

УДК 664.72

Снежкін Ю.Ф., Шапар Р.О., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Пазюк В.М.

Інститут технічної теплофізики НАН України

ІНТЕНСИФІКАЦІЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ НАСІННЕВОГО ЗЕРНА

Наведено результати кінетики сушіння зерна, встановлені режими збезводнення та розроблені шляхи інтенсифікації процесу, засновані на застосуванні сушильного агента з низьким вологовмістом.

Приведены результати кінетики сушки зерна, установлены оптимальные режимы его обезвоживания, разработаны пути интенсификации процесса, основанные на использовании сушильного агента с пониженным влагосодержанием.

The results of drying kinetics of grains are presented, the optimum modes of grain dehydration are determined, the ways of the process intensification based on the use of drying agent with lowered moisture content are developed.

d – вологовміст теплоносія;
 g – питоме навантаження матеріалу;
 t – температура теплоносія;
 V – швидкість теплоносія;

W – вологість по відношенню до абсолютно сухої маси матеріалу;
 τ – час.

Вступ

Сьогодні приблизно 15 % світового врожаю втрачається через незадовільне його зберігання. В Україні такий показник значно вищий. Одним із чинників, що впливає на його втрати, висока вологість зібраного зерна. При підвищеній вологості збільшується біологічна активність мікроорганізмів і інтенсивність дихального процесу в самому насінні. Доведення вологості зернових культур до кондиційної, величина якої забезпечила б уповільнення зростання мікроорганізмів і створення несприятливих умов для їхнього виживання, досягається сушінням. На сушіння витрачається до 20 % всіх енерговитрат необхідних на вирощування і збір врожаю. В Україні до 80 % сушильних установок припадає на морально і фізично застарілі прямоточні зерносушарки ДСП-32, близько 10 % складають модернізовані моделі А-ДСП-50. Незначну частину займають рециркуляційні зерносушарки РД та зерносушарки імпортного виробництва, доля яких за останні роки нестримно зростає. Так, практично монопольне становище серед постачальників сушарок до України посідають дві країни – США та Польща, які контролюють 84 % всіх обсягів імпорту. Значного попиту набувають сушарки середньої та малої продуктивності [1, 2].

Термолабільні властивості зернових культур вимагають ретельного підходу до вибору оптимального теплового режиму сушіння з урахуванням гранично допустимих температур нагрівання конкретної культури, її початкової вологості, тривалості процесу, мети подальшого призначення. Особливо це стосується сушіння зерна насінневого призначення, бо від правильно обраних режимів залежать насінневі показники та врожай наступного року.

Видалення вологи сушінням змінює кількісне співвідношення його складових частин, внаслідок чого змінюється характер взаємодії між вологою та складовими речовинами зерна. При нагріванні зерна змінюється стан білків, вуглеводів, ліпідів та інших хімічних речовин, які входять до складу зерна, змінюються фізичні, біохімічні, структурно-механічні властивості зерна. Використання жорстких режимів зневоднення спричиняють незворотні процеси, що призводять до зниження технологічних характеристик збіжжя. Неприятливі зміни якостей зернових культур можуть розпочатися не тільки через перегрівання, а й через швидке видалення вологи, що призводить до порушення мікро- і макроструктури тканини зерна. Неприпустимо також пересушування зерна нижче встановленої вологості через зростаючі витрати енергії

[3, 4]. При використанні зернових культур як посівного матеріалу критерієм оцінки якості термообробки є його схожість. Головною часткою зерна є зародок, що складається з живих клітин дуже чутливих до температури, тому температурні параметри сушильного агента жорстко лімітовані.

Методи досліджень

Дослідження кінетики зневоднення зернових культур проводились при наступних параметрах сушильного агента: температура – від 40 до 70 °С, вологовміст – від 8 до 15 г/кг сухого повітря, швидкість – від 0,2 до 2 м/с. Дослідження проводились як в елементарному, так і в щільному продувному шарі. В якості об'єкта досліджень використано зерна пшениці. За дві доби до проведення дослідів зерно зволожували, для чого визначали масу води [5, 6], яку треба додати для досягнення необхідної вологості.

