

УДК 664.723.047

DOI <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.5.14>

ФАКТОРИ ПІДВИЩЕННЯ ІНТЕНСИВНОСТІ ТА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУШІННЯ ЗЕРНОВИХ КУЛЬТУР

Пазюк В. М. – доктор технічних наук, доцент,
провідний науковий співробітник
Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України
ORCID ID: 0000-0002-4955-1941
Scopus Author ID: 57205217985

Дуб В. В. – кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри готельно-ресторанного та туристичного бізнесу
Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-2078-4426
Scopus Author ID: 57221327426

Сєдих К. В. – кандидат технічних наук,
викладач циклової комісії харчових технологій та готельно-ресторанної справи
Харківського торговельно-економічного коледжу
Київського національного торговельно-економічного університету
ORCID ID: 0000-0002-5720-8430

При сушінні зернових культур основним завданням є підвищення інтенсивності процесу із зниженням енергетичних витрат. Інтенсивність процесу сушіння обмежена якісними характеристиками матеріалу, тому необхідність застосування високотемпературного сушіння має обмеження.

Найбільш поширені технології із конвективним сушінням зерна в шахтних та колонкових зерносушарках з високою продуктивністю, також в них передбачено окремо рух теплоносія та зернового шару вздовж сушильної шахти, що має характер перехресного руху і збільшує інтенсивність. Швидкість руху теплоносія можна регулювати зміною обертання та потужністю вентилятора, а швидкість руху зернового шару частотою відкривання випускного шибєру внизу сушильної шахти. Разом з конвективним сушінням зерна в шахтних зерносушарках також реалізується кондуктивне сушіння в підігрітих коробах шахт сушарки, тобто в них реалізується конвективно-кондуктивне сушіння, що додатково інтенсифікує процес, але може привести до перегрівання матеріалу.

Інтенсифікація процесу сушіння може досягатися різними способами, але основною умовою при виборі та вдосконаленні процесу сушіння зерна є отримання максимального економічного ефекту, що в свою чергу пов'язано з низькими енергетичними витратами.

Енергоефективність процесу сушіння зерна оцінюється наведеними заходами із зниження витрат енергії на процес сушіння зерна. Вони поділені на три групи: заходи направлєні на зменшення витрат теплоти в шахтній зерносушарці, використання нетрадиційних джерел енергії та вдосконалення експлуатації та управління роботою зерносушарки.

За наведені формулами розраховані витрати теплоти в зерносушарці ДСП-320т, де втрати теплоти поділяються наступним чином: на випаровування вологи (53,2%), з відпрацьованим теплоносієм (23,9%), на нагрівання зерна та транспортних пристроїв (15%), від нагрітих поверхонь корпусу зерносушарки (6,9%) та від неповного згоряння палива (1%).

Проведений аналіз заходів з зменшення питомих витрат при роботі шахтних зерносушарок, що може значно покращити енергоефективність обладнання і були запропоновані заходи направлєні на вдосконалення, правильної експлуатації зерносушарки та управління процесом сушіння зерна.

Реалізація заходів з інтенсифікації та енергоефективності процесу сушіння значно зменшить тривалість процесу, а також дозволить створити ефективну економічну

сушильну установку із витратами теплоти значно менші за аналоги в межах 3000... 3800 кДж/кг вип. вологи.

Ключові слова: інтенсифікація, способи сушіння, енергоефективність, сушіння зерна, витрати теплоти, зменшення втрат теплоти, зерносушарки.

Paziuk V. M., Dub V. V., Siedykh K. V. Factors for increasing the intensity and energy efficiency of grain drying

When drying grain crops, the main task is to increase the intensity of the process with a decrease in energy costs. The intensity of the drying process is limited by the quality characteristics of the material, so the need to use high-temperature drying has limitations.

The most common technologies with convective drying of grain in shaft and column grain dryers with high productivity, they also provide for the separate movement of the heat carrier and the grain layer along the drying shaft, which has the character of cross movement and increases the intensity. The speed of movement of the heat carrier can be adjusted by changing the rotation and power of the fan, and the speed of movement of the grain layer by the frequency of opening the outlet shutter at the bottom of the drying shaft. Along with convective drying of grain in mine grain dryers, conductive drying is also implemented on the heated boxes of the dryer shafts, i.e., convective-conductive drying is implemented in them, which additionally intensifies the process, but can lead to overheating of the material.

