НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ
ІНСТИТУТ ТЕХНІЧНОЇ ТЕПЛОФІЗИКИ

Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк, Ж.О. Петрова, Д.М. Чалаєв

ТЕПЛОНАСОСНА ЗЕРНОСУШАРКА ДЛЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА

Київ – 2012

УДК 664.723.047

Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк, Ж.О. Петрова, Д.М. Чалаєв

Теплонасосна зерносушарка для насіннєвого зерна. Київ: ТОВ «Поліграф-Сервіс», 2012. – 154 с.

В монографії розглянуті властивості насіннєвого зерна як об’єкту сушки, проведений огляд досліджень та сучасний стан обладнання для сушіння насіннєвого зерна.

Поставлена задача з підвищення інтенсивності та енергетичної ефективності сушіння насіннєвого зерна з збереженням високої схожості посівного матеріалу вирішується через визначення раціональних режимів сушіння насіннєвого зерна та розробкою енергоефективного обладнання із застосуванням теплових насосів.

Представлені результати експериментальних та теоретичних досліджень, основних закономірностей сушіння насіннєвого зерна конвективним та конденсаційним методом, отримані залежності інтенсивності та питомих витрат теплоти від режимів сушіння в теплонасосній зерносушарці.

Видання призначено для студентів, магістрів та аспірантів інженерно-технічних спеціальностей зернопереробної промисловості, які займаються дослідженням процесів сушіння зерна і розробкою зерносушильної техніки.

ВСТУП

На сучасному етапі розвитку зерносушіння в Україні та світі постала нагальна потреба в створенні та розробці високоефективної зерносушильної техніки, яка б забезпечувала мінімальні витрати енергії та високу схожість насіннєвого матеріалу.

При сушінні тони зерна в середньому необхідно видалити 70…80 кг вологи, що при врожаї в 35…40 млн. тонн приводить до витрат умовного палива від 0,4 до 0,7 млн. тонн. Витрати часу на сушіння зерна складають до 70% від часу збирання врожаю.

При сушінні зерна насіннєвого призначення витрати теплоти збільшуються в 1,3 рази в порівнянні з продовольчим та технічним зерном, це пов’язано з якістю насіння. Тому одним з напрямком інтенсифікації та зниження енергоспоживання при сушінні зерна міститься у використанні теплонасосного методу сушіння і створення на його базі енергоефективних та екологічно безпечних апаратів для термічної обробки зерна.

Отже, проблему інтенсифікації та енергозбереження під час сушіння насіннєвого зерна необхідно розглядати і вирішувати у нерозривному зв’язку з технологічною задачею найбільш повного збереження якості насіння.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНИЙ СТАН ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА

1.1. Характеристика насіннєвого зерна як об’єкту сушіння

Зерно являє собою живий організм, в якому відбуваються життєві процеси дихання і росту. У структурному відношенні зернина є анізотропним колоїдним капілярно-пористим тілом із складною будовою його окремих частин [1]. Так, верхні або плодові оболонки основних злакових культур (пшениці та жита) складаються із трьох шарів щільних здерев’янілих клітинних стінок з великою кількістю капілярів і мікропор, через які пари води може легко проходити всередину зернини та цим самим видаляться під час сушіння зерна (рис. 1.1).

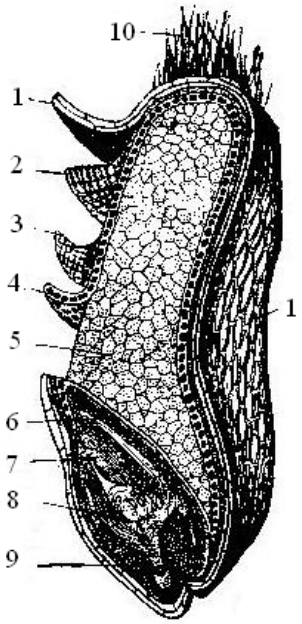


Рис. 1.1. Повздовжній розріз пшеничного зерна:
1 – 3 – оболонки (плодові і насіннєві); 4 – алейроновий шар; 5 – ендосперм;
6 – щиток; 7 – зародок; 8 – брунька; 9 – корінець; 10 – борідка.

У зернинах вівса, ячменю, рису, проса плодові оболонки покриті ще квітковою оболонкою, що значною мірою уповільнює їх сушіння. Оболонки другого шару називають насіннєвими. Вони також складаються із трьох шарів (верхнього – прозорого, середнього – пігментного та нижнього – прозорого набухаючого). Плодові оболонки зерна пронизані капілярами і тому є проникними для газів і пари води.

Під насіннєвими оболонками є алейроновий шар, що складається з одного ряду товстостінних клітин. Насіннєві оболонки і алейроновий шар характеризуються відносно малою проникністю і при неправильному режимі сушіння можуть бути причиною утворення закалки і набухання зерна, викликаного затримкою водяних парів, накопиченого всередині ендосперми.

За ним розташовується основна частина зернини – ендосперм, яка складається з тонкостінних великих клітин, заповнених в основному

крохмальними зернами. Головна частина зернини – її зародок. На відміну від оболонок та ендосперми, його тканини складаються із живих клітин, дуже чутливих до діїтемпературі [2,3].

При відборі найбільш цінного насіння враховують зв'язок між біохімічними властивостями насіння, які обумовлюють врожайність та цінність даної культури та їх фізико – механічними параметрами.

До **фізико-механічних властивостей** насіння можна віднести [2,4,5]:

Розміри і форма. Насіння культурних рослин та домішок розрізняють за розмірами. Сортування за розмірами, досягається розділенням і по масі.

Аеродинамічні властивості матеріалу характеризуються швидкістю вітання, тобто величиною відносної швидкості повітряного потоку. Завдяки різниці в швидкостях вітання вдається видалити з основної культури домішки та відокремити легке насіння від тяжкого.

Стан поверхні насіння залежить від зрілості, вологості та впливає на характер їх руху в різних умовах.

Питома вага насіння неоднаково у різних культур, вона залежить від хіміко-біологічних властивостей, зрілості та вологості насіння. З підвищенням вологості він збільшується для легкого насіння ($\gamma < 1$), не змінюється у насіння з
$\gamma = 1$ і зменшується для важкого насіння ($\gamma > 1$). За питомою вагою можна виділити не тільки важке та легке насіння, але зрілі та недозрілі, сухі та вологі.

Шпаруватість зернової маси – відношення об'єму міжзернового простору до всього об'єму, що займає зернова маса. Зернова маса в свою чергу залежить від форми та розмірів зернин основної культури, стану її поверхні, засміченості зернової маси, способу укладання зерна. Чим більші зернини, тим більша шпаруватість зернової маси.

Щільність укладання зернин кожної культури може характеризуватись величиною, яка називається насипною щільністю. Ця величина, як і шпаруватість зернової маси, залежить від культури та вологості зерна.

Сипучість зернової маси – характеризується кутом природного укосу, який залежить від розмірів і форми зернин, стану їх поверхні, а також від характеру домішок. З підвищенням вологості сипучість зернової маси зменшується (кут природного укосу збільшується). Сипучість зернової маси враховують під час вибору розмірів, форми, кутів нахилу різних вузлів зерносушарок (коробів, самопливних труб, випускних пристроїв та ін.).

Об'ємна маса (насипна маса), тобто маса в одиниці об'єму, залежить від питомої ваги насіння та щільності вкладання на яку впливає вологість, розміри, форма та стан поверхні.

Абсолютною масою насіння, або масою 1000 шт. в грамах, характеризує вміст живильних речовин. Оскільки цей показник визначає властивості не окремого насіння, а їх сукупності, він дає уявлення про середню масу насіння.

Фізико – механічні властивості зернових та олійних культур представлені в таблиці 1.1, ріпак різних сортів взяті зразки 1– 3 урожаю 2004 р та зразок 4 урожаю 2005р [6].

Таблиця 1.1. Фізико – механічні властивості олійних та зернових культур [6]

Культура	Розміри насіння, мм			Швидкість витання, м/с	Питома вага, г/см^3	Насипна щільність, кг /м^3	Маса 1000 насінин, г	Коефіцієнт зовнішнього тертя
	довжина	ширина	товщина					
Ріпак (зразок 1)	1,65 – 2,32	1,64 – 1,89	1,56 – 1,86	5,2 – 9,9	1,3	688	4,8	0,283 –0,356
Ріпак (зразок 2)	2,12 – 2,84	1,84 – 2,61	1,84 – 1,94	4,9 – 10,5	1,2	667	5,2	0,255 –0,396
Ріпак (зразок 3)	1,91 – 2,04	1,76 – 1,98	1,44 – 1,78	8,8 –11,2	1,0	661	5,7	0,274 – 0,299
Ріпак (зразок 4)	1,38 – 2,01	1,15 – 1,78	1,15 –1,79	5,6 – 8,4	0,8	684	3,2	0,213 –0,268
Соняшник	7,5 –15,0	3,5 – 8,6	1,7 – 6,0	4,0 – 14,0	0,73 – 0,94	260 – 440	53 – 69	0,6 – 1,0
Соя	5,0 – 10,5	4,6 – 8,0	4,0 – 7,0	9,0 – 20,2	1,05 – 1,3	720	30 – 520	0,73
Льон олійний	3,2 – 6,0	1,7 – 3,2	0,5 – 1,5	3,5 – 8,5	1,0 – 1,25	630 – 730	4 – 8	0,43 – 0,45
Пшениця	4,2 – 8,6	1,6 – 4,0	1,5 – 3,8	8,9 – 11,5	1,2 – 1,5	650 – 810	22 – 42	0,47 – 0,73
Жито	5,0 – 10,0	1,4 – 3,6	1,2 – 3,5	8,4 – 10,5	1,2 – 1,5	660 – 790	13 – 32	0,47 – 0,7
Ячмінь	7,0 – 14,6	2,0 – 5,0	1,4 – 4,5	8,4 – 10,8	1,3 – 1,4	430 – 750	31 – 51	0,51
Овес	8,0 – 18,6	1,4 – 4,0	1,2 – 3,6	7,0 – 9,0	1,2 – 1,4	390 – 500	20 – 42	0,51
Кукурудза	5,5 – 13,5	5,0 – 11,5	2,5 – 8,0	9,8 – 17,0	1,3 – 1,4	600 – 820	286	0,53

Таблиця 1.2. Основні фізико – механічні властивості насіння ріпаку [7,8,9]

Властивість		Сорт											
		[6] Український (озимий)		[7] Східносибірський (озимий)					[8] Світоч (озимий)				
Вологість ріпаку, %		6,2	7,8	6,0	12,8	17,4	23,4	28,2	6,0	10,6	16,6	20,0	23,4
Маса 1000 насінин, г		4,8	5,2	5,2	5,41	5,48	5,56	5,63	3,70	3,71	3,75	3,77	4,45
Насипна щільність, кг/м^3		688	667	662	657	656	641	638	600	598	600	596	597
Кут природ. укосу, град		24	26	20º15´	20º20´	20º50´	21º10´	21º50´	31º20´	30º54´	32º22´	33º38´	32º57´
Кут зовнішнього тертя спокою	по сталі	0,283	0,285	0,287 – 0,466			0,325 – 0,510		0,292	0,300	0,315	0,287	0,322
	по алюмінію	–	–	–	–	–	–	–	0,237	0,255	0,325	0,335	0,328
	по пластмасі	0,356	0,309	–	–	–	–	–	0,194	0,219	0,364	0,338	0,401
	по гумі	0,302	0,396	0,466 – 0,541		0,499 – 0,625			0,262	0,246	0,352	0,322	0,364
Коефіцієнт тертя руху		0,321	0,262	–	–	–	–	–	0,338	0,356	0,400	0,414	0,418
Пористість шару, %		67,53	68,51	–	–	–	–	–	56,7	59,2	58,5	56,6	59,7
Шпаруватість,%		32,47	31,49	–	–	–	–	–	43,3	40,8	41,5	43,4	40,3

Фізико – механічні властивості зерна залежать від сорту та вологості насіння. Для насіння ріпаку збільшенням вологості з 6 до 23,4% (табл.1.2) приводить до збільшення майже всіх властивостей: маси 1000 насінин на 9 – 20%, кута природного укосу на 1°30´, кута зовнішнього тертя спокою в залежності від поверхні на 1,1 – 2 рази, коефіцієнта тертя руху на 24% та пористості шару на 3 – 5% [7,8,9].

Зерно за **хімічним складом** поділяється на воду, білки, вуглеводи, клітковину, жири та золу. Крім біологічних реакцій, в зерні під час сушіння можуть відбутись структурно – механічні зміни: ущільнення або розрив оболонок, розтріскування ядра та ін. – зміни цих показників пов'язані з хімічним складом зерна (табл. 1.3) [3,6].

Таблиця 1.3. Хімічний склад зерна різних зернових культур (в %) [3,6]

Культура	Вода	Білки	Вуглеводи	Клітковина	Жири	Зола
Пшениця м'яка	14,0	12,0	68,7	2,0	1,7	1,6
Пшениця тверда	14,0	13,8	66,6	2,1	1,8	1,7
Ріпак озимий	5,2	25,03	14,54	6,27	45,27	3,69
Ріпак яровий	5,8	26,34	14,95	5,37	40,35	5,37
Ячмінь	14,0	10,5	64,4	4,5	2,1	2,5
Овес	12,8	10,2	59,7	10,0	5,3	3,0
Кукурудза	14,0	10,0	67,9	2,2	4,6	1,3

Важливе значення при оцінці зерна, а також для характеристики його проростання мають білки. Як видно, з табл. 1.4, основна кількість білків міститься в зародку, причому ці білки різко відрізняються від білків ендосперми. Білок зародку – водорозчинний альбумін, є термолабільним: при нагріванні він легко денатурується, внаслідок чого при неправильному режимі сушіння зерно втрачає схожість.

Таблиця 1.4. Хімічний склад анатомічних частин пшеничного зерна [1]

Частина зерна	Масове співвідношення часток	Білки	Крохмаль	Цукор	Клітковина	Пентозани	Жири	Зола
Ціле зерно	100,00	16,00	63,07	4,32	2,76	8,10	2,24	2,12
Ендосперм	81,60	12,91	78,82	3,52	0,15	2,72	0,68	0,45
Зародок	3,20	41,30	0	25,12	2,46	9,74	15,04	6,32
Оболонка з алейроновим шаром	15,20	28,75	–	4,18	16,20	36,65	7,78	10,51

Хімічний склад насіння ріпаку в залежності від етапу обробки показаний в таблиці 1.5. Так, насіння має найбільший вміст олії на рівні 44,5%, при подальшому знежиренні ріпаку, перетворюється в білкововмістний продукт у вигляді жмиху або шроту.

Таблиця 1.5. Хімічний склад від етапу обробки насіння ріпаку [9,10]

Назва	Білки	Жири	Вуглеводи	Клітковина	Зола	Автори
Насіння	22,5	44,5	22,8	6,5	4,6	[11]
Жмих	37,4	9,0	27,1	18,2	8,3	[12]
Шрот	41,7	2,5	34,0	13,4	8,4	[12]

Знання про **гігроскопічні властивості** зерна має більш практичне значення для наукового обґрунтування вибору раціональних режимів вентилювання, сушіння та визначає необхідні умови зберігання насіння.

Рівноважна вологість є основною характеристикою гігроскопічних властивостей зернових матеріалів. Знання закономірностей зміни рівноважної вологості зернових культур в залежності від вологості повітря та температури необхідно для викривання механізму процесу сушіння та зволоження. Сушіння та зволоження є типовим незворотнім процесом, які в кінцевому рахунку приводять до рівноваги між матеріалом та навколишнім повітрям. Чим більше система зерно – повітря від стану рівноваги, тим більша рухома сила процесу.

Зміна рівноважної вологості залежить від відносної вологості повітря, так при високій відносній вологості повітря 75 – 90% і температурі 25 ºС рівноважна вологість зерна (табл. 1.6) перевищує вимогам за вологістю до сухого зерна (табл. 1.8), що при зберіганні може привести до його зволоження. Підвищення температури теплоносія зменшує рівноважну вологість матеріалу, що доцільно проводити при високій вологості повітря (табл. 1.7).

Таблиця 1.6. Рівноважна вологість насіння олійних та зернових культур при температурі 25ºС [2,11]

Культура	Рівноважна вологість насіння при відносній вологості повітря,%							
	30	40	50	60	70	75	80	90
Пшениця	9,1	10,7	12,0	13,7	15,6	16,6	17,6	23,0
Ріпак	4,9	5,7	6,6	7,4	8,8	10,2	11,9	17,4
Ячмінь	8,3	9,8	11,5	13,2	15,1	16,1	17,3	23,1
Овес	8,0	9,5	11,0	12,5	14,3	15,4	16,7	22,0
Кукурудза	9,4	10,5	11,6	12,7	13,8	15,6	17,6	23,0

Таблиця 1.7. Рівноважна вологість олійних та зернових матеріалів при різній температурі та відносної вологості повітря [11,12,13]

Культура	Температура, °C	Відносна вологість повітря, %									Автор
		10	20	30	40	50	60	70	80	90	
Ріпак	20	4,06	4,5	5,0	5,94	6,87	8,12	9,87	13,12	20,06	[12]
	40	2,18	2,81	3,37	4,06	5,0	6,12	7,5	9,48	15,0	
	60	1,25	1,75	2,06	2,56	3,25	4,06	5,0	7,5	11,25	
	80	0,62	0,75	0,94	1,25	1,87	2,5	3,43	5,0	9,37	
Ріпак	25	–	–	4,9	5,7	6,6	7,4	8,8	11,9	17,4	[11]
Ріпак	3	–	–	–	–	9,4	9,7	10,5	11,3	–	[13]
	15	–	–	–	–	7,0	7,8	9,0	10,0	–	
	26	–	–	–	–	6,0	6,9	8,0	9,6	–	
	20	–	8,2	9,4	10,7	11,9	13,2	14,9	16,9	19,2	
	30	–	7,9	9,0	10,1	11,2	12,4	13,9	15,9	18,3	

Таблиці 1.8. Класифікація стану зерна за вологістю ДСТУ 4966:2008 [1,14]

Культура	Вологість зерна,%					
	сухе – до	Середньої сухості		Вологе		сире – вище
		вище	до	вище	до	
Пшениця	14	14	15,5	15,5	17	17
Ріпак	8	8	10	10	12	12
Ячмінь	14	14	15,5	15,5	17	17
Овес	14	14	16	16	18	18
Кукурудза	14	14	16	16	18	18

До **теплофізичних характеристик матеріалів** відносяться питома c або об'ємна ($c\gamma$) теплоємність, коефіцієнти теплопровідності λ, температуропровідності a та теплової активності ε. Вони залежать від хімічного складу, фізичних і структурних характеристик,а також від параметрів стану (насипної щільності, шпаруватості, щільності укладання, вологості, температури та ін.). Ці характеристики значно змінюються в процесі обробки та зберігання зерна і продуктів переробки. Від їхніх значень залежать резерви інтенсифікації процесу сушіння.