Аналіз одержаних результатів

Вибір оптимальних режимів сушіння і методів інтенсифікації ґрунтується на результатах експериментальних досліджень за умов забезпечення максимального видалення вологи, мінімальної тривалості процесу та досягнення належної якості зерна і високих техніко-економічних показників. Температуру сушильного агента, як основного параметра, що впливає на інтенсивність процесу, вибирають виходячи з установлених значень максимально допустимої температури зерна, його початкової вологості, а також способу ведення процесу.

На рис. 1, а наведено криві кінетики сушіння $W = f(\tau)$ зерна в діапазоні температур: 40, 50, 60, 70 °С. Аналіз графічного матеріалу свідчить, що з підвищенням температури тривалість процесу скорочується в 2...5 разів.

Побудовані криві швидкості сушіння рис. 1, б в координатах $dW/dt = f(W_{\text{пр}})$ показують, що на стадії прогрівання швидкість сушіння збільшується до свого максимального значення, потім знижується. Найінтенсивніша швидкість видалення вологи спостерігається в режимі теплоносія 70 °С, в низькотемператур-

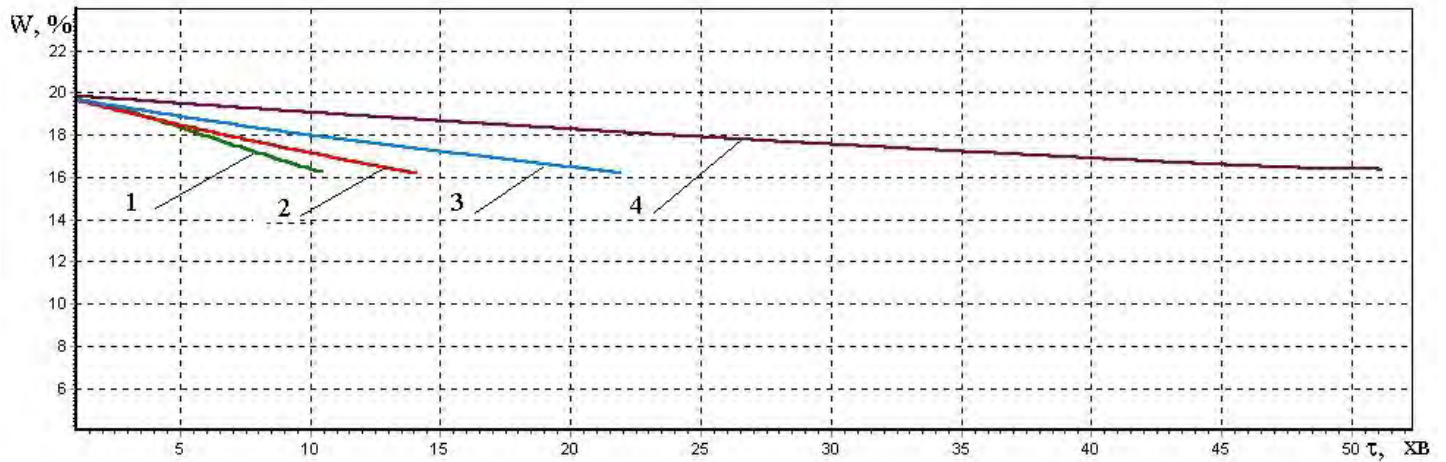
ному режимі 40 °С швидкість сушіння падає майже втричі.