Intensification of the drying process can be achieved in various ways, but the main condition for choosing and improving the grain drying process is obtaining the maximum economic effect, which in turn is associated with low energy costs.

The energy efficiency of the grain drying process is assessed by the following measures to reduce energy consumption for the grain drying process. They are divided into three groups: measures aimed at reducing heat consumption in the mine grain dryer, using non-traditional energy sources and improving the operation and management of the grain dryer.

According to the given formulas, heat consumption in the DSP-320t grain dryer is calculated, where heat losses are divided as follows: for moisture evaporation (53.2%), with spent coolant (23.9%), for heating grain and transport devices (15%), from the heated surfaces of the grain dryer housing (6.9%) and from incomplete fuel combustion (1%).

An analysis of measures to reduce specific costs during the operation of mine grain dryers, which can significantly improve the energy efficiency of the equipment, was carried out, and measures aimed at improving the correct operation of the grain dryer and managing the grain drying process were proposed.

Implementation of measures to intensify and energy efficiency of the drying process will significantly reduce the duration of the process, and will also allow creating an efficient economic drying plant with heat consumption significantly lower than analogues in the range of 3000–3800 kJ/kg vol. moisture

Key words: intensification, drying methods, energy efficiency, grain drying, heat consumption, reduction of heat loss, grain dryers.

Вступ. Постійне збільшення ціни пального, газу та електроенергії збільшують вартість висушеного зерна. В структурі попередньої обробки зерна на процес сушіння витрачається біля 70...80% енергії, що потрібно зменшувати. Зменшення втрат теплоти в процесі сушіння можливо при підвищенні інтенсивності та заходів направлених на вдосконалення технологій, використання теплоти відпрацьованого теплоносія, вдосконалення програм управлінням та контролю процесом сушіння, використання інших альтернативних джерел енергії та ін.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. При аналізі енергоефективності сучасних зерносушарок використовувались каталоги різних фірм виробників, зокрема польського (фірми "Araj", "Ag – Proget"), німецького (фірми "Riela", "Stela", "Agrex") та американського (фірми "Farm Fans", "Sukup MFG", "Mathews Company") [1–8]. А також шахтні зерносушарки вітчизняного виробництва Карлівського МЗ [9].

Метою дослідження є проведення аналізу факторів, що впливають на інтенсивність та енергоефективність при сушінні зернових культур та запропонувати заходи по вдосконаленню технології сушіння та розробки енергоефективної зерносушарки.

Виклад основного матеріалу. Інтенсифікацію процесу сушіння зерна можна проводити за наступними напрямками:

1. Підвищення інтенсивності сушіння через вдосконалення технології сушіння за різними напрямками в шахтних зерносушарках:

1.1. Попереднє інтенсивне підігрівання зерна високотемпературним теплоносієм з невисокою тривалістю нагріву на радіаторах (кондуктивних способ) та конвективний спосіб в падаючому, зваженому або киплячому шарі (зміна стану зернового шару).

1.2. Застосування ефективних інтенсивних режимів сушіння:

1.2.1. Ступеневі режими сушіння (прямоточна схема сушіння в прямоточній шахтній сушарці ДСП-16, ДСП-32 та ін.) перехід від високої до низької температури теплоносія при переході від зони нагрівання до зон сушіння.

1.2.2. Імпульсні режими сушіння передбачає нагрівання, відлежування та охолодження зерна (рециркуляційні шахтні зерносушарки РД-2х25-70, У2-УЗБ-50 та ін.).

1.2.3. Диференційні режими сушіння при яких гранично допустима температура нагрівання зерна і температура теплоносія залежить від початкової якості клейковини – міцної, доброї або слабкої. Сушіння пшениці зі слабкою клейковиною при підвищеній температурі приводить до зміцнення клейковини, а отже поліпшення якості.

1.3. Рециркуляція теплоносія може проводитися трьома способами:

1) від другої зони сушіння; 2) від зони охолодження; 3) змішана.

1.4. Рециркуляція зерна проводиться двома способами:

– часткова – для підігрівання нової порції зерна нагрітим зерном;

– повна – для зниження високої вологості матеріалу до кінцевої вологості за 2 проходу через сушарку (не можливість знімання вологи більше 6...8% за 1 прохід).