Питома теплоємність c характеризує властивість матеріалу акумулювати теплоту при підвищенні її температури.

Коефіцієнт теплопровідності λ визначає теплоізоляційні властивості матеріалу за наявністю градієнту температури і характеризує стаціонарне теплопередавання.

Коефіцієнт температуропровідності a визначає теплоінерційні властивості матеріалу і характеризує нестаціонарність нагрівання або охолодження ($м^2/с$ або $м^2/ч$):

$$a = \frac{\lambda}{(c\gamma)} \tag{1.1}$$

Коефіцієнт теплозасвоєння або теплова активність характеризує теплозасвоєння матеріалу при кондуктивному підведенні теплоти ($Дж/(м^2 \cdot К \cdot с^{1/2})$):

$$\varepsilon = \sqrt{\lambda(c\gamma)} \tag{1.2}$$

або можна виразити :

$$\varepsilon = c\gamma\sqrt{a} \tag{1.3}$$

тобто коефіцієнт теплозасвоєння – це комплексна характеристика матеріалу, яка враховує теплоакумулюючу властивість і теплоінерційні властивості.

Коефіцієнт ε використовують в розрахунках кондуктивного теплообміну між поверхнею коробу та шару зерна в шахтній зерносушарці.

Зміна питомої теплоємності для інших видів зернових культур (пшениці, ячменю, гороху) від вологості зерна 10 до 30% при температурі 20ºС в 1,7 раз, а при температурі змінюється 50ºС в 1,32 рази (табл. 1.9) [2].

Таблиця 1.9. Питома теплоємність *c* (Дж/(кг· К)) пшениці та ячменю [2]

Вологість зерна,%	Температура зерна, ºС						
	0	10	20	30	40	50	60
10	1428	1498	1568	1638	1707	1777	1847
11	1491	1558	1626	1696	1762	1832	1903
12	1558	1622	1687	1752	1817	1880	1943
13	1619	1681	1743	1804	1866	1920	1990
14	1682	1740	1799	1857	1915	1973	2031
15	1747	1801	1855	1910	1964	2018	2073
16	1802	1852	1903	1953	2004	2055	2105
17	1861	1906	1952	1997	2042	2088	2133
18	1934	1967	2000	2041	2082	2122	2163
19	1975	2010	2046	2081	2116	2152	2187
20	2031	2062	2092	2122	2152	2184	2215
21	2084	2108	2133	2158	2183	2208	2232
22	2138	2157	2176	2195	2214	2233	2252
23	2190	2203	2216	2229	2242	2254	2267
24	2242	2249	2256	2263	2269	2276	2283
25	2292	2292	2292	2292	2292	2292	2292
26	2340	2334	2329	2323	2317	2312	2306
27	2396	2382	2369	2356	2342	2328	2315
28	2439	2418	2398	2378	2358	2338	2317
29	2488	2460	2432	2404	2376	2348	2321
30	2533	2498	2464	2430	2396	2362	2328

Теплофізичні характеристики насіння ріпаку залежать від сорту, вологості та температури [17,18,19,20,21,22,23,24,25]. При вологості насіння ріпаку 0 – 20% і температурі 22 – 90ºС: питома теплоємність становить c = 1062 – 2244 Дж/(кг· К); коефіцієнт теплопровідності λ = 0,075 – 0,179 Вт/(м·К); коефіцієнт температуропровідності $a \cdot 10^8$ = 9,0 – 27,8 м^2/с; коефіцієнт теплової активності ε = 224 – 480 Дж/(м^2·К·с$^{1/2}$) (табл. 1.10).

Таблиця 1.10. Теплофізичні характеристики насіння ріпаку при різній вологості та температурі [15,16,17,18]

Сорт ріпаку	Вологість ріпаку W, %	Температура t, ° C	Насипна щільність γ, кг/м^3	Питома теплоємність *c*, Дж/(кг· К)	Коефіцієнт температуропровідності $a \cdot 10^8$, м^2/с	Об'ємна теплоємність $(c\gamma) \cdot 10^{-6}$, Дж/(м^3·К)	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·К)	Коефіцієнт теплової активності ε, Дж/(м^2·К·с$^{1/2}$)	Автор
Світоч	6	22	633	1062	11,1	0,672	0,075	224	(15)
		62	633	1363	27,8	0,863	0,230	445	
	10	22	622	1215	12,3	0,756	0,093	265	
		36	622	1237	13,9	0,767	0,101	286	
		44	622	1389	18,5	0,864	0,160	371	
	15	24	614	1498	13,9	0,92	0,128	343	
		36	612	1781	11,1	1,090	0,121	363	
	20	24	600	2045	11,1	1,227	0,136	408	
		36	600	2107	13,9	1,290	0,179	480	
Не вказаний	0	–	553	2244	12,89*	1,241*	0,160	446*	(16)
Торх	5,54	2	712	1397	10,14	0,994*	0,095	307*	(17)
		19	711	1481	9,47	1,053*	0,103	329*	
	19,64	2	649	1807	9,42	1,173*	0,112	362*	
		19	628	1812	9,00	1,138*	0,120	370*	
Target	3,3	25 – 90	723	1528	9,5	1,104*	0,105	340*	(18)
Echo	7,87		712	1838	10,17	1,308*	0,133	417*	
Bronowaki	3,83		705	1541	9,67	1,072*	0,105	336*	
Arlo	8,07		727	1830	10,52	1,330*	0,140	432*	
	4,12		657	1432	10,83	0,94*	0,091	292*	
Oro	3,62		659	1537	9,67	1,013*	0,098	315*	
	8,4		639	1792	11,00	1,145*	0,126	380*	

* – вказані дані розраховані за формулами: 1.1, 1.2, 1.3.

Для розрахунку теплофізичних коефіцієнтів насіння ріпаку наведені формули розрахунків питомої теплоємності c, коефіцієнтів теплопровідності λ в залежності від одного [19,20,22,23,24,25] або двох факторів [24]: вологості та температури ріпаку (табл. 1.11).

Таблиця 1.11.Формули розрахунку теплофізичних коефіцієнтів [17,18,20-23]

Вологість ріпаку W, %	Температура T, К	Питома теплоємність c, Дж/(кг· К)	Коефіцієнт теплопровідності λ, Вт/(м·К)	Автор
0…27	283…323	$c = 1553 + 28{,}8 \cdot W$	–	[20]
0,75…19,64	292	$c = 1356 + 32{,}0 \cdot W$	–	[18]
0…28,5	283…293	$c = 1244 + 58{,}7 \cdot W$	$\lambda = 0{,}16 + 0{,}006 \cdot W$	[21]
0…40	291	$c = 2244 + 4{,}186$ u	$\lambda = 0{,}16 \cdot (1 + 2{,}668 \cdot$ u$)$	[17]
4,4…8,1	330	–	$\lambda = 0{,}063 + 0{,}0095 \cdot W$	[22]
6,1	277...305	–	$\lambda = 0{,}0066 + 0{,}000366 \cdot T$	[23]
8,0		–	$\lambda = 0{,}156 + 0{,}000366 \cdot T$	
11,6		–	$\lambda = -0{,}088 + 0{,}000769 \cdot T$	
12,8		–	$\lambda = -0{,}039 + 0{,}000634 \cdot T$	
5…22	278…329	–	$\lambda = 0{,}067 + 0{,}00215 \cdot W + 0{,}00157 \cdot T$	[22]

Для розрахунку питомої теплоємності c (кДж/(кг· К)) пшениці, ячменю, гороху запропонована наступна формула [2]:

$$C = \frac{W}{100} C_B + \frac{100 - W}{100} C_C \ , \qquad (1.4)$$

де: W – вологість зерна,%;

$c_в$ – питома теплоємність води (с = 4,19 кДж/(кг· К);

$c_с$ – питома теплоємність сухої речовини (с = 1,55 кДж/(кг· К).

1.2. Огляд досліджень з сушіння насіннєвого зерна

Огляд досліджень з сушіння насіннєвого зерна проводимо на насінні ріпаку, так як він найменш термостійкий до впливу температури, що істотно впливає на збереження біохімічних властивостей зерна.

Основним критерієм якості насіннєвого зерна є енергія росту та схожість, для продовольчого та технічного напрямку – кислотне число олії. Тому нами проводиться аналіз на предмет вибору режиму сушіння насіннєвого зерна, який би забезпечував високі якісні показники та підвищував інтенсивність процесу.

В роботі Артьомова І. В., Філатова Г. А., Мамонцева І.П. [24] інтенсивність сушіння насіння ріпаку в прямокутній вертикальній колоні

забезпечується високою температурою теплоносія 150ºС та швидкості руху 1,3 м/с з розташованій в ній 5-ма касетами висотою 50 мм. Прогрівання та вологовіддача в насінні по горизонтам шару йде не однаково, що приводить до перегрівання насіння і нерівномірному сушінні ріпаку при низькій схожості насіння ріпаку (табл.1.12).

Таблиця 1.12. Зміна якості сушіння насіння ріпаку по горизонтам шару [24]

Горизонти шару	Кінцева температура, ºС		Кінцева вологість, %	Тривалість сушіння, хв.	Схожість, С,%
	теплоносія над горизонтом	насіння в касеті			
1	32	37	28	120	86,0
2	46	39	28	120	87,5
3	51	45	25	120	86,0
4	65	60	12	120	85,0
5	136	130	7	15	0

В роботі Н. Я. Попова та ін. [25] інтенсивність процесу організовано за рахунок збільшення поверхні контакту зерна з теплоносієм в апараті з киплячим шаром (табл.1.13). Якісні показники насіння ріпаку – висока енергія росту та схожість забезпечується температурою теплоносія 70ºС та швидкістю 1,6 м/с. Подальше збільшення температури теплоносія до 80ºС та швидкості до 1,8 м/с знижує якісні показники насіння при збільшенні тривалості сушіння понад 250 с.

Таблиця 1.13. Зміна якості насіння ріпаку в процесі сушіння в киплячому шарі [32]

Параметри процесу				Показники якості насіння				
t, ºС	V, м/с	S, мм	τ, с	θ, С	W, %	Енергія росту, Е,%	Схожість, С, %	К.ч., мг КОН/ г
Вихідна якість насіння				8	16,9	75	90	1,51
70	1,6	100	290	49	13,5	74	90	1,6
			467	56	11	73	89	1,47
			590	64	9,3	63	84	1,36
Вихідна якість насіння				13	21,5	86	95	1,46
80	1,6	100	187	50	18,8	75	90	1,82
			342	60	14,4	70	86	1,74
			510	68	11,4	1	81	1,55
80	1,8	100	130	50	17,8	80	90	1,59
			250	60	14,3	70	80	1,22
			434	70	10,8	1	46	1,36

На кислотне число зазначені режими сушіння істотно не впливають і знаходяться в межах ± 0,3 мг КОН/г олії.

Вплив параметрів сушіння та сорту на якість ріпаку свідчить про те, що найбільш термостійким до температури 70ºС є сорт Галицький, який забезпечує високу схожість на рівні 94 – 95% (табл.1.14) [26]. Для сорту Світоч потрібно знижувати температуру теплоносія , так як схожість нижче 90% не відповідає вимогам до насіннєвого зерна за ДСТУ 2240 – 93. Кислотне число сорту Світоча в 2,5 – 3 рази більше за кислотне число сорту Галицький, але знаходиться в межах норми.

Таблиця 1.14. Вплив параметрів сушіння на якість насіння ріпаку [26]

Сорт	t, ºС	$W_п$, %	τ, хв	θ, ºС	Енергія росту, Е,%	Схожість, С, %	К.ч., мг КОН / г
Світоч	70	9,0	10	30	65,3	82,7	2,63
		21,5	30	45	50,0	64,0	3,00
	100	9,0	6	30	38,7	54,0	2,72
		21,5	22	60	5,0	11,3	3,00
Галицький	70	9,0	10	50	91,0	95,0	1,11
		21,5	28	62	84,0	94,0	1,16
	100	9,0	6	40	73,0	76,0	1,03
		21,5	19	65	5,0	14,0	1,02

Проведений аналіз показав, що потрібно зменшувати температуру нижче 70ºС, щоб досягнути високої схожості та енергії росту насіння ріпаку.

За даними досліджень представлених в табл. 1.12 – 1.14 можна скласти підсумкову табл. 1.15. При збільшенні температури теплоносія енергія росту та схожість насіння ріпаку відчутно зменшується і втрачає свої насіннєві властивості навіть при температурі 70 - 80ºС. Збільшення кислотного числа олії від дії температури не спостерігається.

Таблиця 1.15. Якість насіння ріпаку від режиму сушіння [24,25,26]

Параметри процесу				Показники якості			Автор
t, ºС	V, м/с	$W_п$, %	$W_к$, %	Енергія росту Е,%	Схожість, С, %	К.ч., мг КОН / г	
150	1,3	14	7	0	0	-	[24]
100	0,3	21,5	6	5	11	3,00	[26]
80	1,8	16,9	11,4	1	46	1,36	[25]
70	0,3	21,5	6	50	64	3.00	[26]
70	1,8	16,9	9,3	63	84	1,36	[25]

Сушіння насіннєвого зерна на промислових зерносушарках проводились на прямоточній шахтній зерносушарці М–819, яка складається з двох

прямоточних шахт, кожна з яких має дві колони і розділені між собою проміжною зоною сушіння. В кожній шахті вмонтовано датчики температури нагріву насіння. [24].

Сушіння відбувалось при температурі теплоносія 98ºС від початкової вологості ріпаку 14% до кінцевої вологості 7% (табл.1.16).

Таблиця 1.16. Посівні якості насіння ріпаку висушених на М – 819 [24]

Місце відбору проб	Енергія росту, Е,%			Схожість, С, %		
	дата визначення			дата визначення		
	22.08.	16.10.	12.11.	22.08.	16.10.	12.11.
Вихідне зерно	93,7	90,7	84,0	93,7	92,5	87,5
Шахта ліва, 1 колона	92,0	82,0	80,0	92,5	81,5	80,0
Шахта ліва, 2 колона	80,2	69,7	63,0	81,2	79,0	72,0
Шахта права, 1 колона	79,2	18,2	8,0	80,2	25,5	11,0
Шахта права, 2 колона	94,2	88	83,0	94,7	91,0	86,5
Загальний вихід сушарки	91,7	84,7	83,5	92,0	88,0	85,5

До насіннєвого зерна можна віднести ріпак висушений в шахті лівій 1 колонка і в шахті правій 2 колонка на 22.08., так як схожість насіння знаходиться в межах 92-94%. Все інше насіння втрачає значно в схожості та енергії росту.

Для сушіння насіннєвого зерна інших зернових культур при початковій вологості 19% у сушарках шахтного типу використовують режими зазначені в табл. 1.17. Якщо вологість зерна перевищує 19%, то застосовують ступінчаті режими сушіння, знижуючи температуру зерна на 5ºС, а температуру теплоносія у першій зоні – на 10ºС [2].

Таблиця 1.17. Режими сушіння насіннєвого зерна в шахтних сушарках [2]

Культура	Гранично допустима температура, ºС	
	зерна	теплоносій
Пшениця, жито, ячмінь, овес, сояшник, гречка, просо	40	70
Горох, віка, сочевиця, квасоля, люпин, рис	35	60

Інтенсивність прогрівання насіння ріпаку залежить від його призначення та вологості насіння. Зі збільшенням вологості насіння ріпаку рекомендовано зменшувати температуру сушильного агенту та нагрівання насіння [27,28,29] Для ріпаку насіннєвого призначення температуру теплоносія зменшують на 15 – 20ºС від ріпаку технічного призначення (табл.1.18).

Режими сушіння насіння ріпаку в шахтних прямоточних зерносушарках ДСП – 32 ОТ різного призначення показаний в табл. 1.18.

Таблиця 1.18. Режими сушіння насіння ріпаку в шахтних прямоточних зерносушарках ДСП – 32 ОТ [27,28,29]

Автори	Вологість насіння, %	Максимальна температура теплоносія, °С			Температура нагрівання насіння, °С
		Одноступеневий режим	Двоступеневий режим		
			I ст.	II ст.	
Ріпак насіннєвого призначення					
ВНДІ зерна	$\omega \leq 17$	65	–	–	40
	$17 < \omega \leq 19$	60	–	–	37
	$\omega > 19$	55	–	–	35
Атаназевич В.І. Страхова Т.В.	До 17	65	60	70	40
	До 25	60	55	65	35
	Вище 25	55	50	60	30
Ріпак технічного призначення					
ВНДІ зерна	$\omega \leq 10$	85	–	–	62
	$10 < \omega \leq 15$	83	–	–	56
	$15 < \omega \leq 20$	80	–	–	52
	$20 < \omega \leq 25$	78	–	–	50
	$\omega > 25$	75	–	–	48
Атаназевич В.І. Страхова Т.В.	До 17	85	80	90	55
	До 25	80	75	85	50
	Вище 25	75	70	80	45
Пілявська Л.С. Чернікова М.В.	до 15%	–	90	100	60
	до 20%	–	85	95	55
	до 25%	–	80	90	50
	Вище 25%	–	70	80	45

За даними таблиці 1.18 за рекомендованими режимами сушіння нами визначена область сушіння для насіннєвого та технічного ріпаку (рис. 1.2). Для сушіння ріпаку насіннєвого призначення найбільш доцільні вибрати режими 4,5, при яких температура нагрівання в залежності від вологості ріпаку знаходиться в межах 30 – 40%.