Аналіз температури матеріалу в дослідженому діапазоні температур показав, що вже через 1,5 хв. від початку сушіння в режимі 70 °С та на другій хвилині в режимі 60 °С температура зернини сягає 50 °С, наприкінці процесу – 67 та 57 °С відповідно. Враховуючи, що гранично допустима температура нагрівання зерна насінневого призначення коливається в межах 45...50 °С [7, 8, 9], можливості прискореного конвективного сушіння завдяки зростанню температури сушильного агента обмежені, оскільки навіть невисокі її значення негативно вплинуть на насінневі властивості зернових культур.

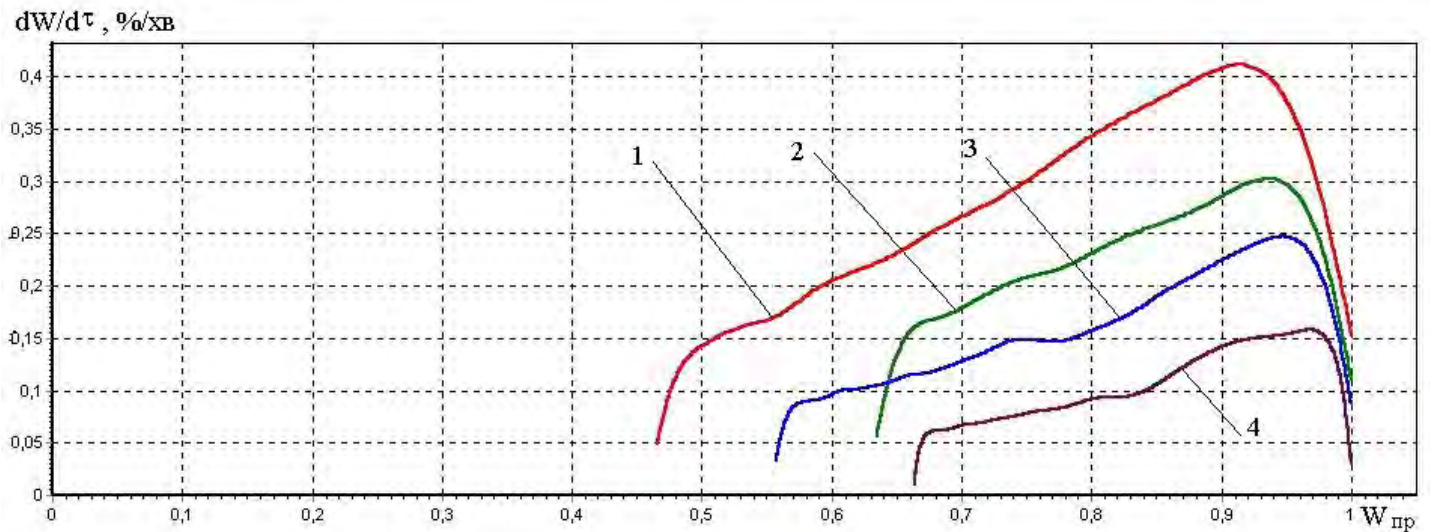
При температурі теплоносія 50 °С, при відповідній початковій вологості зерна, інтенсивність процесу, в порівнянні з вищевказаними, знижується, але, як видно з рис. 2, температура матеріалу стрімко зростає тільки на початку процесу і знаходиться в межах допустимої температури нагрівання зерна. Найменший перепад температур між матеріалом і сушильним агентом складає $\Delta t = 5$ °С. Отже, саме цей тепловий режим сушильного агента прийнятий за оптимальний і подальші дослідження проводились у зазначеному режимі. Сушіння зерна в режимі теплоносія 40 °С виключається через надмірну тривалість процесу, і як наслідок, додаткові енерговитрати.

Початкова вологість свіжозібраного збіжжя варіюється в залежності від виду культури, метеорологічних умов під час збирання врожаю, умов зберігання до теплової обробки, тощо. Результати експериментальних досліджень свідчать, що із збільшенням початкової величини вологості лише з 19 до 22 % тривалість процесу зростає на 60 %.