2. Заходи направлені на інтенсифікацію сушіння зерна, що реалізуються в різних типах зерносушарок.

2.1. Збільшення інтенсивності сушіння зерна можливо із дією вібраційних коливань пов'язано з активністю перемішування матеріалу. Розробка вібраційних технологій сушіння зерна обмежена низькочастотними коливаннями та розроблена різноманітність конструкцій, таких як лоткові, барабанні, спіральні та ін., які не набули широкого поширення і мають не високу продуктивність.

2.2. Збільшення інтенсивності сушіння зерна при електричному сушінні струмами високої та надвисокої частот відбувається швидке нагрівання матеріалу. Не знаходить широкого використання внаслідок великої втрати електричної енергії, яка становить 12600...18000 кДж/кг вип. вологи (для шахтних сушарок витрати теплоти 4800...6000 кДж/кг вип. вологи), а також складність устаткування і обслуговування установок з високою напругою.

2.3. Підвищення інтенсивності інфрачервоним випромінювання та сублімаційне сушіння в умовах глибоко вакууму не набуло широкого розповсюдження. Внаслідок високих енергетичних витрат на процес сушіння більше 12600 кДж/кг вип. вологи.

2.4. Зниження вологовмісту теплоносія, що реалізується встановленням теплових насосів в схемі підігріву теплоносія. Теплонасосні сушильні установки (повітря-повітря) гарно зберігають якість матеріалу, температура нагрівання теплоносія залежить від температури навколишнього середовища і не перевищує 60 °С. Двоконтурні або каскадні теплові насоси можуть підняти температуру до 80 °С, але ускладнюється обслуговування обладнання і вартість самої установки.

В тепло насосних сушильних установках витрати теплоти становлять 3800... 4600 кДж/кг вип. вологи.

3. Комбінація конвективного способу сушіння з іншими способами сушіння дозволить значно інтенсифікувати процес сушіння зерна, але в свою чергу збільшить додаткові витрати на процес.

Інтенсифікація процесу сушіння може досягатися різними способами, але основною умовою при виборі та вдосконаленні процесу сушіння зерна є отримання максимального економічного ефекту, що в свою чергу пов'язано з низькими енергетичними витратами.

Енергоефективність процесу сушіння зерна оцінюється наведеними заходами із зниження витрат енергії на процес сушіння зерна. Вони поділені на три групи: заходи направлені на зменшення витрат теплоти в зерносушарці, використання нетрадиційних джерел енергії та вдосконалення експлуатації та управління зерносушарок [10] (рис. 1).