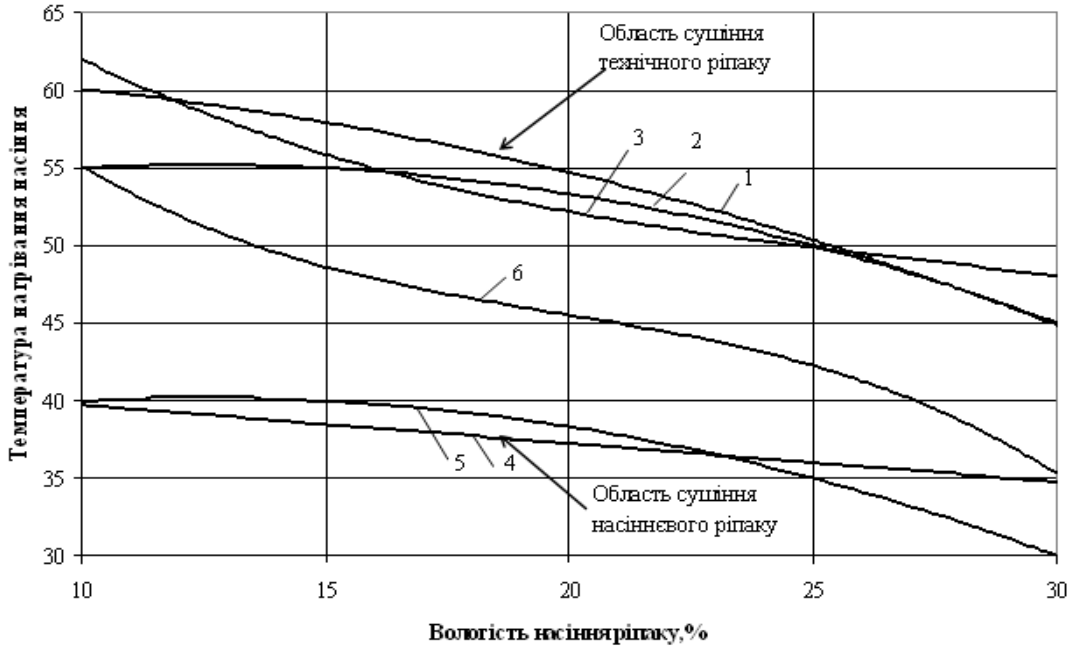


Рис. 1.2. Залежність температури нагрівання насіння ріпаку від його вологості насіння ріпаку за даними літературних досліджень:
1 – Пілявська Л.С., Чернігова М.В.; 2,5 – Атаназевич В.І., Страхова Т. В.; 3,4 – ВНДІ зерна; 6 – Артьомов І. В.

Результати досліджень впливу температури та тривалості нагріву на насіннєві якості зерна кукурудзи представлено на рис. 1.3 [30].

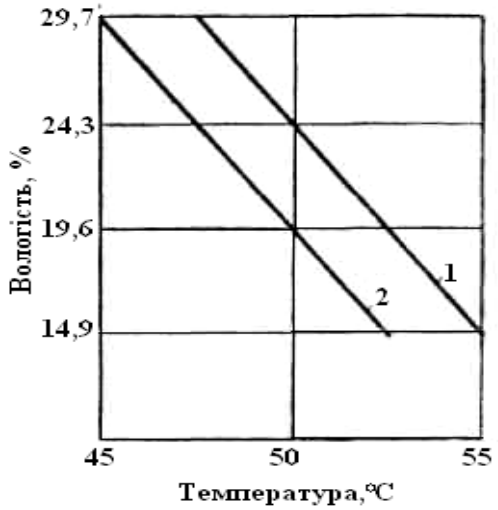


Рис. 1.3. Допустимий нагрів насіння кукурудзи, який не викликає зниження енергії росту та схожості за Ю.С. Ралль: 1 – 60 хв; 2 – 180 хв.

Зміна температури від вологості насіння має лінійний характер за Ю.С. Ралль. Так допустима температури нагріву кукурудзи складає 53 – 55 ºС при вологості насіння 14,9%, а при збільшенні вологості майже в 2 рази - допустима температура нагріву насіння кукурудзи знижується до 45 ºС .

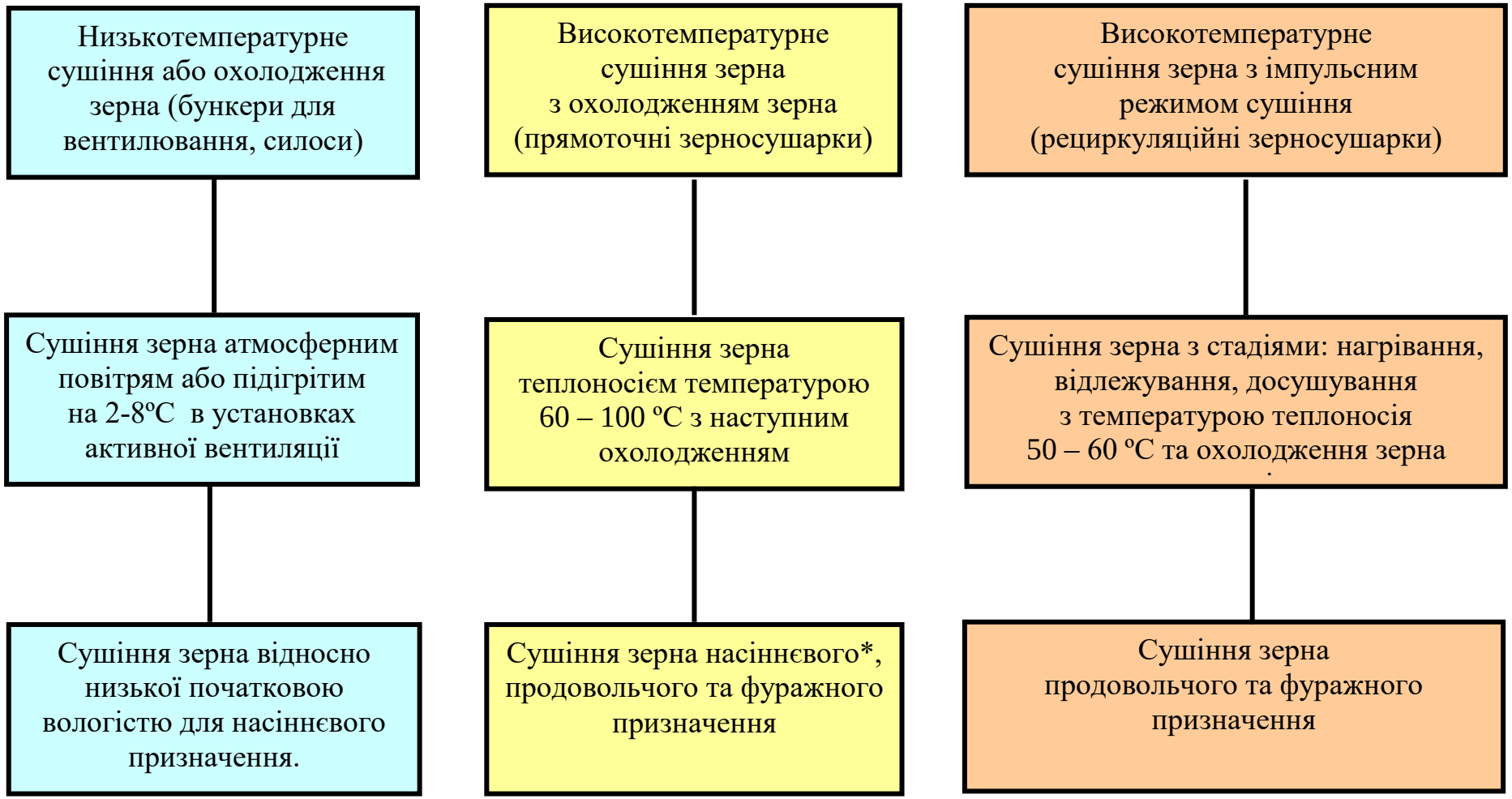
Рекомендовано в залежності від вологості насіння ріпаку використовувати різні способи сушіння: паралельний спосіб до 15%; послідовний – до 18%; рециркуляційний – вище 18% [29]. Згідно цих рекомендацій Г.С. Зелінським, В.Ф. Сорочинським [31,32] була розроблена шахтна рециркуляційна зерносушарка РД – 2х25–70 з різними технологічними схемами обробки зерна.

1.3. Обладнання для сушіння насіннєвого зерна

Сучасний стан обладнання для сушіння зерна доцільно класифікувати за основними типами зерносушарок (табл. 1.19) [2, 33 – 49] та за способами конвективного сушіння зерна, як найбільш розповсюджений (рис.1.4).

Таблиця 1.19. Класифікація основних типів зерносушарок [2,33 – 49]

Класифікаційна ознака	Тип сушильної установки	Класифікаційна ознака	Тип сушильної установки
Режим роботи	періодичної дії	За типом теплоносія	повітряна
	безперервної дії		топкові гази
За конструктивним виконанням	стаціонарні		суміш повітря з топковими газами
	пересувні		
Спосіб підведення теплоти	конвективний	Величина тиску в камері	атмосферна
	кондуктивний		вакуумна
	контактний	Спосіб циркуляції теплоносія	природна
	вакуумний		примусовою
	радіаційний	Напрям потоку матеріалу та теплоносія	прямотечійний
	високочастотний		протитечійний
	комбінований		перехресний
		Особливості конструкції	бункери та силоси для вентилювання
За станом зернового шару	елементарний		шахтні
	щільний нерухомий		колонкові
	щільний рухомий		карусельні
	псевдозріджений		барабанні
	віброкиплячий		конвеєрні
	падаючий		камерні
	завислий		баштові



* – при умові сушінні насіннєвого зерна з температурою теплоносія 60 – 70ºС.

Рис. 1.4. Класифікація способів конвективної сушки зерна

Для сушіння зерна насіннєвого призначення найбільше використовують безперервно діючі зерносушарки шахтного та колонкового типів. Використання зерносушарок барабанного, карусельного та інших типів обмежено вимогами до якості насіннєвого матеріалу. Також сушіння насіння можливо в сушарках періодичної дії – порційних, камерних, в бункерах для вентилювання.

В бункерах для вентилювання сушіння насіння відбувається зовнішнім або злегка підігрітим повітрям (низькотемпературне сушіння), основане на принципі гігроскопічної рівноваги між вологістю матеріалу та відносної вологості повітря, який продувається крізь шар матеріалу. Вентилювати зерно з метою сушіння можливо в тому випадку, коли відносна вологість повітря обумовлює поглинання випареної вологи.

Для досягнення кондиційної вологи зерна відносна вологість повітря в умовах гігроскопічної рівноваги повинна складати 65 – 70%. Підігрів повітря на 1°. Знижуючи його відносну вологість на 4-5%. Якщо врахувати, що в вентиляторі він нагрівається (за рахунок сил тертя) на 1 –2°С, то навіть при 100% відносної вологості достатньо додатковий підігрів повітря всього на 5 – 7°С.

Забезпечення якісного зберігання зерна залежить від поєднання таких показників, як температура та вологість повітря і матеріалу, що необхідно враховувати при реалізації даного методу.

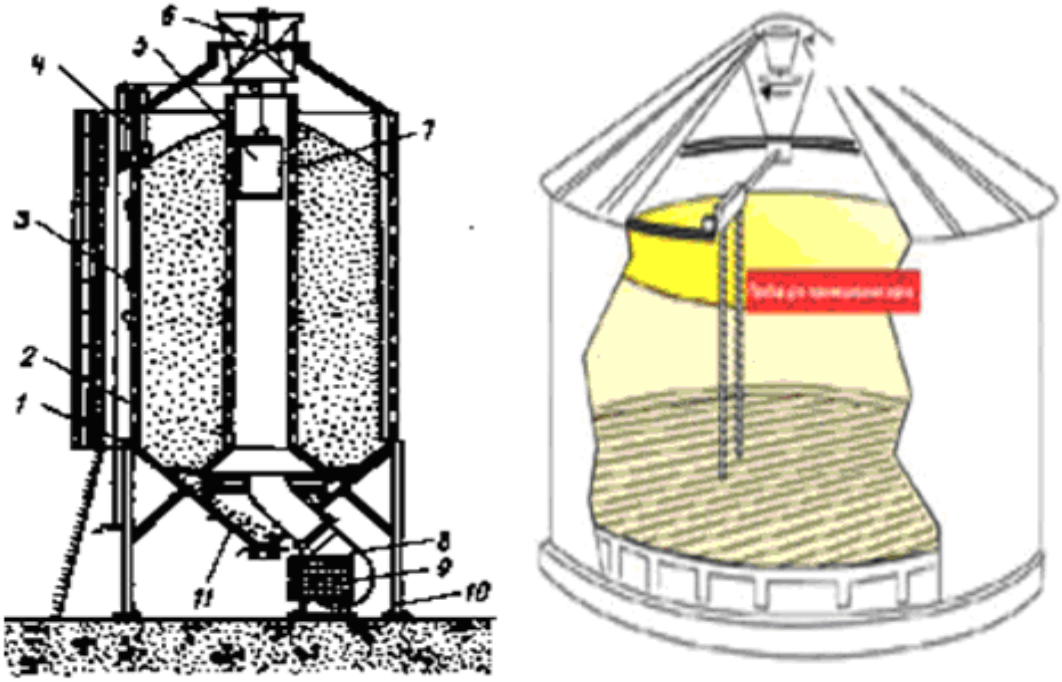
Наприклад в умовах Англії для висушування зерна до кондиційної вологи рекомендують підігрівати повітря в холодну вологу погоду – до 4,5 – 5,5°С; в помірну – до 3,5 – 4,5°С і в теплу суху – до 3.5°С. Питома витрата повітря повинна складати 200 – 300 $м^3$/(т · год.) [50].

В довіднику для канадських фермерів, які сушать зерно атмосферним повітрям, рекомендують значно менші витрати повітря – 30 - 80 $м^3$/(т ·год) в залежності від часу збирання та призначення зерна. Для насіннєвого зерна рекомендована витрата повітря вище на 35%.

Найбільш розповсюджений технічний засіб для низькотемпературного сушіння зерна – вентильований бункер циліндричної форми з вертикальнім або радіальним повітряним потоком [2] та силос для вентилювання зерна [51] (рис. 1.5).

В бункері БВ – 25 (рис. 1.5,а) повітря нагнітається в розподільну трубу 7 вентилятором 8 з питомою витратою повітря 420 $м^3$/(т · год). Повітря нагрівають на 5 - 6ºС електрокалорифером 9 потужністю 24 кВт. Усередині повітророзподільної камери встановлений рухомий клапан 5, для запобігання витоку повітря з верхньої частини бункера при зниженні рівня зерна під час сушіння.

В силосах для вентилювання зерна (рис. 1.5,б) передбачено встановлення перфорованого днища, яке необхідно для підводу повітря від вентилятора до шару зерна. Для низькотемпературної сушки днище повинно бути перфоровано на всій площі і забезпечувати рівномірний прохід повітря у всіх місцях товстого шару.



а) б)

Рис. 1.5. Бункер БВ – 25 (а) та силос для вентилювання зерна з перемішуючим пристроєм (б):

1 – кільцева рама; 2 – циліндр; 3 – регулятор вологості; 4 – датчик рівня зерна; 5 – рухомий клапан; 6 – пристрій для рівномірного завантаження зерна; 7 – розподільна труба; 8 – вентилятор; 9 – електрокалорифер; 10 – стояки; 11 – конусоподібне днище.

Таблиця 1.20. Допустима товщина шару зерна і питомі витрати повітря з різною початковою вологістю зерна при швидкості повітря 0,07 м/с [51]

Вологість зерна, %	Товщина шару, м	Питомі витрати повітря, $м^3/(т \cdot год)$
17	6	55
20	3	111
22	1	332

В силосах визначені питомі витрати повітря в залежності вологості зерна та товщини шару (табл. 1.20).

Для кращого сушіння зерна в силосі також передбачений перемішуючий пристрій та електрокалорифер для нагрівання повітря на рівні поверхні днища в межах 0,22 $кВт/м^2$.

Установки для низькотемпературного сушіння використовують не тільки для сушіння, але і для тимчасової консервації зерна перед сушінням, охолодженням його після сушіння, зберігання висушеного матеріалу.

Переваги низькотемпературного сушіння – невеликі витрати теплоти (за рахунок використання теплоти зовнішнього повітря) на рівні 3000 кДж/кг випареної вологи, зрівноваження висушеного матеріалу по вологості, простота технічних засобів для його виконання.

Недоліки низькотемпературного сушіння – тривалість процесу вологовіддачі триває декілька діб, що пов'язано з ризиком псування матеріалу.

З підвищенням температури теплоносія збільшується швидкість сушіння зерна і відповідно продуктивність сушильного обладнання.

Для *високотемпературного сушіння* зерна можна використовувати більшість конструкцій вентиляційних установок (закройні, напільні та ін.), в робочій камері якої зерно розташовується нерухомим щільним шаром. Проте режими сушіння будуть іншими: товщина зернового шару – 0,4 – 0,6 м; питома витрата повітря 500 – 1500 $м^3$/(т год) зерна; повітря нагрівають до температури 35 – 60ºС (в залежності від вологості та призначення насіння) [52].

Іноземні фірми випускають сушарки періодичної дії з нерухомим зерновим шаром бункерного типу, лоткові, колонкові і інші. В сушарках механізовані процеси завантаження і вивантаження зерна. Час сушіння зерна в сушарках залежить від температури і швидкості теплоносія (табл. 1.21).

