому Розі. Вони найбільш ефективні під час зневоднення термолабільних фруктово-овочевих сировинних матеріалів, у т.ч. лікарських і пряно ароматичних рослин, коли інтенсифікація процесу за рахунок підвищення температури сушильного агента обмежена величиною гранично допустимої температури матеріалу.

На відміну від описаних вище сушильних установок, у них невелика продуктивність (до 40 кг на добу), вони надійні, стабільні та прості в експлуатації, не потребують спеціального обладнаного приміщення, а величина питомих енерговитрат на видалення вологи з матеріалу за рахунок утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія в 1,5...2 рази нижча порівняно з традиційними конвективними сушильними установками, завдяки чому користуються попитом аграріїв. Загальний вигляд конденсаційної теплонасосної сушильної установки, та процес сушіння в *H-d* діаграмі надано на рис. 7.

Сушарка складається з відсіків: технологічного (2), а це саме сушильна камера (верхня частина) і агрегатного (3), це теплонасосний блок (нижня частина), які з'єднані між собою м'яким повітроводом. Сушильну камеру обладнано 12 піддонами (4) з нержавіючої сталі. Зневоднювальний матеріал розміщують на піддонах та завантажують у сушильну камеру, після чого вмикають живлення (5). Технічні характеристики сушарки: Продуктивність по вилученій волозі 0,5...1,5 кг/год
Максимальне завантаження сушарки 40 кг
Максимальна температура сушильного агента $t = 55$ °С
Встановлена електрична потужність 1,0 кВт
Питоми витрати електроенергії на випаровування вологи 0,3...0,7 кВт×год/л

Використанням теплонасосних сушильних установок досягається скорочення питомих енерговитрат на



--- теоретичні витрати на процес сушіння 2730 кДж/кг випареної вологи

Стрічкові сушарки:

- 1 - VT-5, Воздухотехника, Чехія;
- 2 - 4Г-КСК, НИИХИММАШ, Росія;
- 3 - Sandvik, Швеція;
- 4 - КС-2, ІТТФ, Україна;
- 5 - АГСО, ІТТФ, Україна

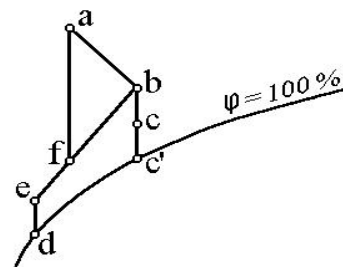
Тунельні сушарки:

- 1 - МНИИП - 1, Молдова
- 2 - Б6-КФ, Росія
- 3 - "Їаџак", Сербія
- 4 - СУМ - 2, ІТТФ, Україна

Рис. 6. Порівняльний аналіз витрат теплоти на 1 кг випареної вологи.



а



б

Рис. 7. Фото (а) та процес теплонасосного сушіння у $h-d$ діаграмі (б): 1 – корпус сушарки;

2 – сушильна камера; 3 – агрегатний відсік; 4 – піддон; 5 – пульт керування роботою сушарки.

(а-б) – насичення вологою; (б-с) – попереднє охолодження в рекуператорі; (с-с'-d) – охолодження у випарнику;

(d-e) – нагрівання в рекуператорі; (e-f) і (b-f) – змішування; (f-a) – нагрівання у конденсаторі.

випаровування вологи, величина яких залежно від виду зневоднювального матеріалу коливається в діапазоні 0,3...0,7 кВт•год/л, і це значно нижчі витрати, ніж у традиційних сушильних установках камерного типу. Проте, для оцінювання економічної доцільності використання теплонасосних технологій маємо враховувати співвідношення тарифів на теплову й електричну енергію.

Висновки. Отже, викладений матеріал доводить, що промислове перероблення плодів і овочів на сушені продукти в нашій країні є реальним, необхідним і прибутковим заходом, який дозволить раціонально використовувати природні сировинні ресурси, знизити кількість незатребуваних плодів і овочів та сприятиме поліпшенню екологічного стану довкілля та одночасно вирішенню продовольчої, енергетичної, економічної й соціальної проблем.