На рис. 3 приведено результати експериментальних досліджень щодо впливу питомого навантаження зерна у вигляді кривих сушіння. Аналіз побудованих кривих сушіння показує, що збільшення питомого навантаження зерна вдвічі призводить до уповільнення



а)



б)

**Рис. 1. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння зерна при $V = 1,6$ м/с; $g = 2,58$ кг/м²; $d = 10$ г/кг сухого повітря: 1 – $t = 70$ °С; 2 – 60; 3 – 50; 4 – 40 °С.
а) – $W = f(\tau)$; б) – $dW/d\tau = f(W_{пр})$.**

вологівіддачі, швидкість сушіння зменшується, тривалість процесу зростає на 25 %.

Таким чином, проведені дослідження показали вплив режимних параметрів сушильного агента на кінетику процесу. Узагальнюючи вищеведене, можна сказати, що зміна режимів сушіння впливає на інтенсивність процесу, характер кривих залишається незмінним. Оптимальні значення параметрів виявляються за умов підвищення інтенсивності процесу і якості кінцевого продукту, що пред'являються

до насінневого зерна відповідно з ГОСТ 28293 – 89 [3].

Результатами наших попередніх досліджень встановлено, що при сушінні термолабільних матеріалів, коли інтенсифікація процесу обмежена величиною гранично допустимої температури, що ми і маємо в даному випадку, впливати на інтенсивність процесу масопереносу можливо змінюючи вологовміст сушильного агента [10]. Це особливо важливо за умови низькотемпературного сушіння збіжжя насінневого при-