Таблиця 1.21. Час сушіння насіння пшениці при зниженні вологості від 20 до 14% в сушарках періодичної дії при товщині зернового шару 0,6 м [53]

Швидкість теплоносія, м/с	Час сушіння (години) при температурі теплоносія (без врахування часу завантаження і вивантаження)		
	38 ºС	48 ºС	60 ºС
0,15	11,2	8,9	6,1
0,20	8,4	5,9	4,6
0,25	6,6	4,8	3,7
0,30	5,6	4,1	3,1

В США розроблений ряд конструкцій стаціонарних і пересувних сушарок періодичної дії, в яких для інтенсифікації процесу сушіння та покращення її рівномірності відбувається за рахунок циркуляції зерна в сушильній камері.

Сушарки фірми Gilmore – Tatge Mfg.,CO (США) мають циліндричну форму, в нижній частині конусоподібну (рис. 1.6) [57].

Сушильна камера виконано з оцинкованої сталі з круглими отворами діаметром 2,4 мм; перфорація складає 33% всієї площі стінок. Зерно знаходиться між перфорованими зовнішніми стінками і стінками нагнітаючої камери.

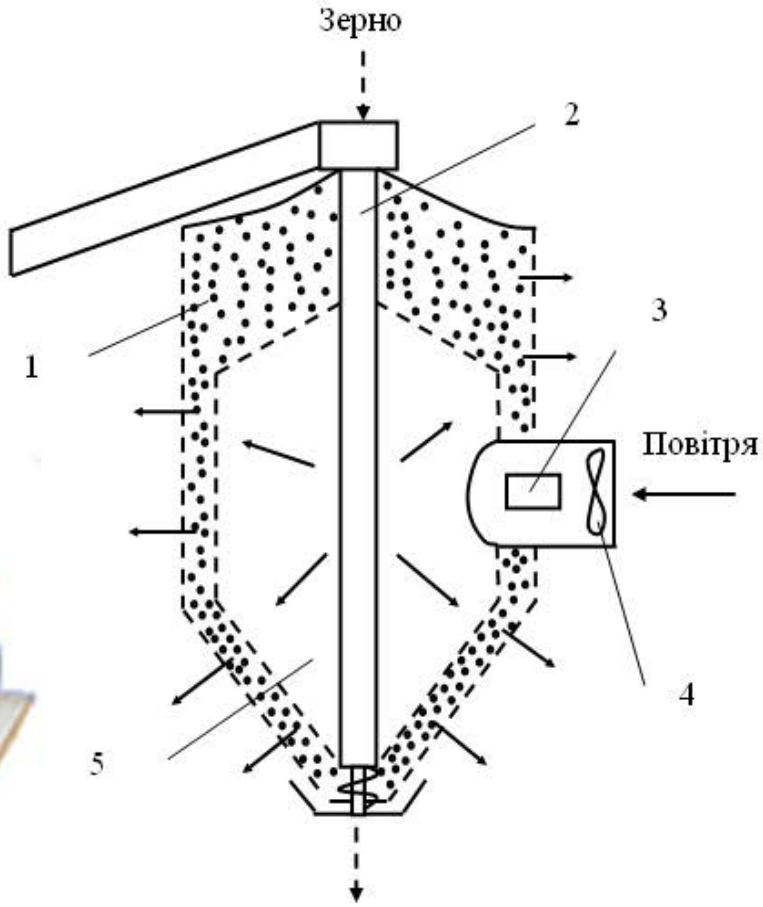


Рис. 1.6. Схема сушарки періодичної дії з циркуляцією зерна фірми Gilmore – Tatge Mfg.,CO (США)
1 – зерно; 2 – шнек; 3 – підігрівач повітря; 4 – вентилятор; 5 – нагнітаюча камера.

Сушарки оснащені підігрівачами повітря з осьовими вентиляторами. Передбачений контроль температури теплоносія і зерна, блокування роботи вентилятора та подачі палива, контроль горіння в топці. Циркуляція зерна відбувається за допомогою вертикального центрального шнеку. При розвантаженні сушарки зерно подається у вивантажувальну трубу.

Конструкція сушарок з циркуляцією зерна в сушильній камері забезпечує високі питомі подачі теплоносія в зернову масу (2100 – 2800 $м^3$/(т год)). Час сушіння зерна продовольчого використання біля 2 годин.

Для сушіння насіннєвого зерна розроблені використовують зерносушарки безперервної дії. Розроблені технологічні схеми прямоточного та рециркуляційного сушіння зерна в зерносушарках шахтного типу.

Прямоточну схему сушіння показано на прикладі зерносушарки типу ДСП – 32 ОТ (рис. 1.7) [2,36].

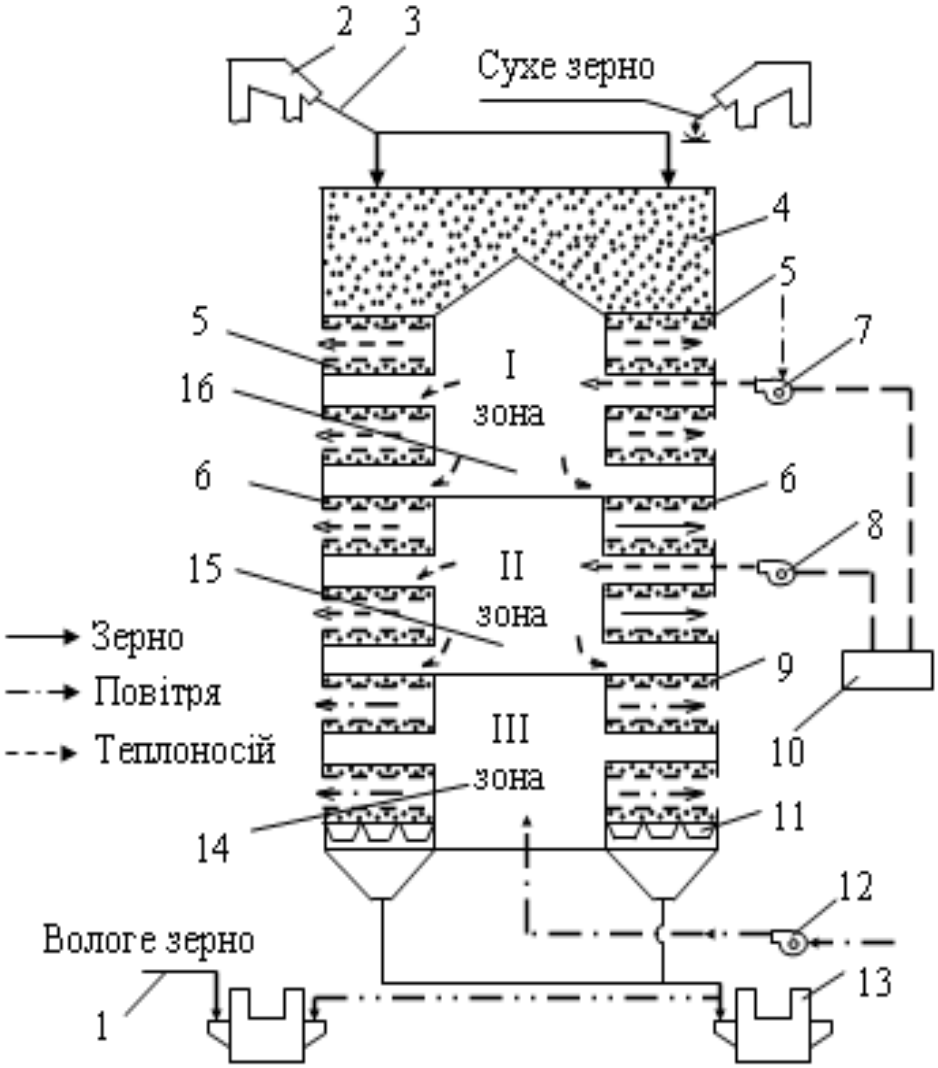


Рис. 1.7. Прямоточна шахтна зерносушарка типу ДСП – 32 – ОТ:
1,3 – самопливні труби; 2– норія; 4 – надсушильний бункер; 5,6 – сушильні шахти I та II зони сушіння; 7,8 – вентилятори; 9 – охолоджувальна шахта; 10 – топка; 11 – випускний механізм періодичної дії; 13 – норія; 14, 15, 16 – напірно-розподільні камери зон охолодження I та II зон сушіння.

Сире зерно по трубі 1 надходить у норію 2, а потім по самопливній трубі 3 в надсушильний бункер і далі рівномірно розподіляється між сушильними шахтами 5, 6 (відповідно першої та другої зони сушіння), а також охолоджувальною шахтою 9. Агент сушіння з топки 10 вентилятором 7 і 8 подається у напірно-розподільні камери першої 16 та другої 15 зон сушіння зерна. Атмосферне повітря вентилятор 12 нагнітає у напірно-розподільну камеру 14 охолоджувальної шахти 9. Випуск зерна з шахт здійснюється випускним механізмом 11 періодичної дії. Сухе охолоджене зерно з зерносушарки спрямовується до елеватора або складу конвеєром і норією 13.

Прямоточна шахтна зерносушарка фірми ARAJ показана на рис. 1.8 [52].

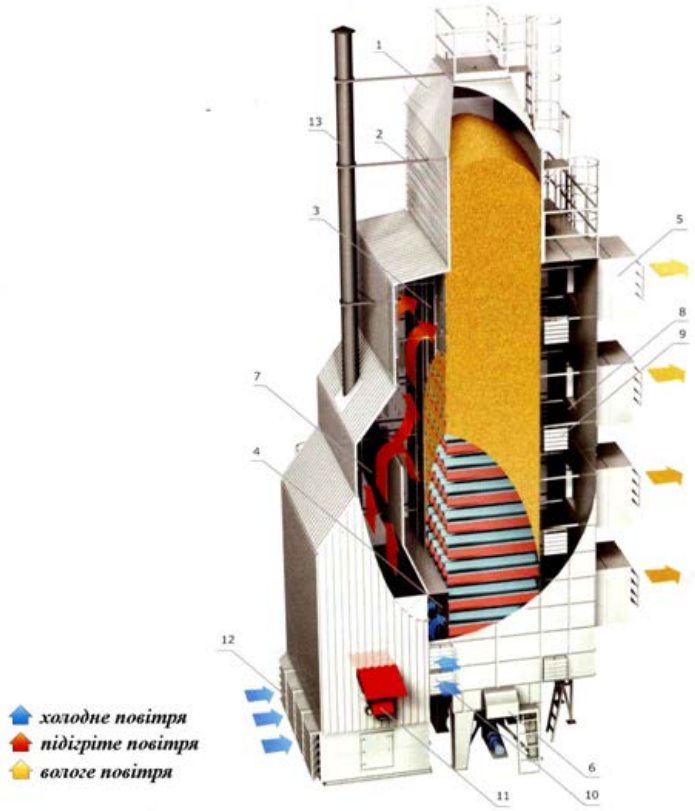


Рис. 1.8. Прямоточна шахтна зерносушарка фірми ARAJ (Польща):
1 – верхня частина; 2,3,4 – відповідно секції завантаження, сушіння та охолодження; 5 – витяжні вентилятори; 6 – система вивантаження; 7,8 – камера входу та виходу повітря; 9 – регулюючі засувки повітря на виході; 10,12 – регулюючі засувки; 11 – теплогенератор; 13 – труба.

Холодне повітря надходить в теплогенератор з запальником 11 [52], де підігрівається до температури 75ºС для ріпаку і надходить в сушильну камеру 3. Зверху через секцію завантаження 2 зерно надходить в сушильну секцію 3 і поступово рухаючись висушується. Після сушіння зерно надходить в охолоджувальну секцію 4, де зерно охолоджується. Для зміни потоку повітря на вході і виході з зерносушарки передбачені регулюючі засувки 9 – 11.

Фірма Stela та RIELA (Німеччина) випускає пересувні порційні та прямоточні зерносушарки (рис. 1.9) [55,56].

Рис. 1.9. Пересувні порційні та прямоточні зерносушарки фірми Stela (Німеччина) та RIELA (Німеччина)

Недоліки прямоточної схеми сушіння:

1. Потребує партії зерна з однаковою початковою вологістю.

2. Для запобігання перегріванню та погіршенню якості зерна його вологість у прямоточних сушарках знижують не більш як на 6…8 %.

У рециркуляційних сушарках в замкненому контурі безперервно рухається великий потік сухого рециркуляційного зерна [2,38]. До цього потоку додають сире зерно в об'ємі продуктивності сушарки з безперервним виведенням з контуру циркуляції відповідної кількості сухого зерна (рис. 1.10).

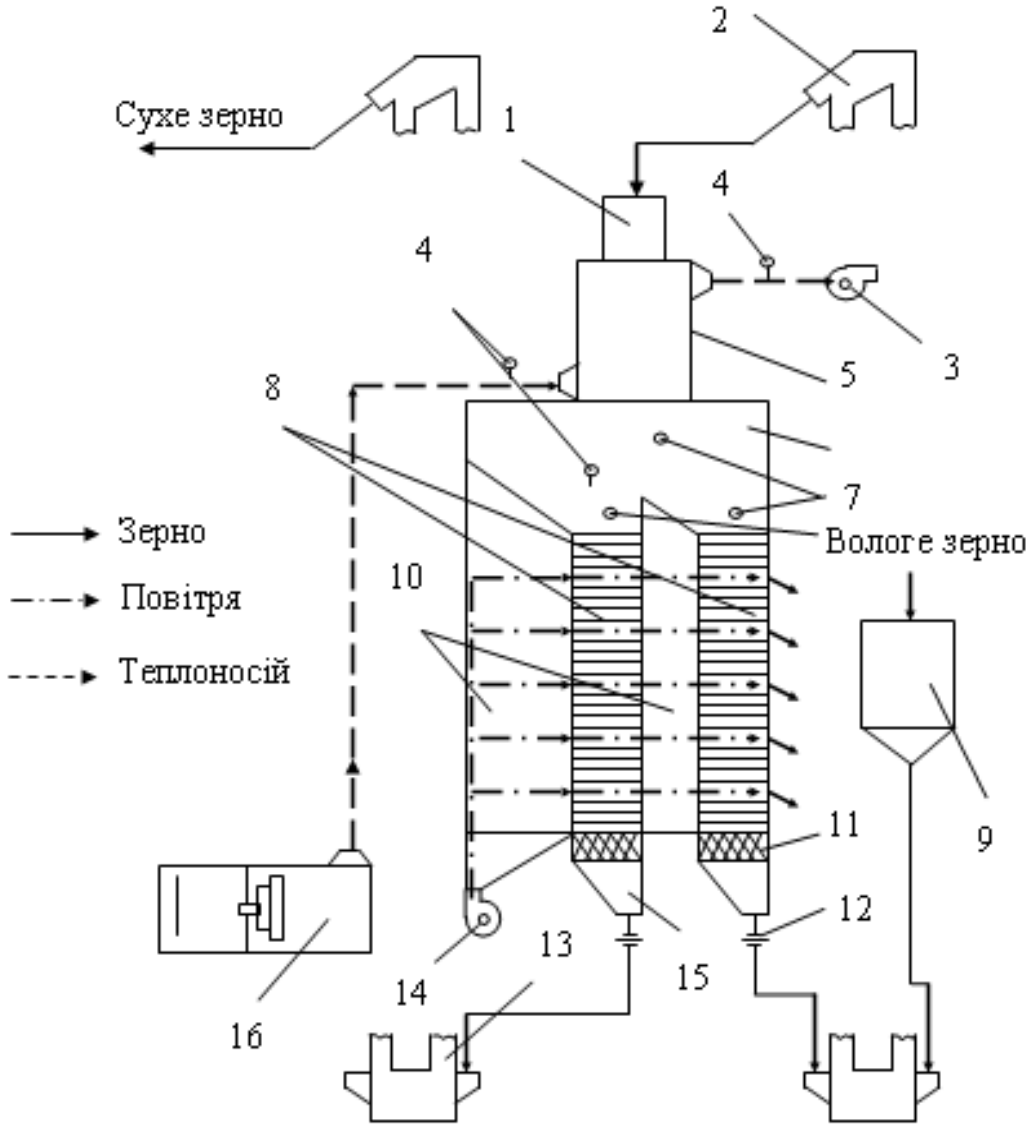


Рис. 1.10. Технологічна схема зерносушарки РД – 2х25–70:

1,9 – бункер; 2,13 – норії; 3,14 – вентилятори; 4 – термометр опору; 5 – камера нагрівання; 6 – тепломасообмінник; 7 – датчики рівня; 8 – охолоджувальна шахта; 10 – напірно-розподільні камери; 11 – випускний пристрій; 12 – засувка; 15 – підсушувальний бункер; 16 – топка.

Сире зерно з бункера 9, а рециркуляційне з охолоджувальної шахти проміжного охолодження подається в норію 2, звідки їх суміш спрямовується в

бункер 1 розташований над камерою нагрівання зерна 5. За допомогою завантажувального механізму зерно у вигляді «дощу» надходить у камеру нагрівання 5 з гальмівними елементами (19 рядів металевих труб), де воно зустрічним потоком агента сушіння нагрівається і частково сушиться. Гальмівні елементи повинні забезпечити перебування зерна в камері нагрівання протягом 2...3 с. Температура агента сушіння на вході 250...350º, на виході – 80ºС.

З камери нагрівання зерно подається у тепломасовологообмінник 6, де відбувається вирівнювання температури зерна та частково перерозподіл вологи між рециркулюючим та сирим зерном. Із тепломасовологообмінника 6 зерно спрямовується в шахти проміжного та кінцевого його охолодження. Із шахти проміжного охолодження зерно надходить у норію 2, де воно змішується з сирим зерном, а із шахти кінцевого охолодження — в норію 14 і далі у склад.

За таким принципом працюють шахтні рециркуляційні зерносушарки 2хА1 – ДСП – 50, А1 – ДСП – 50 та ДСП – 25 Карлівського МЗ (Україна) (рис. 1.11) [57].

а) б) в)

Рис. 1.11. Рециркуляційні зерносушарки Карлівського МЗ (Україна) 2хА1 – ДСП – 50 (а), А1 – ДСП – 50 (б) та ДСП – 25 (с)

Недоліки рециркуляційної схеми сушіння:

1. З збільшенням початкової волості зерна збільшується кратність рециркуляції.

2. При зниженні температури атмосферного повітря при сушінні відбувається охолодження зерна, що приводить до зниження продуктивності сушарки.