Конструктивні особливості сушильних установок, розроблених Інститутом, сприяють інтенсифікації процесу сушіння, підвищують його ефективність і гарантують максимально повне збереження поживних і біологічних властивостей термолабільних сировинних матеріалів.

Універсальність описаних промислових технологічних ліній полягає у можливості зневоднення різних плодів і овочів, у т.ч. пряно ароматичних та лікарських рослин та ритмічно завантажувати виробництво впродовж року.

Інноваційність створених розробок полягає в екологічній чистоті технологічного процесу, універсальності сушильного устаткування, модульності й автономності теплових зон, широкому діапазоні продуктивності, виду використовуваного палива.

Переваги розробок доповнюються: високою якістю сушених продуктів, низькою витратою теплоти на 1 кг випареної вологи – 3400...3800 кДж, контролем тепловологісних режимів сушіння, зменшенням викидів у навколишнє середовище, надійністю і простотою обслуговування.

В умовах зростання вимог до якості та безпечності сушених продуктів і економічності виробництва, для забезпечення максимального збереження цінних природних складових термолабільної фруктово-овочевої сировини під час зневоднення, технології, методи управління кінетикою вологообміну та сушильні установки постійно потребують вдосконалення і оновлення сучасними засобами програмного керування процесом, контролю виробництва і пристроями для автоматизації.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Експорт та імпорт яблук та перспективи*

України. Режим доступу: <https://agroreview.com/news/eksport-ta-import-yabluk-ta-perspektyvy-ukrayiny>

2. *Бізнес цензор.* Крупнейший украинский переработчик фруктов открыл новый завод на Львовщине. Режим доступу: https://biz.censor.net.ua/news/3150651/krupneyishiyi_ukrainskiyi_pererabotchik_fruktov_otkryl_novyyi_zavod_na_lvovschine_foto

3. *Проект «Розвиток органічного ринку в Україні».* Режим доступу: <http://www.ukraine.fibl.org/ua/ua-a-p.html>

4. *Органічна карта України.* Режим доступу: http://www.ukraine.fibl.org/fileadmin/documents-ukraine/Booklets/Ukrainian_Organic_Map_2016-compressed.pdf

5. *Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О.* Тепломасообмінні технології переробки пектиновмісної сировини. К.: Сік Груп Україна, 2018. – 228 с. ISBN 978–617–7457–69–4.

6. *Declarations under Commission Implementing Regulation (EU) 2019/2072.* Режим доступу: https://ec.europa.eu/food/plant/plant_health_biosecurity/non_eu_trade/declarations_en?fbclid=IwAR2v2Mxlu_xaV_M_9_P_K_I_M_v_H_e_J_2_e_n_G_X_V_7_r_R_f_GD8woDEdypysUNn6xwNa7W9F

7. *Бізнес цензор.* Україна могла б непогано заробляти на експорті сушених яблук. Режим доступу: <https://www.seeds.org.ua/ukra%D1%97na-mogla-b-nepogano-zaroblyati-na-eksporti-sushenix-yabluk/>

8. *Про схвалення Концепції Державної цільової програми розвитку аграрного сектору економіки на період до 2022 року.* Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1437-2015-%D1%80>

9. *Науково-технічна спілка енергетиків та електротехніків України.* Центр громадського інформування з проблем паливно-енергетичного комплексу. Інформаційно-аналітичне дослідження стану паливно-енергетичного комплексу України, випуск № 562. Режим доступу <https://www.ntseu.net.ua/docs/review562-201901.pdf>

10. *Долинский А.А., Малецкая К.Д.* Распылительная сушка: В 2-х т. Т.1. Теплофизические основы. Методы интенсификации и энергосбережения. К.: Академперіодика, 2011. – 376 с. ISBN 966–360–174–8.

11. *Бурдо О. Г.* Эволюция сушильных установок. Одесса: Полиграф, 2010. – 368 с.

12. *Атаманюк В.М., Гумницький Я.М.* Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013.– 276 с. ISBN 978–617–607–397–0.