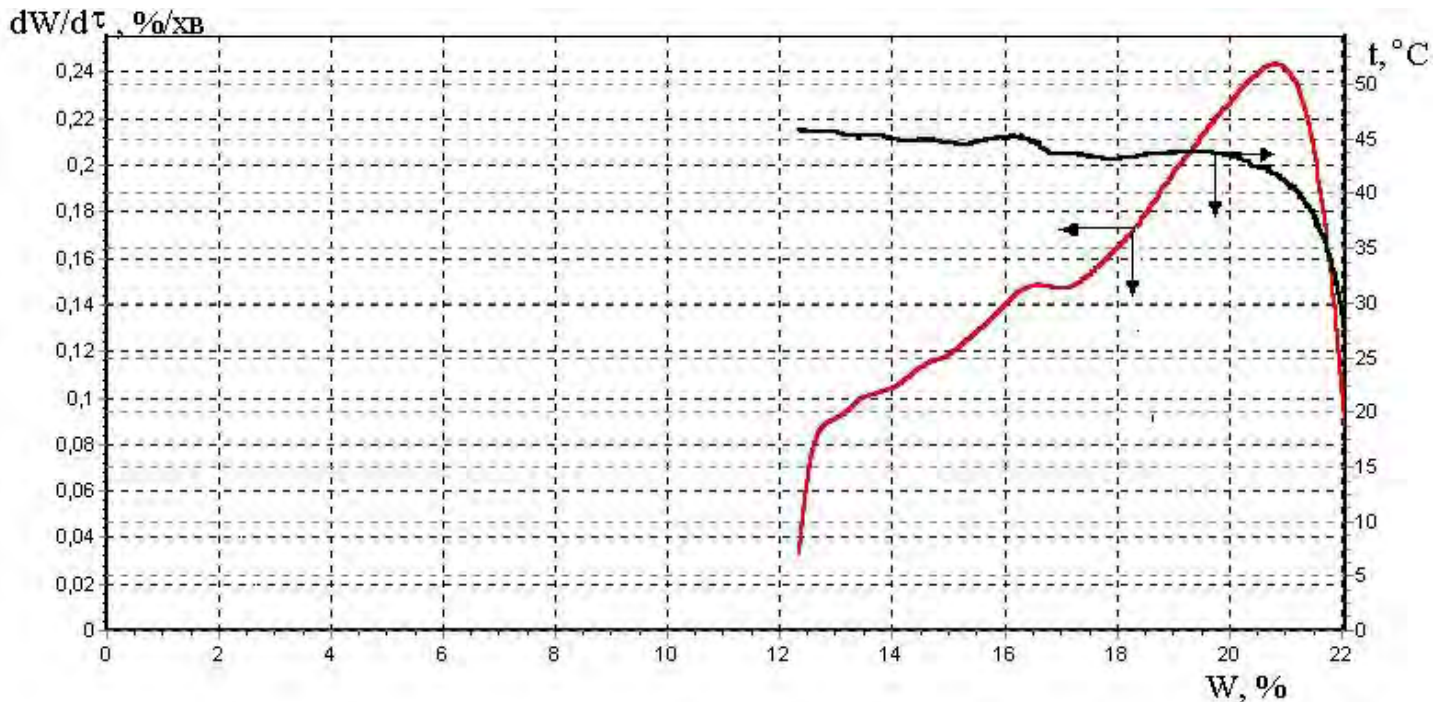


Рис. 2. Зміна температури зерна і швидкості сушіння
 $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $V = 1,6 \text{ м/с}$; $g = 2,58 \text{ кг/м}^2$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря.

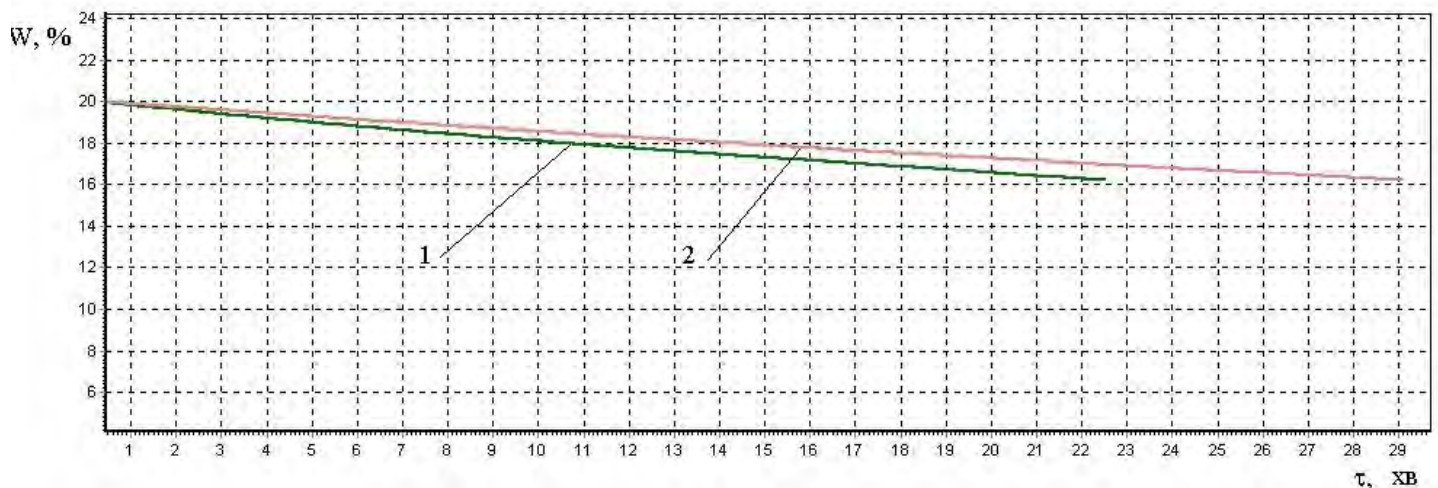
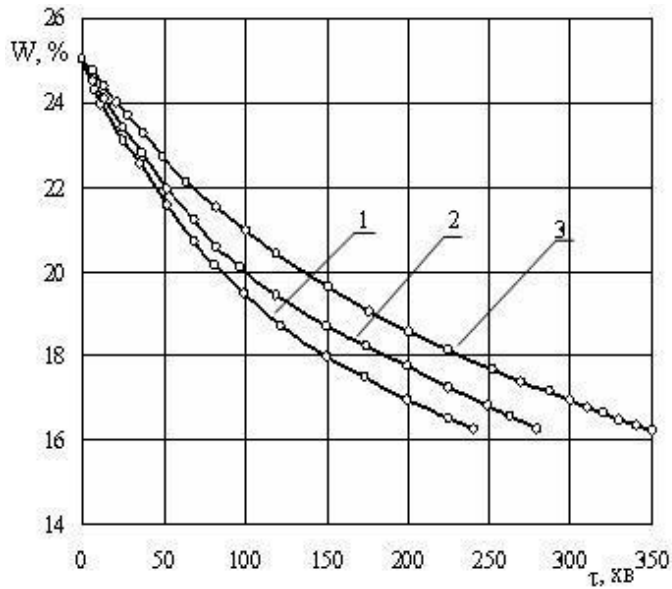