Технічна характеристика прямоточних та рециркуляційних зерносушарок представлена в таблиці 1.22.

Таблиця 1.22. Технічна характеристика прямоточних та рециркуляційних шахтних зерносушарок при сушінні пшениці від 20 до 14% [2,38,57]

Назва	Прямоточні			Рециркуляційні		
	Стаціонарні		Пересувні			
	ДСП – 16	ДСП – 32 ОТ	К4 –УСА	РД–2х25–70	У2–УЗБ–50	А1 – ДСП – 50
Продуктивність, т/год	16	32	10	50	50	50
Встановлена потужність, кВт	44/40*	125/99,2*	37,8/31,5*	119,7/112,7*	160/139,2*	150/120*
Витрата умовного палива, кг/т	12,0	12,2	14,4	12,3	12,5	11,0
Випаровувальна здатність, кг / год	2300		700	3500		
Витрата теплоти на випаровування, кДж /кг	5000	5040	5000	5330	5456	4760
Витрата дизельного палива, кг/т	8,3	8,5	8,5	8,4	8,6	7,5
Питома витрата електроенергії, кВт год/т	2,5	3,1	4,0	3,4	2,8	2,4
Габаритні розміри, мм	3250 х 1000 х 11338	15500 х 8300 х 18724	9300 х 2750 х 4000	6400 х 6300 х 21700	11000 х 7600 х 25784	10000 х 7000 х 20000
Маса, кг	22000	32600	10800	71100	66680	55000

*– фактично спожита потужність в час, кВт.

** – витрата умовного палива, кг/год.

Для створення зерносушарок різної продуктивності іноземними фірмами запропонований метод – моделювання. Збільшення продуктивності досягається нарощуванням стандартних секцій по висоті, а потім збільшується шляхом блокування декількох шахт. Розмір модуля приймається в залежності від конструктивно-технологічних показників з врахуванням зручностей при монтажі та обслуговуванні.

Нижче приведені сушарки фірми Law (Франція), розкриває модульний принцип компонування сушарок шахтного типу (рис. 1.12) [58].

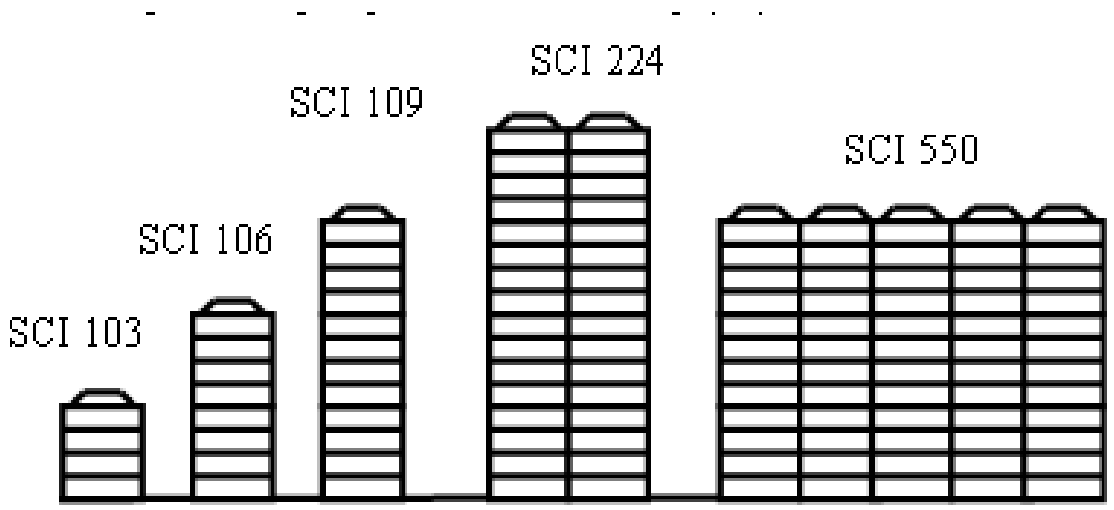


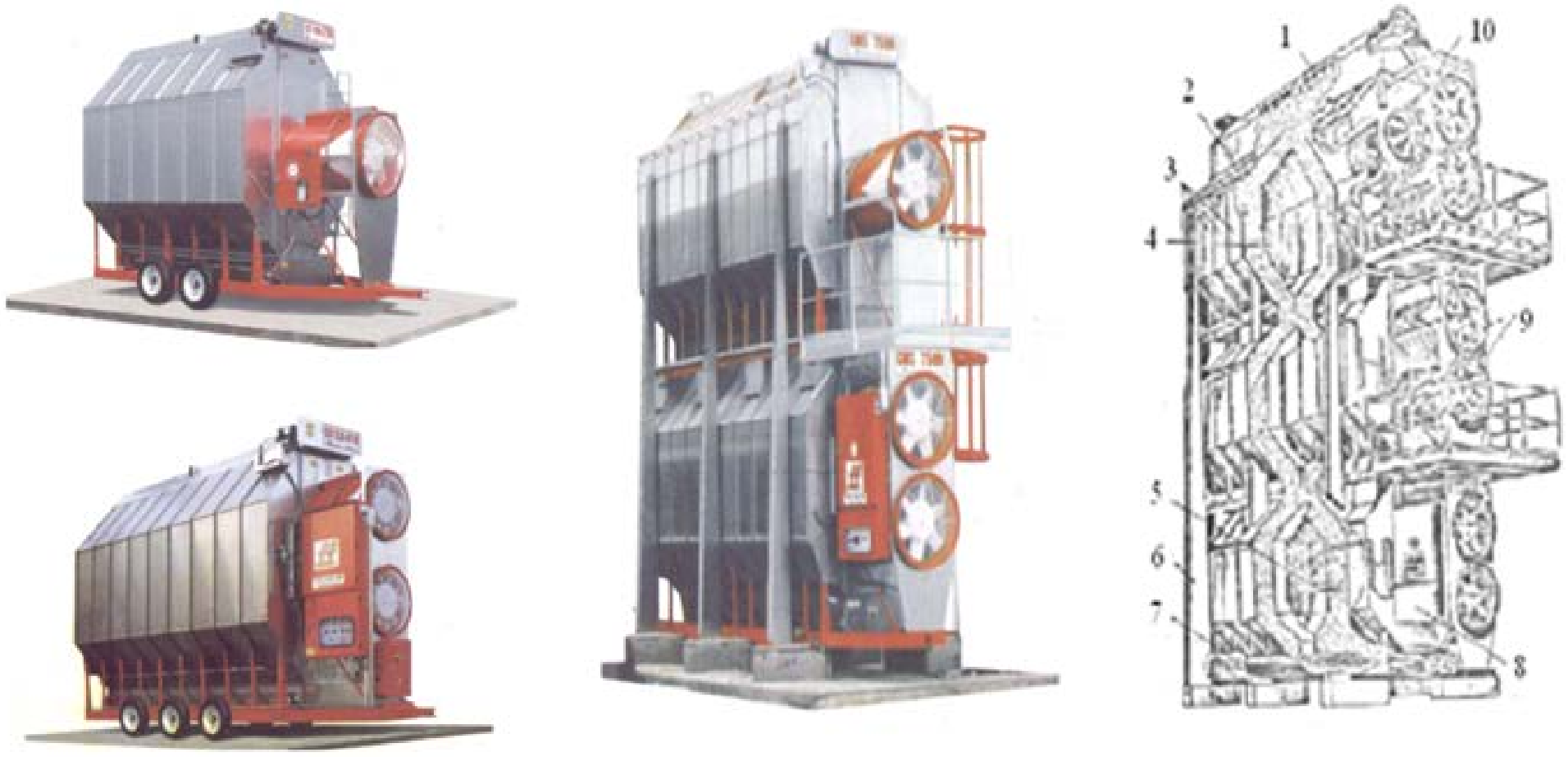
Рис.1.12. Модульний принцип компонування шахтних зерносушарок фірми Law (Франція)

Модель SCI 106 фірми Law (Франція) має місткість 16,5 т. Модель SCI 109 отримано шляхом нарощування трьох секцій місткістю по 2,1 т кожна (місткість всієї сушарки – 22,8 т). Подальше збільшення місткості сушарки проводять шляхом об’єднання шахт: SCI 224 – 37,2 т, SCI 550– 100 т.

Наряду з шахтними широко використовують колонкові зерносушарки в яких компонування відбувається за модульним принципом.

В цих сушарках зерно під дією сили тяжіння рухається зверху вниз між двома перфорованими стінками, які підлягають впливу теплоносія в повздовжньому напрямку. Колонкові сушарки забезпечують більш високу питому подачу теплоносія (без виносу зерна), чим шахтні. Завдяки вільному руху зерна в колонках знижується можливість утворення застійних зон [2,59-64]. Найбільш відомі виробники колонкових зерносушарок це американські фірми: Mathews Company, Delux, Sukup, Farm Fans (США) та інші (рис 1.13) [2,59].

Вологе зерно завантажують у надсушарний бункер 2 (рис. 1.13, с), де знаходиться шнек 1, який розрівнює шар зерна і розподіляє його по довжині колонки. У простір 4 між ними нагнітається агент сушіння. Висушене зерно вивантажується з нижнього бункеру. Продуктивність сушарки регулюють, змінюючи частоту обертання розвантажувального шнеку 7 за допомогою пульту керування 8. Датчики 5 служать для вимірювання температури зерна, а в камері 10 спалюється паливо.



а) б) с)

Рис. 1.13. Колонкові зерносушарки фірми Farm Fans (США):
а) з одним вентиляційним вузлом; та з двома вентиляційними вузлами; б) і в)– дво- та три модульні зерносушарки.
1– розподільний шнек; 2 – надсушарний бункер; 3 – сітчасті колонки; 4 – простір для нагрітого повітря; 5 – датчики для вимірювання температури зерна; 6 –станина; 7 – розвантажувальний шнек; 8 – пульт керування; 9 – вентиляційні вузли; 10 – спалювання палива.

Основним недоліком зерносушарок колонкового типу – нерівномірність сушіння зерна по товщині шару. Шар зерна в колоні складає 350 – 400 мм. Для підвищення рівномірності сушіння використовують наступні методи:

1) зміна напрямку руху теплоносія відносно зернового шару;
2) зміна положення і характеру руху шарів прилеглих до стінок.

На рис. 1.14 представлені схеми більш рівномірного сушіння зерна [2,60,64]

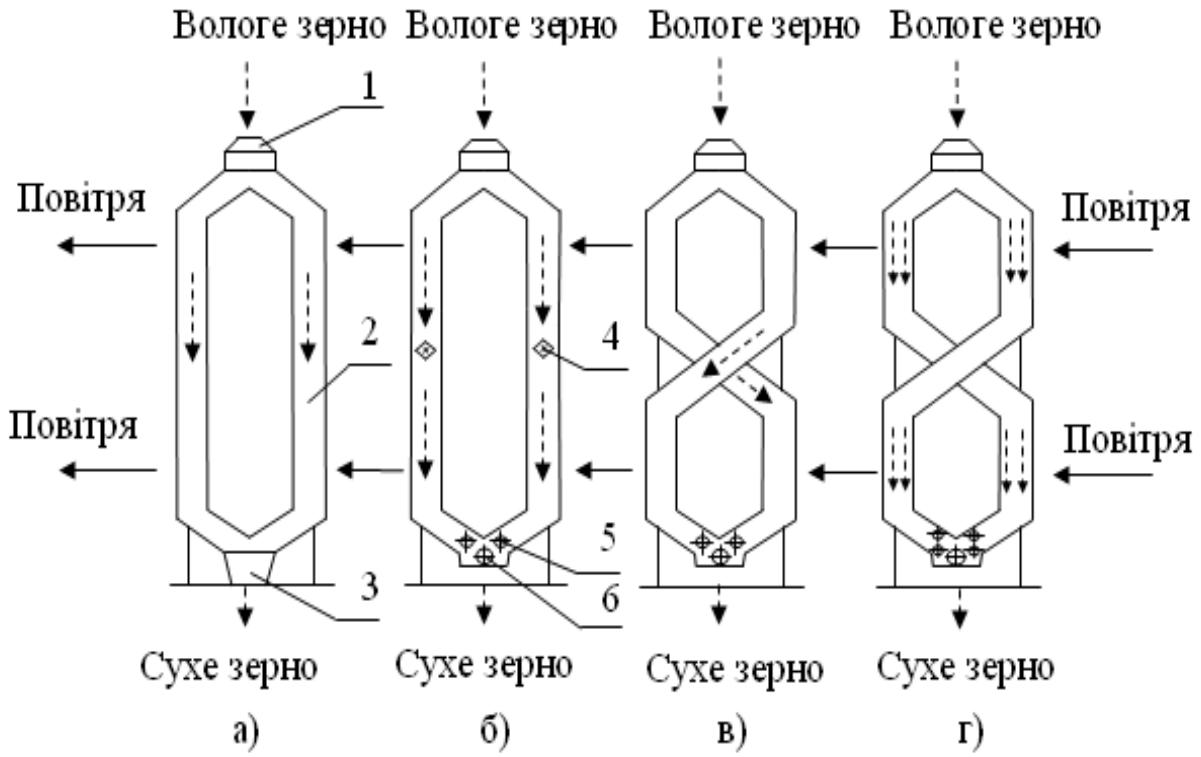


Рис. 1.14. Схеми вивантаження зерна з колонкових сушарок.
а) з простим вивантаженням зерна;
б) з інверторами для перемішування зерна і двома дозуючими валками;
в) з хрестоподібним рухом зерна і з двома дозуючими валками;
г) з хрестоподібним рухом зерна і з чотирма дозуючими валками;
1– завантажувальний бункер; 2 – колона для зерна; 3 – вивантажувальний бункер; 4 – інвертори; 5 – дозуючі валки; 6 – вивантажувальний шнек.

Колонкова сушарка з простим вивантаженням зерна представлена на рис. 1.14 а. Зерно завантажується в бункер 1 рухається по колонам 2, при цьому на внутрішній поверхні колони відбувається пересушування зерна.

Встановлення в середній частині колонок перемішуючих пристроїв 4 (інверторів) (рис. 1.14 б) [64] або хрестоподібного виду колонок [63] запобігає перегріванню та збалансовує рівень вологості зерна. Для необхідності більш рівномірного регулювання швидкості руху зерна по перерізу колони передбачені два (рис. 1.14 б, в) або чотири дозуючих валків 5 (рис. 1.14 г). Вивантаження зерна відбувається за допомогою шнекового пристрою 6 в бункер 3.

Колонкова зерносушарка типу СЗК – 8, розроблена в Білорусії, забезпечує сушіння по двом способам використання теплоносія (рис. 1.15) [63,64]:

прямоточному, коли відроблений теплоносій з секції нагрівання, сушіння і охолодження випускають в атмосферу;

з рекуперацією теплоти, коли теплоносій, відпрацьований в секції сушіння, та повітря, підігріте в охолоджувачі, направляють на вхід теплогенераторів, де суміш підігрівають до заданої температури і таким чином невикористане тепло повертається в цикл сушіння.

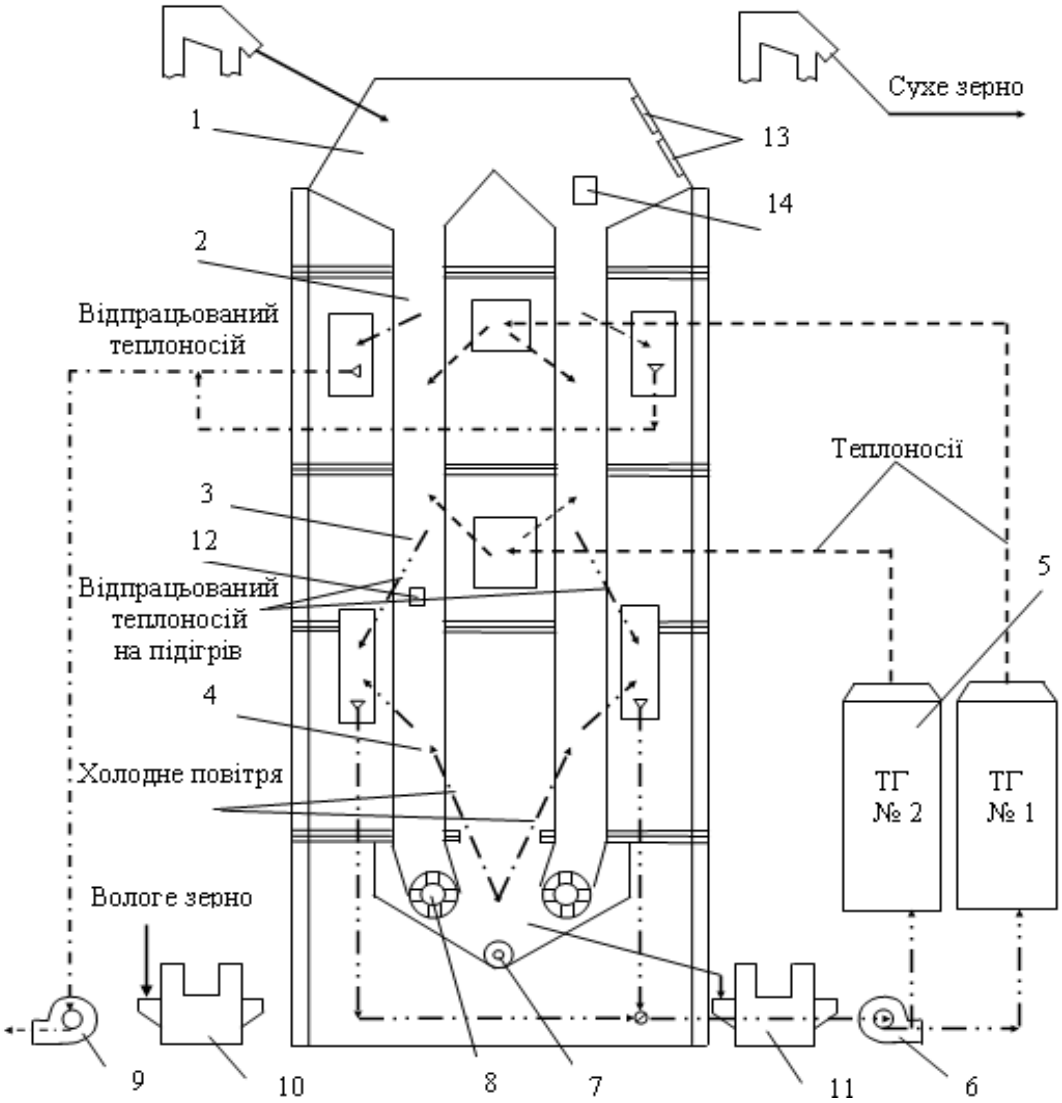


Рис. 1.15. Технологічна схема колонкової сушарки СЗК – 8:
1 – надсушильний бункер; 2 – камера нагріву; 3 – камера сушіння; 4 – охолоджувач; 5 – теплогенератори; 6 – вентилятор рекуперації; 7 – вивантажувальний шнек; 8 – випускні пристрої; 9 – витяжний вентилятор; 10, 11 – норії вологого та сухого зерна; 12, 14 – датчики температури нагрівання і вологості сухого та волого зерна; 13 – датчик заповнення бункера; 15 – пристрій перемикання способів сушіння (прямоток, рекуперація).