13. *Черевко О.І., Михайлов, В.О. Потапов, Бабкіна І.В., Михайлова С.В.* Використання мікрохвильової ва-

куумної обробки в процесах виробництва овочевих концентратів. Харків. держ. ун-т харчування та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2014. – 116 с. ISBN 978-966-405 349-2.

14. *Погожих, М. І., Пак А.О.* Энергоэффективные способы переработки харчової сировини: сушіння плодово-ягідної сировини: навч. посіб. Харків. держ. ун-т харч. та торгівлі. Харків: ХДУХТ, 2015. –159 с.

15. *Рудобаишта С.П., Карташев Э.М.* Диффузия в химико-технологических процессах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: КолосС, 2010. – 479 с.

16. *Акулич П.В., Акулич А.В.* Конвективные сушильные установки: методы и примеры расчета: учебное пособие. Минск: Вышэйшая школа, 2019. – 376 с. ISBN 978-985-06-2984-19.

17. *Kudra T.* Energy aspects in drying// Drying Technology.– 2004. Vol. 22 (5). – P. 917 – 932 doi: 10.1081/DRT-120038572

18. *Снежкин Ю.Ф.* Энергоэффективность в процессах сушки/XIV Минский международный форум по тепло-и массообмену, 10–13 сентября 2012 г. :тезисы докладов и сообщений. Минск: 2012, т.1, часть 2.– С. 604 – 607.

19. *Снежкин Ю.Ф., Шапарь Р.А.* Анализ факторов повышения эффективности процесса сушки термостойких материалов//Промышленная теплотехника – 2009.– Т. 31.–№ 7.– с.110–112.

20. *Шапарь Р.А.* Энергосберегающая технология производства сушеной продукции из растительных ма-

териалов //Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій МОН України. Одеса, 2008. Вип. 34. Т. 2. С. 84–87.

21. *Лыков А.В.* Теория сушки. – М.: Энергия, 1968. – 470 с.

22. *Снежкин Ю.Ф.* Создание и перспективы развития ресурсосберегающих технологий производства пищевых порошков на Украине / Тр. 1-ой Межд. научн.-практ. конф. “Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)”. М., 2002. – Т.3. – С.49–53.

23. *Снежкин Ю.Ф., Чалаев Д.М., Шаврин В.С., Шапар Р.О, Хавін О.О., Дабіжжа Н.О.* Використання теплових насосів у процесах сушіння//Промышленная теплотехника.– 2006.–Т.28, №2.–С. 106–110.

24. *Снежкин Ю.Ф., Шапар Р.О., Сорокова Н.М, Гусарова О.В.* Розробка технології виробництва нових форм сушених продуктів// Промышленная теплотехника. – 2015. – Т. 37. – № 6. – С.18–26 doi.org/10.31472/ihe.6.2015.04

25. *Сорокова Н. М.,Снежкин Ю. Ф., Шапар Р.О.* Конвективно-конденсационный способ сушіння термостойких материалов//Энергетика і автоматика. – 2016, №1. – С.99–111. Режим доступу: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2016_1_13

ENERGYEFFICIENT EQUIPMENT FOR DEHYDRATION THERMOBILE MATERIALS

Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.

Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2020.1>

The article substantiates the relevance of processing thermolabile materials into dried foods, as one of the alternative options for fresh fruits and vegetables. It is noted that drying, as a method of conservation, is characterized by high energy intensity and increased requirements for the quality and safety of the final product. The naturalness of the dried products and the environmental cleanliness of the process come to the fore. The criteria of quality and efficiency of the process are combined into a single task: increasing the efficiency of the drying process and creating energy-efficient equipment. The analysis of heat and mass transfer during convective drying allowed us to establish methods and ways to improve the energy efficiency of the process.