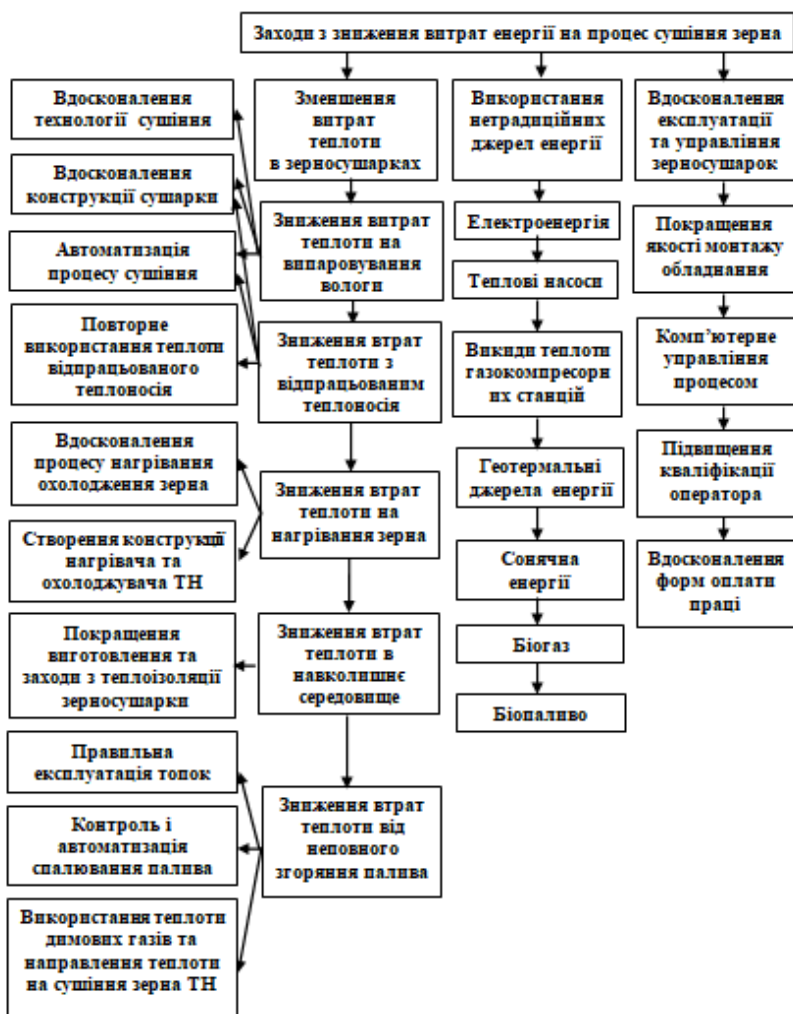


Рис. 1. Заходи з зниження витрат енергії на процес сушіння зерна

Зменшення втрат теплоти ΣQ (кДж/кг) в зерносушарках визначаємо за формулою (1) теплового балансу:

$$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (1)$$

де Q_1 – втрати теплоти на випаровування вологи, кДж/кг;

Q_2 – втрати теплоти на нагрівання зерна, кДж/кг;

Q_3 – втрати теплоти на нагрівання транспортних засобів, кДж/кг;

Q_4 – втрати теплоти з відпрацьованим теплоносієм, кДж/кг;

Q_5 – втрати теплоти від корпусу зерносушарки, кДж/кг;

Q_6 – втрати теплоти внаслідок неповного згоряння палива, кДж/кг.

Втрати теплоти на сушіння зерна у відсотках представлена у таблиці 1, найбільші втрати теплоти відбувається від випаровування вологи з матеріалу і складають 53,2%.

Таблиця 1

Втрати теплоти на сушіння зерна в зерносушарці ДСП-32от

№ п/п	Втрати теплоти	Формула	Втрати теплоти в зерносушарці ДСП-32от	
			кДж/кг	%
1	На випаровування вологи	$Q_1 = \omega(r + \Delta r)$	2782,5	53,2
2	На нагрівання зерна	$Q_2 = G_3 c_3 (\theta_3 - \theta_0)$	787,5	15,0
3	На нагрівання транспортних засобів	$Q_3 = G_T c_3 (\theta_2^I - \theta_2^{II})$		
4	З відпрацьованим теплоносієм	$Q_4 = L (H_2 - H_0)$	1265,3	23,9
5	Від нагрітих поверхонь корпусу зерносушарки	$Q_5 = \Sigma F k 3,6 (t_{cp} - t_0)$	362,2	6,9
6	Від неповного згоряння палива	$Q_6 = B Q_H^p (1 - \eta_T) - Q_{вт}$	52,5	1,0
7	Загальні втрати теплоти	$\Sigma Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6$	5240	100

Розшифровка формул наведених в табл. 1:

r – теплота пароутворення води, кДж/кг;

Δr – теплота пароутворення, що витрачається на опір масопереносу при сушінні зерна;

G_3 – продуктивність сушарки, кг/год;

c_3, θ_3 – відповідно питома теплоємність (кДж/кг К) і температура зерна (°С) на виході після зерносушарки;

G_T – продуктивність транспортеру, кг/год;

$\theta_2^I, \theta_2^{II}$ – температура зерна відповідно до і після транспортування, °С;

L – витрата сушильного агенту, кг/год;

H_2, H_0 – ентальпія відпрацьованого сушильного агенту та зовнішнього повітря, кДж/кг;

ΣF – сума площ нагрітих поверхонь, через які відбуваються втрати теплоти в навколишнє середовище, м²;

k – коефіцієнт теплопередачі крізь стінки зерносушарки, Вт/(м² К);

t_{cp} – середня температура в зерносушарці, °С;

t_0 – температура навколишнього середовища, °С;

B – витрата палива, кг/год;

Q_H^p – нижча теплота спалювання палива, кДж/кг;

η_r – коефіцієнт корисної дії топки;

$Q_{вт}$ – величина втрат теплоти в навколишнє середовище через підігріті поверхні топки, кДж/год.