Топкові агрегати АТ – 0,3 [63] мають автономне керування, яке автоматично забезпечує пуск і підтримує температуру теплоносія на заданому рівні в межах 40 – 100 ºС. Перший агрегат з'єднаний з секцією нагрівання зерна, друга працює з секцією сушіння.

Автоматична система змінює пропускну можливість сушарки в залежності від початкової та кінцевої вологості зерна. Сигнал від датчика температури та вологості зерна надходить в мікропроцесор та задає режим роботи теплогенератора № 1, а також встановлює спосіб сушіння. При вологості зерна менше 22% спеціальний пристрій перемикає потоки теплоносія на рекуперацію. Датчик контролює температуру нагрівання та вологість висушеного зерна. При відхиленнях від норми сигнал надходить в мікропроцесор , який видає команду випускним пристроям збільшити (зменшити) швидкість переміщення зерна по колонкам або змінити режим роботи теплогенератора № 2 .

Технічні характеристики колонкової зерносушарки СЗК – 8 представлена в таблиці 1.23. Аналіз наведених даних, показує що в колонковій зерносушарці СЗК – 8 витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи становить 4600 кДж/кг, питома витрата рідкого палива 7,0 кг/т, питома витрата електроенергії 4,9 кВт/т.

Таблиця 1.23. Технічна характеристика
колонкової зерносушарки СЗК – 8[63]

Продуктивність, т/год.	8,0
Теплова потужність, кВт	580
Кількість топкових агрегатів	2
Інтервал автоматичного регулювання температури теплоносія, ºС	40 – 100
Питома витрата рідкого палива, кг/т	7,0
Витрата тепла на 1 кг випаровування вологи, кДж/кг	4600
Встановлена потужність електроприводу, кВт	50,1
Продуктивність вентиляторів, $м^3$/год	50000
Питома витрата електроенергії, кВт/т	4,9
Нерівномірність сушіння, %	2,0
Габаритні розміри, см	1576х626х416
Маса, кг	8500

Для сушіння насіннєвого зерна виробники також пропонують карусельну зерносушарка (рис.1.16) [65], яка виконана у вигляді обертаючої круглої платформи.

Платформа 3 являє собою перфороване днище, на неї навантажується зерно. Теплоносій підігрітий в топковій камері 1, повітропроводом 2 подається на платформу 3, який через отвори днища надходить в шар зерна, і пронизуючи його, виходить в атмосферу. Під час того як відбувається обертання платформи 3 нижній шар зерна зневоднюється і виводиться шнеком 5 на подальшу переробку. Час обертання платформи підібрано таким чином, щоб за один оберт нижній шар міг висохнути до кондиційної вологості.

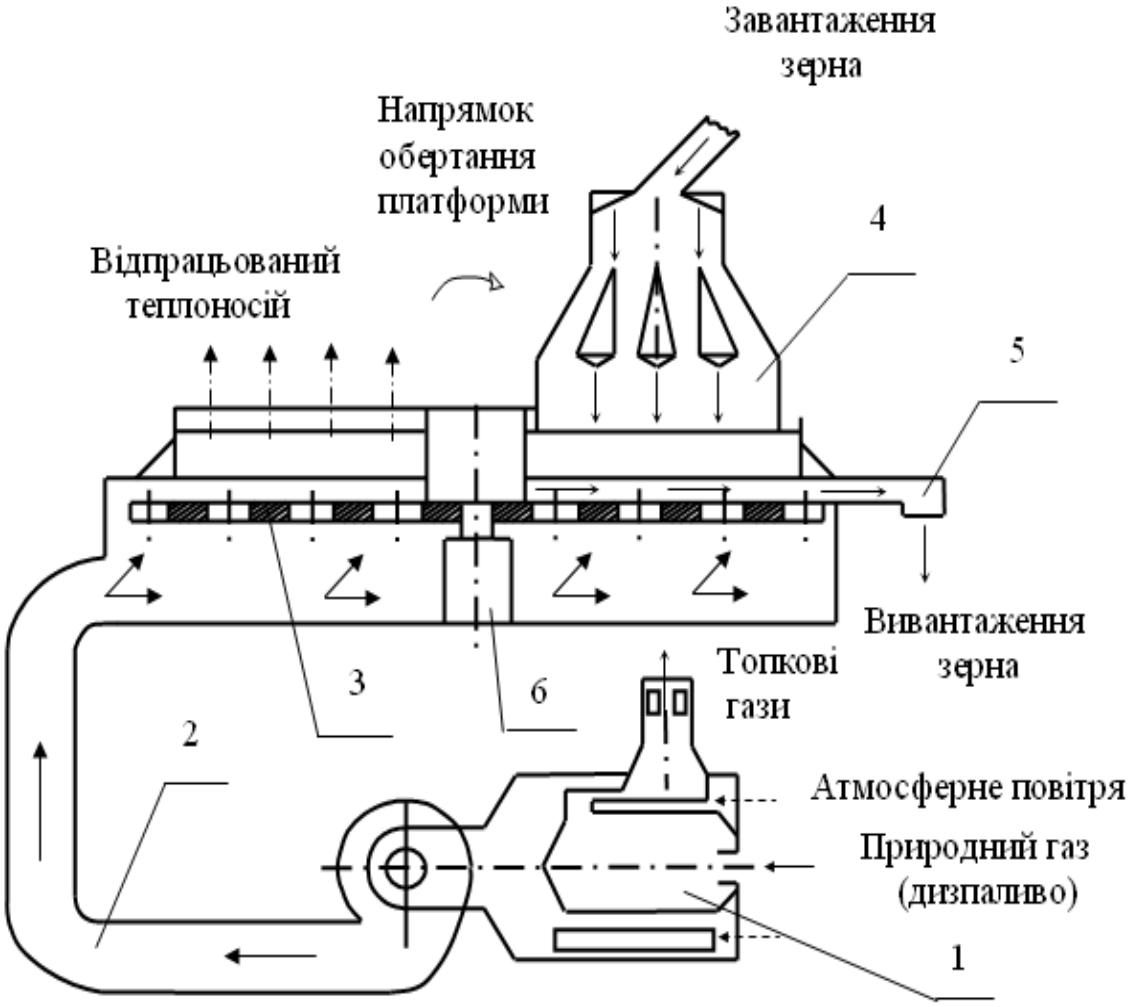


Рис. 1.16. Карусельна сушарка СКЗ – 8.
1 – топкова камера; 2 – повітропровід; 3 – обертаюча перфорована платформа; 4 – бункер завантаження зерна; 5 – вивантажувальний шнек; 6 – вал.

Зерно можна також сушити в *барабанних* (стаціонарні та пересувні) та *конвеєрних* установках. До вітчизняних барабанних зерносушарок відносять СЗСБ – 8 та СЗПБ –2,5 [2]. Основним елементом барабанних сушарок є горизонтальний або трохи похилий циліндричний барабан, що обертається з частотою 2..6 хв$^{-1}$ і в середині якого пересувається по довжині і сушиться зерно.

Всередині барабану встановлюють різного типу насадки або повздовжні лопаті, для інтенсифікації процесу.

Найбільш відомі іноземні фірми, які випускають барабанні сушарки: Buttner (Німеччина), Heil –Arnold (США), Van den Brock (Нідерланди). Топки барабанних сушарок забезпечують, як правило, високу температуру теплоносія (до 800 – 1000º С). Кожна фірма випускає декілька моделей сушарок різної продуктивності. Фірма Buttner (Німеччина), випускає 8 типів зерносушарок, продуктивність яких від 3 – 20 т/год [53].

Оригінальний пристрій барабана розроблений фірмою Newell Dunford Eng. Lim. (Великобританія). Теплоносій в зерновий шар подається (радіально) крізь пластини – жалюзі, які закріплені по колу барабану. Пластини – жалюзі ввігнутою частиною підхоплюють матеріал, розташований на вході теплоносія, і викидають його на зовнішню поверхню шару (яка розташована під кутом природного ухилу матеріалу). Таким чином відбувається протитокове сушіння матеріалу по товщині шару. Рух матеріалу повздовж барабану відбувається завдяки нахилу його вісі.

Значення вологонапруження для вітчизняних зерносушарок типу СЗСБ – 8, залежить від типу, ступеню заповнення та частоти обертання барабану, теплофізичних властивостей і розмірів зерна, а також від температури, вологості, швидкості агента сушіння коливається в межах 6...44 кг вип. вол./м ^{3} год. Питома витрата становить 5230 ...12500 кДж/ кг, а питома витрата електроенергії – 0,1...0,2 кВт год./ кг .

В табл. 1.24 – 1.25 наведені дані відомих виробників зерносушарок [52,55,57,59 – 62,65 – 71] щодо продуктивності, питомих витрат електроенергії та енергоносіїв в сушарках, які випускаються на сьогодні в різних країнах світу. Із узагальнення техніко-економічних показників витікає, що для більшості сушарок питомі витрати газу лежать в межах 0,6...4,6 м^3/(т·%), дизельного пального – 1,11...3,43 кг/(т·%), електроенергії – 0,85...5,3 кВт/т.

Таблиця 1.24. Техніко-економічні показники шахтних прямоточних та рециркуляційних зерносушарок [52,55,57,67 – 71]

№	Назва	Фірма	Країна	Продук-тивність, т/г	Пит. витрати електроен., квт.год/т	Пит. витрати диз. палива, кг/(т-%)	Пит. вит-рати газу, м ^{3}/(т-%)	Тип зерносу-шарки
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1.	ДСП-10	Карловський МЗ	Україна	10	2,0	1,22	1,74	**Прямоточні шахтні**
2.	ДСП-20			20	2,1	1,22	1,75	
3.	ЗШ-900	Дарина	Україна	15	1,47	1,1	–	
4.	GDT 300 12/2	RIELA	Німеччина	24	1,05	1,1	1,5	
5.	GDT 300 24/3			50	1,14			
6.	SD6	AG – Project	Польща	26,2	0,85	–	1,3	
7.	SD12			52,3	0,86			
8.	S 311	ARAJ	Польща	10,0	1,77	1,1	1,75	
9.	S 69			20,0	1,86			
10.	S 424			48,4	1,09			
11.	GDB –XN	Stela	Німеччина	31,3	1,18	1,2	1,31	
12.	CF – 25	MEPU	Фінляндія	25	1,5	1,3	1,78	
13.	ДСП-25	Карловський МЗ	Україна	25	2,2	1,22	1,75	**Рециркуляційні шахтні**
14.	А1-ДСП-50			50	2,2	1,2	1,7	
15.	СВ-20	АО “Зерномонтаж	Росія	20	3,9	1,833	1,0	
16.	Р1 – СЗГ	QED – Мельінвест	Росія	32	2,37	–	1,3	
17.	S30P	ARAJ	Польща	1,92	1,97	1,63	2,18	
18.	S311P			6,46	2,12	2,29	3,07	
19.	RCW-200	MEPU	Фінляндія	10,6	3,42	1,65	3,16	

Таблиця 1.25.Техніко – економічні показники пересувних рециркуляційних, колонкових та барабанних зерносушарок [52,55,59,60 – 62,67,69]

№	Назва	Фірма	Країна	Продукти вність, т/г	Пит. витрати ел. ен. квт.ч/т	Пит. витрати диз. палива кг/(т-%)	Пит. вит-рати газу м ^{3}/(т-%)	Тип зерносушарки
1.	К4-УС2-А	Одеський зпм	Україна	10	3,70	1,21		**Пересувні рециркуляційні і порціонні**
2.	M300 MRk	MEPU	Фінляндія	4,6	4,74	1,38		
3.	GT 1700	RIELA	Німеччина	4,5	4,9	1,27	1,7	
4.	GT 2500			6,2	4,5	1,32	1,78	
5.	PRT75ME	AGREX	Німеччина	9,75	1,53	2,0	–	
6.	PRT250ME			33,75	0,88			
7.	Competitor	Grain systems, Inc.	США	5,03	2,36	3,43	4,6	
8.	Competitor			10,86	2,81	3,43	4,6	
9.	AB-12B	Farm Fans	США	8	1,25	-	0,6	
10.	SP14	ARAJ	Польща	6,4	5,3	1,833	–	
11.	СК-15	Брянсельмаш	Білорусь	15	2	1,11	–	**Колонкові**
12.	СК-25			25	1,76	1,33	–	
13.	MC 1075	Mathews	США	28	1,61	–	1,32	
14.	FFI/CF/AB – 510H	Farm Fans	США	25,1	1,79	1,25	1,31	
15.	FFI/CF/AB – 1500H			46,1	2,82	2,49	2,6	
16.	DPSL 4530	Delux	США	11,04	2,24	–	1,54	
18.	DPSL 10560			25,75	1,89			
19.	TE2432E	Sukup	США	20	2,05	–	2,43	
20.	TE2432E			50	1,32		1,82	
21.	СБ-0,3	Теплопроцес	Росія	0,3	3,0	-	–	**Бара банні**
22.	СБ-2			2	3,5	1,6	–	
23.	СБ-6			6	2,25	1,19	–	

Питомі витрати теплоти в зерносушарках вітчизняного виробництва [40] показують, що найбільш економічною є шахтні рециркуляційні та колонкові з питомими витратами теплоти 4350 - 4840 кДж/кг (рис. 1.17).

Рис. 1.17. Питомі витрати теплоти в існуючих типах зерносушарок

Нормативні витрати теплоти зерносушарок в табл. 1.24 та 1.25 і на рис. 1.17 наведені для продовольчого зерна, що вище за нормативні 4000 кДж/кг вип. вологи на 10 – 25%. Для насіннєвого зерна нормативні витрати теплоти збільшуються на 30% і складають 5200 кДж/кг вип. вологи.

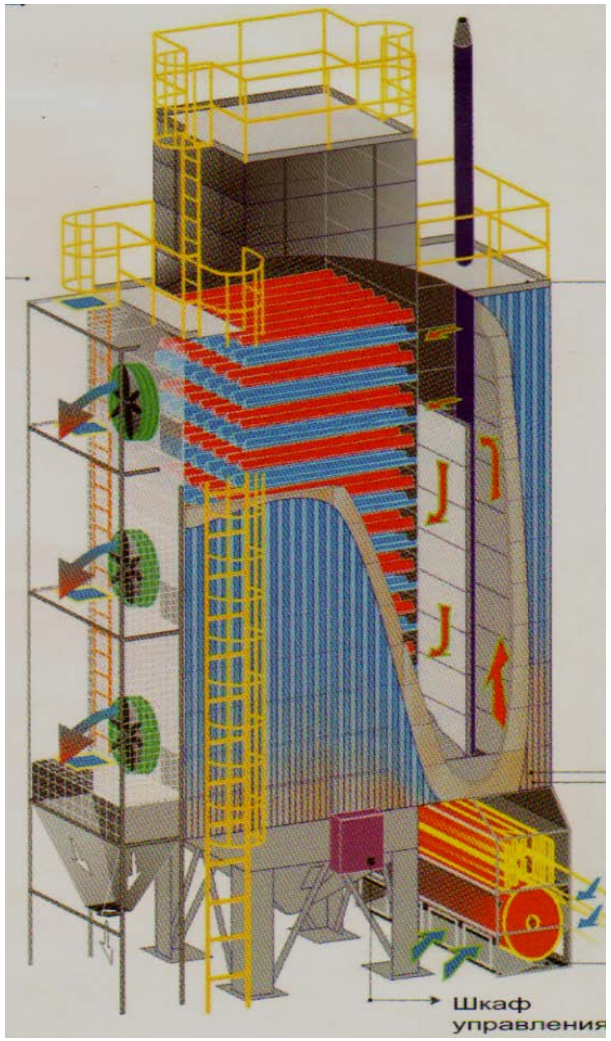
Зерносушарки можна поділити на чотири групи в залежності від заходів направлених на зниження питомих витрат теплоти на сушіння зерна [72]:

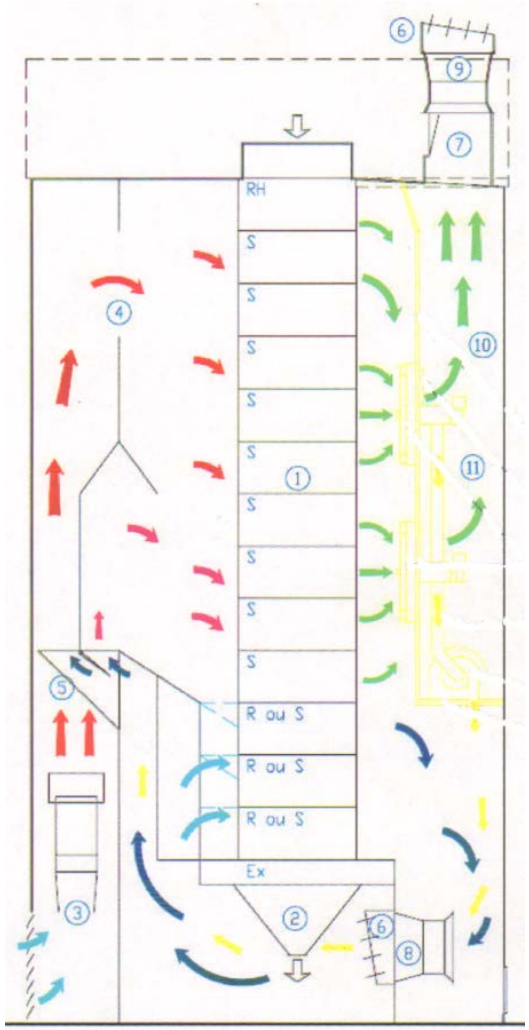
1. Зерносушарки, в яких не застосовують утилізації охолоджуючого повітря. Питомі витрати теплоти становлять 5000 кДж/кг вип. вологи, при коефіцієнті корисної дії 49,2% (рис. 1.18,а).