Based on a synthesis of theoretical and experimental studies, the optimal heat and humidity parameters of dehydration were determined, according to which the temperature of the material during drying does not exceed the maximum permissible value. This contributes to the preservation of valuable nutrients in the final product. Prevention of excess material temperature above the acceptable level is confirmed by the nature of the change in the numerical value of the Rebinder effect and is provided by drying in multi-stage dehydration modes, including high-temperature high-moisture method using zone drying installations of tunnel and belt type, as well as heat-pump drying installations with low heat consumption. It was emphasized that the drying of thermolabile materials is carried out in an environment of pure hot air without the use of inert and chemically synthesized substances. Non-contact air heating is carried out using traditional fuels as well as secondary and renewable energy sources. It is noted that the design features of the drying equipment make it possible to distribute the intensity of the thermal effect on the material, depending on its moisture content into zones, and also automatically maintain and control these parameters for a specific type of raw material. The adopted recirculation system of the drying agent helps prevent emissions of waste coolant and reduces thermal pollution of the environment.

References 25, tables 1, figures 7.

Key words: thermolabile plant materials, energy efficiency of the process, heat and mass transfer, modes of multistage dehydration, drying equipment.

1. *Eksport ta import yabluk ta perspektyvy ukrayiny* [Export and import of apples and prospects of Ukraine] Available at: <https://agroveview.com/news/eksport-ta-import-yabluk-ta-perspektyvy-ukrayiny> (Ukr.)

2. *Biznes tsenzor. Krupneyishiyyi ukrainskiyi pererabotchik fruktov_ otкрыl novyyi zavod na lvovschine* [Business censor. The largest Ukrainian fruit processor opened a new plant in Lviv region] Available at: <https://biz.censor.net.ua/news/3150651/krupneyishiyyi-ukrainskiyi-pererabotchik-fruktov-otкрыl-novyyi-zavod-na-lvovschine-foto> (Rus.)

3. *Proekt "Rozvytok orhanichnoho rynku v Ukraini"* [The project "organic market development in Ukraine"] Available at: <http://www.ukraine.fibl.org/ua/ua-a-p.html> (Ukr.)

4. *Orhanichna karta Ukrainy* [Organic map of Ukraine]. Available at: http://www.ukraine.fibl.org/fileadmin/documents-ukraine/Booklets/Ukrainian_Organic_Map_2016-compressed.pdf (Ukr.)

5. *Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.* [Heat-mass exchange technologies for pectin-containing raw materials processing], Kyiv, Sik Hrup Ukrainy [Sik Hrup Ukraine], 2018. 228p. ISBN 978-617-7457-69-4 (Ukr.)

6. *Declarations under Commission Implementing Regulation (EU) 2019/2072.* Available at: https://ec.europa.eu/food/plant/plant_health_biosecurity/non_eu_trade/declarations_en?fbclid=IwAR2v2Mxlu_x a V M 9 P K I M v H e J 2 e n G X V 7 r R f _ GD8woDEdypysUNn6xwNa7W9F

7. *Biznes tsenzor. Ukraina mohla b nepohano zaroblyaty na eksporti sushenykh yabluk* [Ukraine could make a good profit by exporting dried apples] Available at: <https://www.seeds.org.ua/ukra%D1%97na-mogla-b-nepo-gano-zaroblyaty-na-eksporti-susheniy-yabluk/> (Ukr.)

8. *Pro skhvalennia Kontseptsii Derzhavnoi tsilovoi prohramy rozvytku ahrarnoho sektoru ekonomiky na period do 2022 roku* [On approval of the Concept of the State Target Program for the Development of the Agricultural Sector for the Period until 2022] Available at: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1437-2015-%D1%80> (Ukr.)

9. *Naukovo-tekhnichna spilka enerhetykiv ta elektro-tehnikiv Ukrainy Informatsiino-analitychne dosli-dzhennia stanu palyvno-enerhetychnoho kompleksu Ukrainy* [Scientific and Technical Union of Power Engineers and Electrical Engineers of Ukraine Information and analytical study of the state of the fuel and energy complex of Ukraine]. № 562. Available at: <https://www.ntseu.net.ua/docs/review562-201901.pdf> (Ukr.)

10. *Dolinskiy A.A., Maletskaya K.D.* [Spray drying. Thermophysical basics. Methods of intensification and energy saving], Kiev, Akadempriodika [Akadempriodyka], 2011. V.2. 376 p. ISBN 966-360-174-8 (Rus.)