Рис. 3. Вплив питомого навантаження зерна на кінетику сушіння при
 $t = 50 \text{ }^\circ\text{C}$; $V = 1,6 \text{ м/с}$; $d = 10 \text{ г/кг}$ сухого повітря: 1 – $g = 2,58 \text{ кг/м}^2$; 2 – $g = 5,17 \text{ кг/м}^2$.

значення.

Відповідно до результатів експериментальних досліджень щодо впливу вологовмісту сушильного агента на кінетику процесу зневоднення зерна (рис. 4), при зниженні вологовмісту з 15 до 10 г/кг сухого повітря при температурі

матеріалу $45 \text{ }^\circ\text{C}$ інтенсивність процесу сушіння збільшується до 25 %, а подальше зниження вологовмісту сушильного агента до 8 г/кг сухого повітря забезпечує зростання інтенсивності до 35 % – тривалість перебування зерна у нагрітому стані скорочується. Отже, за раху-



**Рис. 4. Вплив вологовмісту теплоносія на процес сушіння зерна при $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$; $V = 0,23\text{ м/с}$; $g = 142\text{ кг/м}^2$:
1 – $W = 8\text{ г/кг сух. пов.}$; 2 – 10;
3 – 15 г/кг сух. пов.**

нок зниження вологовмісту сушильного агенту зростає рушійна сила процесу, спостерігається інтенсифікація процесу тепломасообміну.

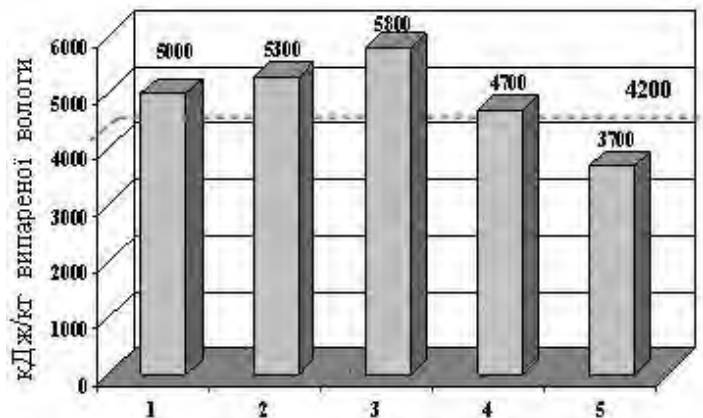
Зниження вологовмісту і ефективно регулювання температури сушильного агента з одночасною утилізацією теплоти конденсації пари вилученої вологи, можна здійснити при використанні конденсаційного методу сушіння в поєднанні з теплонасосним циклом. З цією метою створена конденсаційна зерносушарка ТНЗШ-0,5 з використанням парокомпресійного теплового насосу продуктивністю 70...120 кг/год висушеного матеріалу. Питомі витрати електричної енергії на випаровування вологи залежно від початкової вологості зневоднюваного матеріалу становлять 0,4...0,7 кВт·год/літр [10].