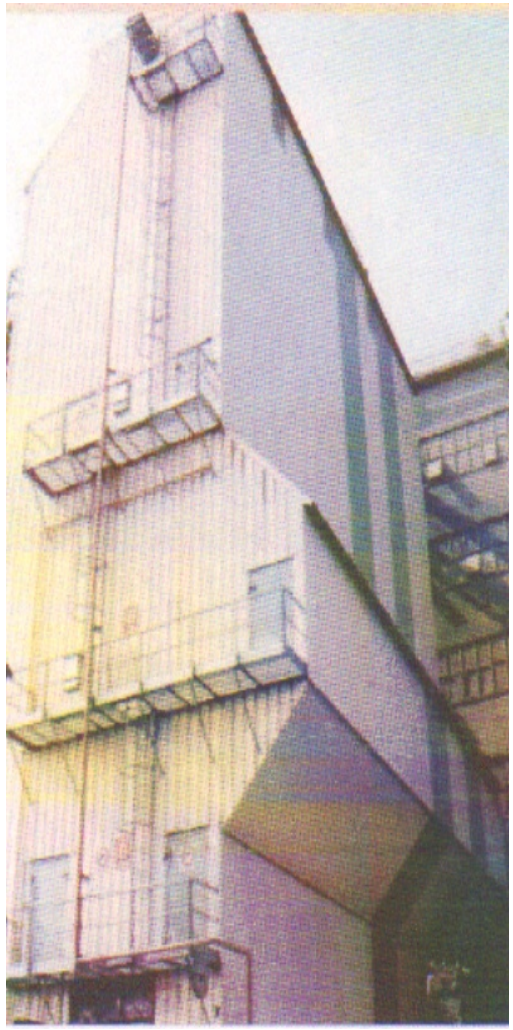
2. Установки з утилізацією охолоджуючого повітря і частково відпрацьованого ненасиченого теплоносія з нижніх зон сушіння. Утилізація охолоджуючого повітря знижує питомі витрати теплоти до 4800 кДж/кг вип. вологи. Збільшує коефіцієнт корисної дії до 52,4 % (рис. 1,18 б,в).

3. Сушарки, котрі використовують утилізацію охолоджуючого повітря і ненасиченого теплоносія. Для зерносушарок третьої групи витрати теплоти становлять 4350 – 4400 кДж/кг вип. вологи, ККД – 56,9% (рис.1.19)

4. Сушарки, котрі використовують утилізацію охолоджуючого повітря, ненасиченого і насиченого теплоносія. Для зерносушарок третьої групи, які використовують енергозберігаючі установки, питомі витрати теплоти можуть досягти 3244 кДж/кг вип. вологи з ККД – 77,5 % (рис. 1.20).







а) б) в)

Рис. 1.18. Шахтні прямоточні зерносушарки без утилізації теплоносія фірми AG – Project (Польща) (а) та з утилізацією теплоти охолоджуючого повітря фірми LAW (Франція) (б,в)

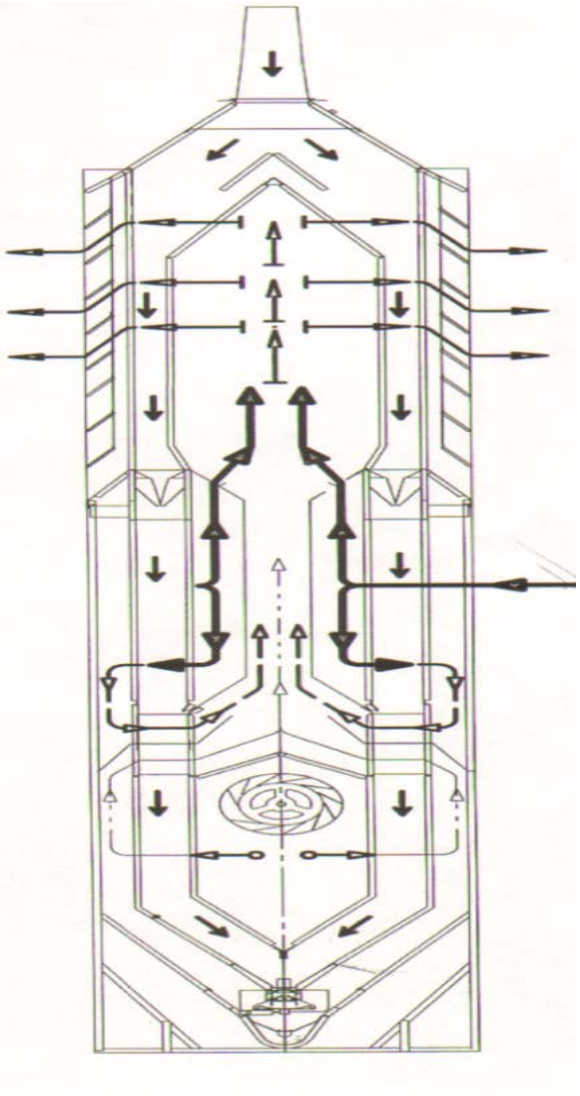
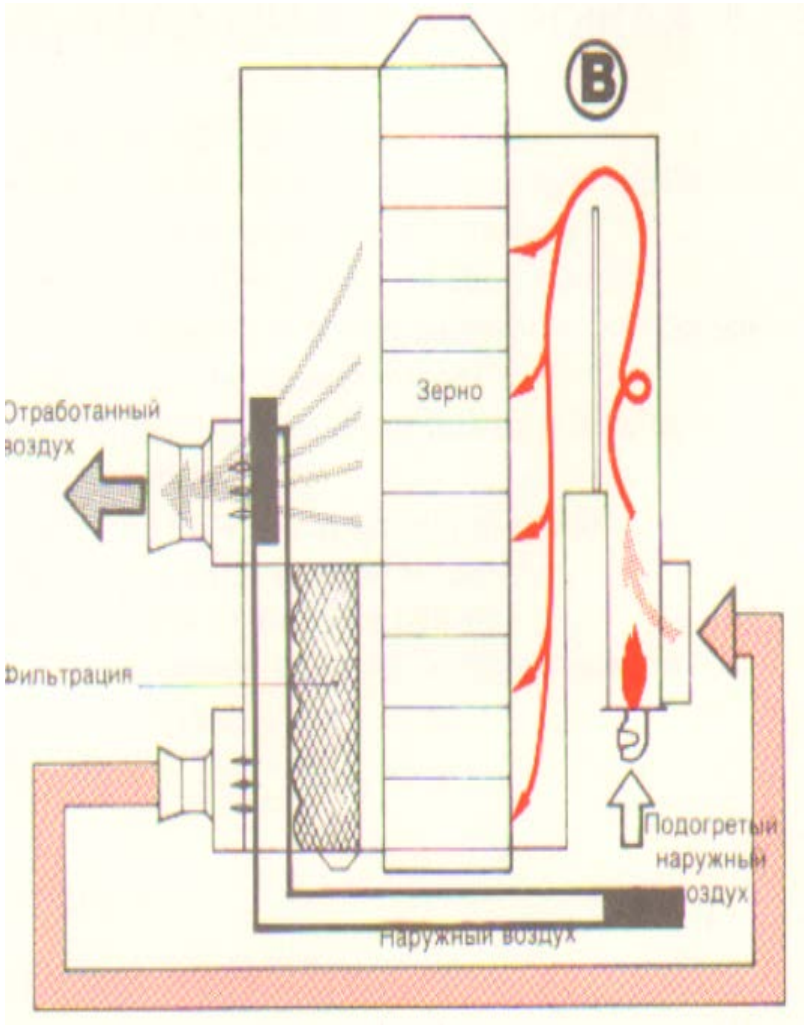
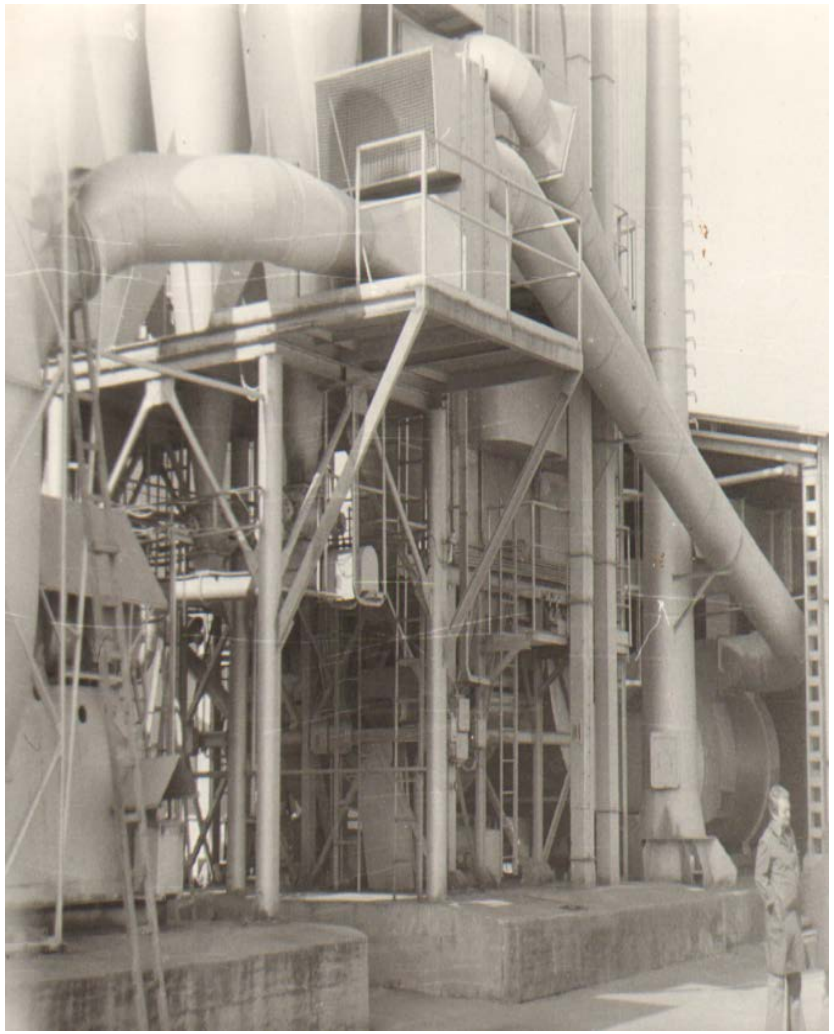


Рис. 1.19. Колонкові прямоточні зерносушарки з утилізацією теплоти охолоджуючого повітря та насиченого теплоносія фірми ОАО Мельинвест (Росія) СЗГ – 20Ж





а) б)

Рис. 1.20. Шахтні прямоточні зерносушарки з утилізацією теплоти охолоджуючого повітря, ненасиченого та насиченого теплоносія фірми LAW (Франція) (а) з проміжним теплоносієм та фірми ЛСО (Чехія) з тепловими трубами (б)

РОЗДІЛ 2
ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА КОНВЕКТИВНИМ МЕТОДОМ

2.1. Конвективний сушильний стенд

Визначення режимів сушіння насіннєвого зерна на конвективному сушильному стенді проводилось в «елементарного» шару і потім відбувався перехід до товстого шару з роботою на цих режимах в теплонасосній зерносушарці (розділі 3).

Найбільш точно під елементарним шаром необхідно розуміти шар товщиною в одне зерно, який безпосередньо контактує з теплоносієм і є найбільш небезпечною ділянкою зернового шару, підігрів і сушка якого відбувається з максимальною (в порівнянні з всім шаром) швидкістю. Зміна якості зерна при сушінні в шарі любої товщини і при любому стані визначається зміною якості в елементарному шарі.

Крім того, в елементарному шарі найбільш просто забезпечуються умови рівномірного прогрівання зерна, відповідно, для цього шару найбільш достовірно може бути визначена допустима температура теплоносія в залежності від якісних показників насіння.

Опис експериментальної установки

Для дослідження кінетики процесу сушіння насіння ріпаку розроблений експериментальний конвективний стенд (рис. 2.1).

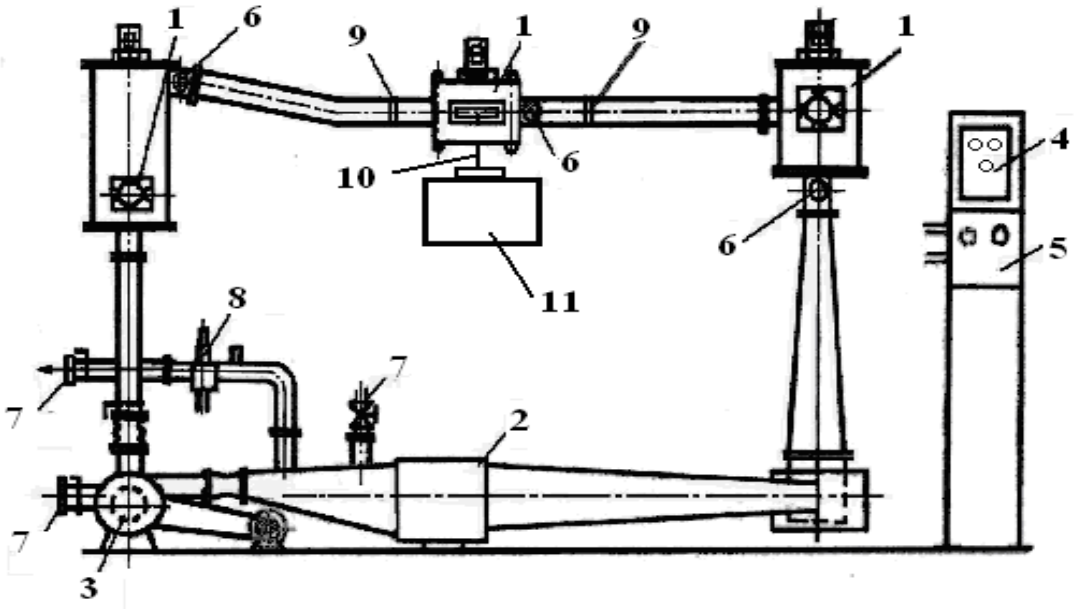


Рис. 2.1. Схема експериментального стенду:

1 – сушильна камера; 2 – калорифер; 3 – вентилятор; 4 – регулятор температури; 5 – щит керування; 6 – термометри опору; 7 – патрубки з

шиберами;
8 – психрометр; 9 – спеціальні решітки; 10 – штанга терезів; 11 – терези.

Технічна характеристика конвективного сушильного стенду:

Температура теплоносія	30 – 150°С
Швидкість руху теплоносія	0,5 – 5 м/с

Експериментальний стенд складається із системи ізольованих повітропроводів з пристроями для нагрівання та циркуляції теплоносія, сушильних камер, системи контролю і підтримання температури теплоносія, автоматичного збору і обробки інформації про перебіг процесу зневоднення матеріалу [73,74].

Ділянка теплової підготовки повітря (2) виконана у вигляді прямокутного короба, в якому розміщений трьохсекційний електропідігрівач потужністю 10 кВт (рис.2.1). Для точної підтримки заданої температури калорифер підключений до автоматичної системи регулювання, яка складається з електричного регулятора температури ЕРТ – 4 (4) та термометрів опору ТСМ-50 (6).

Рух теплоносія відбувається за допомогою відцентрового вентилятора (3) середнього тиску. Зміна швидкості руху теплоносія досягається регулюванням частоти обертання вентилятора (3) на щиті керування (5). Співвідношення між відпрацьованим та свіжим повітрям можна регулювати за допомогою шиберів на патрубках (7).

Стенд доукомплектований допоміжним обладнанням (рис. 2): аналоговим цифровим перетворювачем *i-7018*, конвертором-інтерфейсом *i-7520* та персональним комп'ютером, що дозволяє проводити процес сушіння насіння ріпаку в автоматичному режимі за допомогою розробленої прикладної програми "Sooshka".