11. *Burdo O. G.* [Evolution of drying plants], Odessa, Poligraf [Polygraph], 2010. 368 p. ISBN 978-966-8788-98-7 (Rus.)
12. *Atamaniuk V.M., Humnytskyi Ya.M.* [Scientific bases of filtration drying of dispersed materials], Lviv, Vydavnytstvo Lvivskoi politekhniki [Polytechnic Publishing House], 2013. 276 p. ISBN 978-617-607-397-0 (Ukr.)
13. *Cherevko O.I., Mykhailov, V.O. Potapov, Babkina I.V., Mykhailova S.V.* [The use of microwave vacuum processing in the production of vegetable concentrates], Kharkiv, KhDUKhT [KSUFIT], 2014. 116 p. ISBN 978-966-405-349-2 (Ukr.)
14. *Pohozhykh M.I., Pak A.O.* [Energy-efficient ways to process food raw materials: drying fruit and berry raw materials] Kharkiv, KhDUKhT [KSUFIT], 2015. 159 p. (Ukr.)
15. *Rudobashta S.P., Kartashev E.M.* [Diffusion in chemical-technological processes], Moskva, KolosS, [Koloss], 2010. 479p. (Rus.)
16. *Akulich P.V., Akulich A.V.* [Convective drying plants: calculation methods and examples], Minsk: Vyshejs'haia shkola [Вышэйшая школа], 2019. 376 p. ISBN 978-985-06-2984-19 (Rus.)
17. *Kudra T.* Energy aspects in drying. *Drying Technology*, 2004. Vol. 22 (5). pp. 917 - 932. doi 10.1081/DRT-120038572
18. *Snezhkin Yu.F.* [Energy efficiency in the drying process], XIV Minskiy mezhdunarodnyy forum po teplo-i massoobmenu: tezisy dokladov i soobshcheniy, [XIV Minsk international heat and mass transfer forum: abstracts of the reports and communication], 10-13 september 2012. Minsk, 2012, V.1, part. 2. P. 604 - 607 (Rus.)
19. *Snezhkin Yu.F., Shapar R.A.* [An analysis of factors that increase efficiency of the process of drying of thermolabile materials], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial Heat engineering], 2009. V. 31. № 7. P. 110 - 112. (Rus.)
20. *Shapar R.A.* [The energy saving production technology of dried production from plant materials], *Naukovi pratsi ONAKHT* [Scientific Proceedings of ONAFT], 2008. S. 34. V. 2. P. 84 - 87 (Rus.)
21. *Lykov A.V.* [Theory of drying], Moskva, Energiya, [Energy], 1968. 470 p. (Rus.)
22. *Snezhkin Yu.F.* [Creation and prospects development of resource-saving technologies for the production of food powders in Ukraine], *Trudy 1-oy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii "Sovremennyye energosberegayushchiye teplovyye tekhnologii (sushka i termovlazhnostnaya obrabotka materialov)"* [Proceedings of the 1st International Scientific and Practical Conference "Modern energy-saving thermal technologies (drying and heat-moisture processing of materials)", Moskva, 2002. T.3. P. 49 - 53. (Rus.)
23. *Sniezhkin Yu.F., Chalaev D.M., Shavrin V.S., Shapar R.O., Khavin O.O., Dabizha N.O.* [Heat pump application in drying], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2006. V. 28. № 2. P. 106 - 110 (Ukr.)
24. *Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O., Sorokova N.M., Husarova O.V.* [Development of technology for the production of new forms of dried products], *Promyshlennaya teplotekhnika* [Industrial heat engineering], 2015. V. 37. № 6. P. 18 - 26. doi.org/10.31472/ihe.6.2015.04 (Ukr.)
25. *Sorokova N.M., Sniezhkin Yu.F., Shapar R.O.* [Convective-condensation method drying thermolabile materials], *Enerhetyka i avtomatyka* [Power engineering and automation], 2016. №1. P. 99 - 111. Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/eia_2016_1_13 (Ukr.)

Отримано 08.04.2020
Received 08.04.2020