Для підвищення енергоефективності процесу сушіння зернових культур, розроблено:

1. Заходи із зниження витрат теплоти в зерносушарці:

1.1. Заходи із зниження втрат теплоти на випаровування вологи:

1.1.1. Вдосконалення технології сушіння зерна:

- вибір і застосування оптимальних режимів сушіння;
- змішування зерна різної вологості і температури;
- короткочасне нагрівання зерна рециркуляційним зерном;
- подачу в зону сушіння попередньо нагрітого зерна;
- відлежування багатокомпонентної за вологістю та температури зерна;
- використання теплоносія з максимальними значеннями температури та швидкості;
- ефективне охолодження насіння до рівноважної вологості.

1.1.2. Вдосконалення конструкції зерносушарок:

- рівномірне розподілення теплоносія по перерізу шахти і по довжині коробів;
- безперервне завантаження та випуск висушеного зерна;
- застосування пристроїв для перемішування в щільному нерухомому шарі;
- впровадження теплонасосних технологій для зневоднення повітря та сушильного агенту.

1.1.3. Автоматизація процесу сушіння зерна: організація контролю температури, вологості, швидкості теплоносія та зерна для збереження якісних характеристик зерна.

1.2. Заходи із зниження втрат теплоти на нагрівання зерна:

1.2.1. Вдосконалення процесу на нагрівання та охолодження зерна:

- застосування проміжного нагрівання та охолодження зерна;
- охолодження до температури навколишнього середовища;
- охолодження зерна за допомогою теплонасосних установок.

1.2.2. Створення конструкції нагрівача та охолоджувача на основі теплового насосу:

- створення конструкції безперервної дії, що дозволить регулювати швидкість нагрівання та охолодження повітряного потоку в широкому діапазоні;
- зведення до мінімуму нерівномірності нагрівання та охолодження шарів зерна.

1.3. Заходи із зниження втрат теплоти з відпрацьованим теплоносієм:

1.3.1. Повторне використання теплоти відпрацьованого теплоносія:

- використання теплонасосного циклу для зниження вологи високотемпературного відпрацьованого теплоносія і направлення їх для попереднього нагрівання зерна;
- змішування частини відпрацьованого теплоносія і повітря з топковими газами;
- утилізація (рекуперація) теплоти відпрацьованого теплоносія.

1.3.2. Вдосконалення конструкцій зерносушарок:

- використання раціональної схеми підведення теплоносія до зерна;
- усунення нерівномірності нагрівання та сушіння зерна;
- застосування теплових насосів.

1.3.3. Автоматизація процесу підтримання оптимальної витрати теплоносія і повітря.

1.4. Заходи із зниження втрат теплоти в навколишнє середовище через нагріті поверхні, в тому числі на нагрів транспортних засобів:

- встановлення теплоізоляції зерносушарок та топкових пристроїв, вдосконалення їх конструкцій та найближче конструктивне розташування;
- правильна організація роботи та технічна експлуатація зерносушарок, зменшення простоїв обладнання.

1.5. Заходи зі зниження втрат теплоти від неповного згорання палива:

- автоматизація процесу спалювання палива;
- правильна експлуатація топков (особливо в періоди запуску і виходу на задані режими);

– використання теплоти димових газів топкових пристроїв та направлення теплоти на сушіння зерна в зерносушарку за допомогою теплових насосів.

Заходи направлені на зниження втрат на процес сушіння частково реалізується в сучасних зерносушарках, що відповідно знижує витрати теплоти на сушіння та підвищує коефіцієнт корисної дії зерносушарок до 77,5%.

2. Використання нетрадиційних джерел енергії

У зв'язку з подорожчанням традиційного виду палива (газу) виникла потреба у отриманні теплоти на сушіння зерна від нетрадиційних видів палива. Так отримання теплової енергії від альтернативних джерел енергії дозволяє істотно зменшити її вартість.