Згідно з результатами досліджень по впливу різних параметрів і методів сушіння на схожість зернових культур [9], домінуючим фактором, що впливає на насінневі показники є температура сушильного агента. Найкраща життєздатність насіння спостерігається в режимі низькотемпературного зневоднення $t = 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Порівняльний

аналіз щодо питомих витрат енергії в існуючих зерносушарках показує, що розроблена зерносушарка становить гідну конкуренцію відомим сушильним установкам, що підтверджуються даними наведеними на рис. 5. Її невелика продуктивність дає змогу забезпечити теплову обробку малих партій зерна, що особливо ефективно при сушінні насінневих культур для фермерських та насіннево-селекційних господарств.

Висновки

За результатами експериментальних досліджень кінетики сушіння зерна насінневого призначення встановлені режими його зневоднення та розроблені шляхи інтенсифікації процесу сушіння, засновані на застосуванні сушильного агента з низьким вологовмістом. Створена конденсаційна зерносушарка з використанням теплового насоса дозволяє знизити витрати первинної енергії на видалення 1 кг вологи в 1,5...2 рази. Широке застосування в зерносушінні конденсаційного методу в поєднанні з теплонасосним циклом дозволить отримати економію палива в обсязі 0,14...0,16 млн. т у.п. на рік.



--- **максимально-допустимі питомі витрати [3]**

**Рис. 5. Питомі витрати теплової енергії в існуючих зерносушарках
1 – прямоочна шахтна ДСП-32-0Т;
2 – рециркуляційна шахтна РД-2-25-70;
3 – пересувна ЗСПЖ-8; 4 – барабанна СЗСБ-8; 5 – теплонасосна ТНЗШ-0,5.**

ЛИТЕРАТУРА

1. Семерак Р.Р. Как сохранить выращенный урожай? // Эксклюзив. – 2007. – №2. – С.27.
2. Бондар О. Сушильне та очисне обладнання для зерна//Агроexpert.–2009.– № 11.– С. 102–105.
3. ГОСТ 28293 – 89. Зерносушилки шахтные. Показатели энергопотребления. – М.: Издво стандартов, 1990 – 4 с.
4. Резчиков В.А., Савченко С.В. Энергосберегающие технологии сушки зерна / I Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». Труды конференции.– Т.4, М.: – 2002. – С.35–38.
5. Фертман Г.И., Шойхет М.И. Биохимические и технологические основы бродильных производств.– М.: Пищевая промышленность, 1970. – 248 с.
6. Сычуглов Н.П., Наймушин М.И. Исследование процесса сушки зернового слоя применительно к технологическому процессу сушилки СБНД-10 / I Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов)». Труды конференции.– Т.4, М.: 2002. – С. 44–47.
7. Станкевич Г.М., Страхова Т.В., Атаназевич В.И. Сушіння зерна.– К.: Либідь, 1997.– 352 с.
8. Авдеев А.В., Авдеева А.А., Начинов Д.С., Тухватуллин М.М. Сушка зерна и зерновых смесей повышенной и высокой влажности // Наукові праці ОНАХТ, випуск № 29.– Т.2.– С. 33–37
9. Ю. Снежкін, Р. Шапар, Ж. Петрова, Д. Чалаєв, В. Шаврин. Сушити насінневий ріпак оптимально за температури 50 °С конденсаційним методом. // Зерно і хліб.– 2007.– № 1.– С. 52.
10. Снежкін Ю.Ф., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С., Шапар Р.О., Хавін О.О., Дабіжа Н.О. Використання теплових насосів у процесах сушіння. // Промышленная теплотехника. – 2006. – Т. 28, № 2.– С. 106 – 110.

Получено 14.05.2010 р.