Останнім часом широко використовують в якості палива біогаз та біопаливо (дрова, відходи деревообробних та с/г виробництв). Використання електроенергії та теплових насосів обмежена із-за високої вартості устаткування та їх обслуговування. Витрати теплоти при сушінні електроенергії значні біля 15000 кДж/кг вип. вологи і стає ефективним, як джерело енергії для теплового насосу.

Використання теплоти газокompресорних станцій, геотермальних джерел енергії та сонячної енергії ефективно також при нагрівання теплоносія в теплому насосі або теплових трубах.

3. Вдосконалення експлуатації та управління зерносушарки

Вдосконалення експлуатації та управління зерносушарки залежить від покращення якості монтажу, комп'ютерного управління процесом, підвищення кваліфікації оператора, вдосконалення форм оплати праці – це безпосередньо впливає на якість роботи зерносушарки та якість отриманого зерна, надійності роботи і енергоефективності процесу сушіння зерна.

Висновки. Всі зазначені фактори з підвищення енергоефективності сушіння зерна реалізують програму створення енергоефективної зерносушарки з витратами теплоти 3000...3800 кДж/кг вип. вологи (при діючих витратах теплоти в шахтних зерносушарках 4800...6000 кДж/кг вип. вологи).

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Каталог продукції фірми Araj (Польща). URL: <http://www.agroimpuls.com/index.php>. (дата звернення: 21.11.2023).

2. Каталог продукції фірми Ag – Project (Польща). URL: [http:// www.ag-projects.com/](http://www.ag-projects.com/). (дата звернення: 21.11.2023).
3. Каталог продукції фірми Riela (Німеччина). URL: [http:// www.ukrbiznes.com/websiteview.php?id=59951](http://www.ukrbiznes.com/websiteview.php?id=59951). (дата звернення: 21.11.2023).
4. Каталог продукції фірми Stela (Німеччина). URL: [http:// www.stela-drying-technology.de](http://www.stela-drying-technology.de) (дата звернення: 21.11.2023).
5. Каталог продукції фірми Agrex (Німеччина). URL: [http:// www.agrex.com](http://www.agrex.com). (дата звернення: 21.11.2023).
6. Каталог продукції фірми Farm Fans (США). URL: [http:// www.fficorp.com/english/farmfans.html](http://www.fficorp.com/english/farmfans.html). (дата звернення: 21.11.2023).
7. Каталог продукції фірми Sukup MFG., Co. (США). URL: [http:// www.sukup.com](http://www.sukup.com). (дата звернення: 21.11.2023).
8. Каталог продукції фірми Mathews Company (США). URL: [http:// www.mathewscorpany.com](http://www.mathewscorpany.com). (дата звернення: 21.11.2023).
9. Каталог продукції Карловський МЗ (Україна). URL: [http:// zbut@kmz.poltava.ua](http://zbut@kmz.poltava.ua). (дата звернення: 21.11.2023).
10. Станкевич Г. М. Сушіння зерна: Підручник / Г. М. Станкевич, Т. В. Страхова, В.І. Атаназевич. К.: Либідь, 1997. 352 с.

REFERENCES:

1. Catalog of products of Araj Retrieved from <http://www.agroimpuls.com/index.php>. [in Poland].
2. Catalog of Ag-Project products. Retrieved from [http:// www.ag-projects.com](http://www.ag-projects.com) [in Poland].
3. Riela product catalog. Retrieved from [http:// www.ukrbiznes.com/websiteview.php?id=59951](http://www.ukrbiznes.com/websiteview.php?id=59951). [in Germany].
4. Stela product catalog. Retrieved from [http:// www.stela-drying-technology.de](http://www.stela-drying-technology.de) [in Germany].
5. Product catalog of Agrex. Retrieved from [http:// www.agrex.com](http://www.agrex.com) [in Germany].
6. Catalog of Farm Fans products. Retrieved from <http://www.fficorp.com/english/farmfans.html> [in USA].
7. Product catalog of Sukup MFG., Co. Retrieved from <http://www.sukup.com> [in USA].
8. Catalog of Mathews products Company. Retrieved from <http://www.mathewscorpany.com> [in USA].
9. Product catalog of the Karlovsky Machine-Building Plant. Retrieved from zbut@kmz.poltava.ua [in Ukrainian].
10. Stankevich H. M. (1997) Sushinnya zerna [Grain drying] Kyiv: Lybid [in Ukrainian]