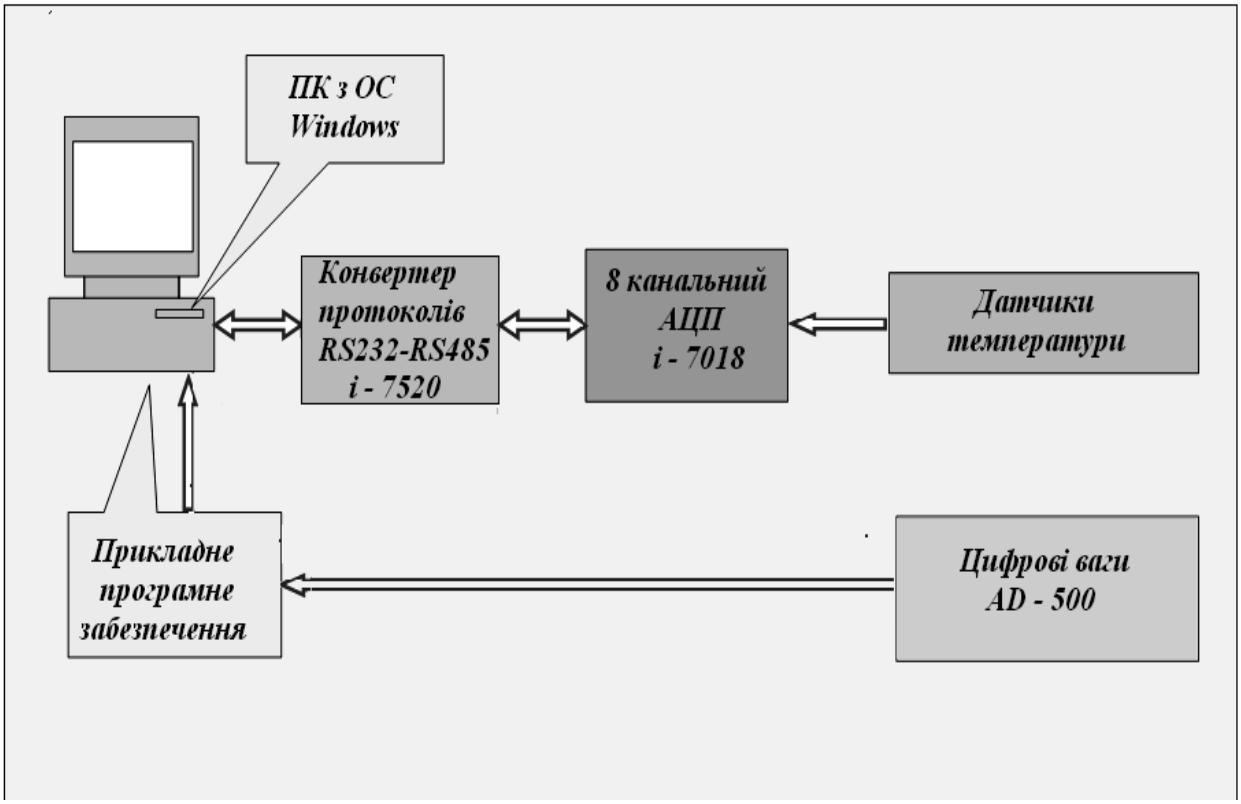


Рис. 2.2. Структурна схема автоматизованого збору
та обробки інформації із конвективного сушильного стенду

Температура теплоносія і матеріалу під час сушіння регіструється за допомогою термоелектричних перетворювачів (тип L), які вмонтовані в спеціальні голчаті зонди. Аналогові сигнали з термоелектричних датчиків перетворюються в АЦП в цифрову форму і за допомогою інтерфейсу передаються на комп'ютер. Точність виміру температур ±1°С.

Розроблена програма автоматичного збору та обробки інформації про зміну маси та температури зразка в ході видалення вологи, розрахунки кінетики та динаміки сушіння в абсолютних та відносних координатах. Це дає змогу більш точно, оперативно та надійно одержувати та порівнювати кінетичні та швидкісні характеристики сушіння колоїдних капілярно-пористих матеріалів.

Методика проведення експерименту:

1. За об'єкт досліджень вибрано насіння озимого ріпаку сорту Чорний Велетень, сорт селекції Вінницької державної сільськогосподарської дослідної станції. Сорт інтенсивного типу, належить до родини капустяних (хрестоцвітих) Brassica, виду ріпакових Napus, середньостиглий 300 – 323 днів, олійного і кормового використання, двонульовий (00). Занесений до Реєстру сортів рослин України з 2000 року. Авторське свідоцтво №0343 [75] .

2. Перед проведенням досліджень визначаємо початкову вологість ріпаку за ДСТУ 4138 – 2002 [76]. Ріпак засипаємо в бюкси і висушуємо в сушильній шафі при температурі 105ºС на протязі 5 годин. Після закінчення сушіння бюкси виймають з сушильній шафи і ставлять в ексикатор для охолодження на 15 –30 хв. Охолоджені бюкси з ріпаком зважують у закритому стані на аналітичних вагах.

Вологість ріпаку відносно маси сухої речовини обчислюють у відсотках:

$$W = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_1} \cdot 100\%, \qquad (2.1)$$

m_1 – маса порожньої бюкси (з кришкою), г;

m_2 – маса бюкси з наважкою до сушіння, г;

m_3 – маса бюкси з наважкою після сушіння, г;

3. Після встановлення на стенді режиму сушіння на штангу терезів в сушильній камері 1 кладуть корзину з ріпаком і вмикається комп'ютерна програма збору та обробки інформації, яка безперервно реєструє час досліду, температуру теплоносія, температуру на поверхні та в середині шару матеріалу, зміну маси навіски.

4. Висушений ріпак виймають з сушильної камери і проводять аналіз на схожість та кислотне число олії, а також визначають кінцеву вологість матеріалу за пунктом 1 та формулою 2.1.

5. Після визначення абсолютно сухої маси зразка комп'ютерна програма визначає поточну вологість матеріалу *W* під час сушіння та розраховує і будує криві сушіння та швидкості сушіння: $W = f(\tau)$, $dW/d\tau = f(W)$.

2.2. Визначення режимів сушіння та вплив на кінетику процесу

Основними факторами від яких залежить вибір раціонального режиму сушіння насіннєвого зерна є інтенсифікації процесу сушіння та висока якість насіннєвого матеріалу.

Дослідження кінетики сушіння насіннєвого зерна в елементарному шарі проводились на експериментальному конвективному стенді, показаному на рис. 2.1, від зміни параметрів теплоносія: температури – від 50 до 80 ºС, швидкості – від 0,6 до 1,5 м/с та вологовмісту – від 10 до 12 г/кг с. п.. Як об'єкт дослідження вибрано насіння вівса, ячменю, пшениці та ріпаку [73,74,77].

Перед проведенням дослідів зерно штучно зволожували та визначали початкову вологість, згідно методики проведення експерименту. Зволоження насіння відбувалось до його природної вологості під час збирання врожаю. Так початкова вологість для пшениці, ячменю та вівса – 20%, для ріпаку – 17%.

З літературних джерел відомо, що нагрівання насіння не повинно перевищувати граничнодопустиму температуру. Так для насіння ріпаку вона складає 30 – 40ºС, для насіння пшениці, вівса та ячменю 35 – 45ºС, а для насіння кукурудзи 45 – 55ºС. [2,24,25,26,30]. Сушіння зерна проводили при температурі теплоносія 70ºС і вище, при цьому відбувались значні втрати схожості насіння, що недопустимо при високих цінах на насіннєве зерно.

Тому знижуючи температуру теплоносія до 50 ºС, ми намагаємося як найменше знизити вплив температуру теплоносія на насіннєві властивості зерна, і підвищуючи його до 80ºС - спостерігаємо підвищення інтенсивності процесу за рахунок зменшення якості матеріалу (див. п. 2.3).

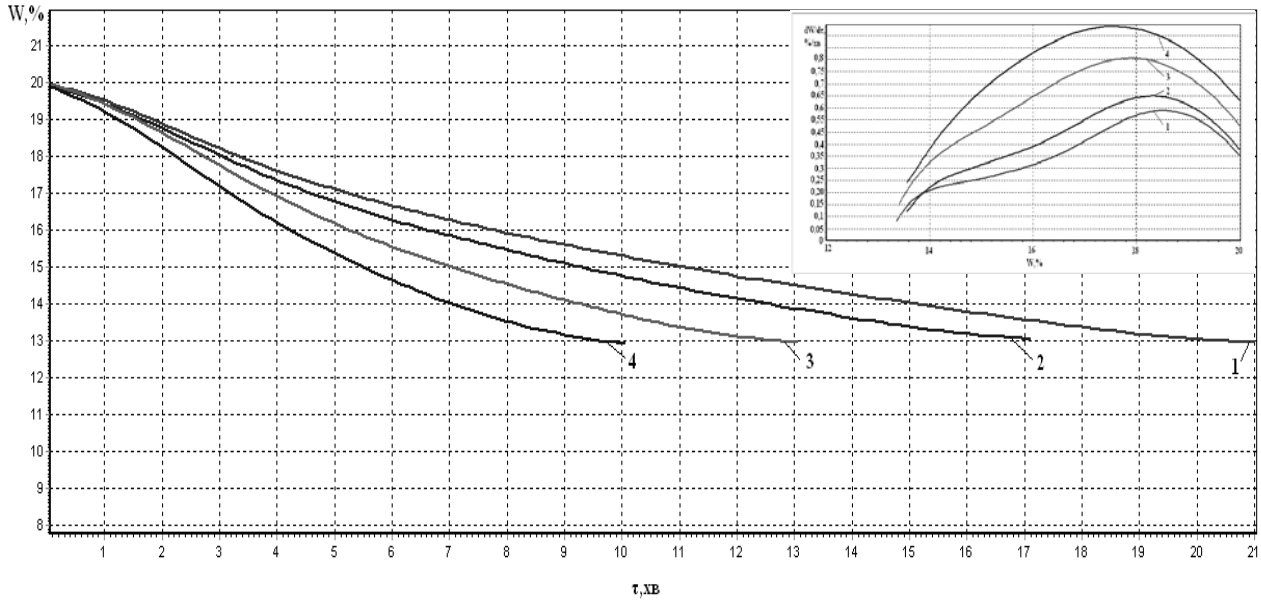
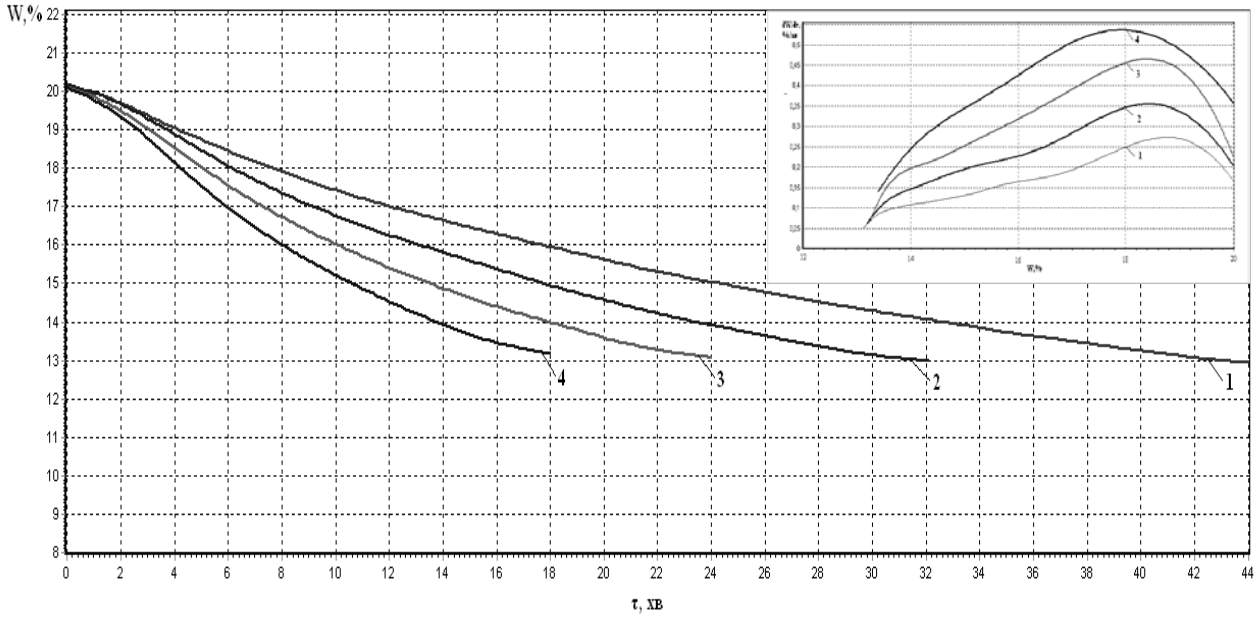


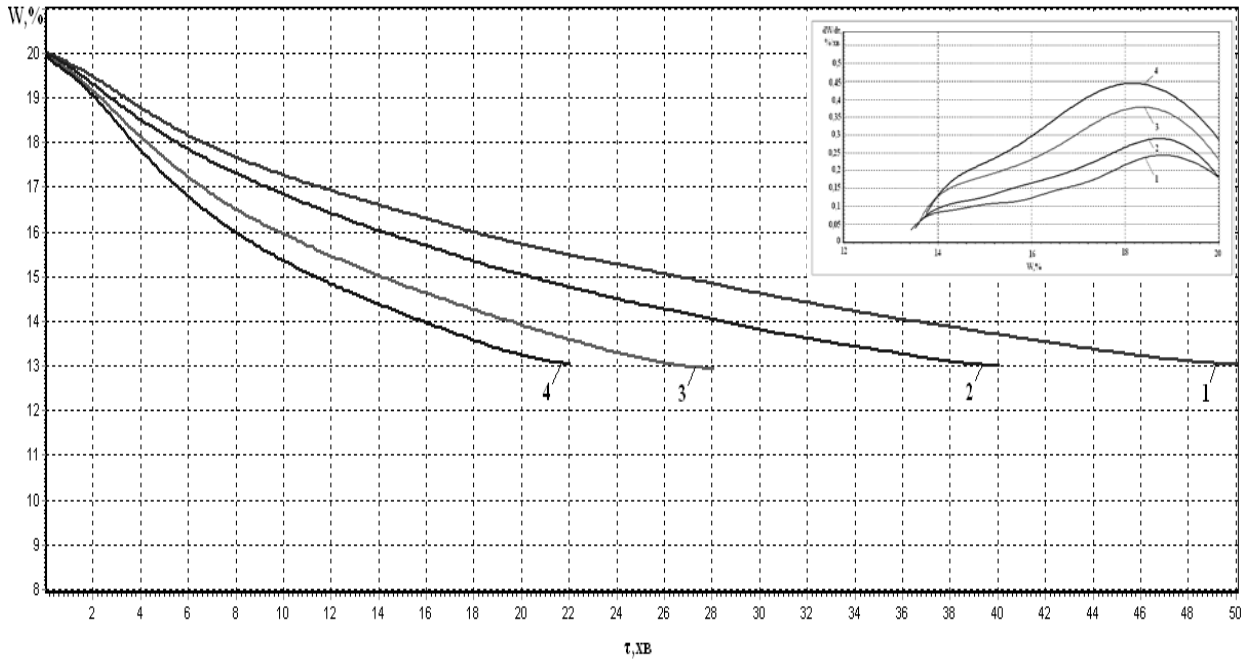
Рис.2.3. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння вівса в елементарному шарі:

V = 1,5 м/с, W = 20%; d = 10 г/кг с. п.: 1 – 50°С; 2 – 60°С; 3 – 70°С; 4 – 80°С.

При збільшенні температури теплоносія з 50 до 80 °С тривалість процесу сушіння вівса зменшується в 2,1 рази, для ячменю в 2,27 рази, для пшениці 2,44 рази (рис.2.3, 2.4). Сушіння відбувається в періоді падаючої швидкості сушіння з попереднім прогріванням вівса для температур теплоносія 50°С до максимальної швидкості сушіння 0,59%/хв, для ячменю – 0,25%/хв., для пшениці – 0,27%/хв, тобто сушіння вівса проходить в 2,36 – 2,19 рази швидше за ячмінь та пшеницю відповідно. Період постійної швидкості сушіння не спостерігається.



а)



б)

Рис. 2.4. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння пшениці (а) та ячменю (б) в елементарному шарі:

V = 1,5 м/с, *W* = 20%; *d* = 10 г/кг с. п.: 1 – 50°С; 2 – 60°С; 3 – 70°С; 4 – 80°С.

Зменшення температури теплоносія з 80 до 50ºС збільшує тривалість сушіння ріпаку в 2,4 рази (рис.2.5) Процес проходить в періоді падаючої швидкості сушіння з попереднім прогріванням матеріалу до максимальної швидкості сушіння в точці К. Максимальна швидкість сушіння при підвищенні температури теплоносія збільшується і зміщується в область високої вологості і при температурі теплоносія 80ºС складає 1,28%/ хв. Період постійної швидкості не спостерігався при сушінні насіння ріпаку в елементарному шарі.

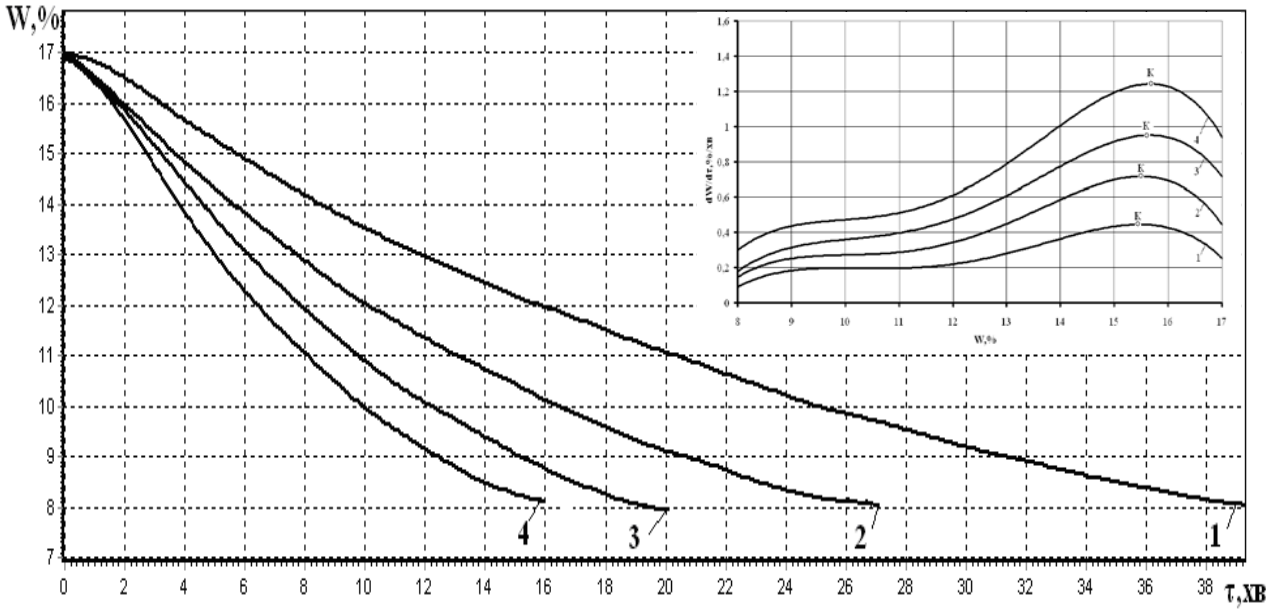


Рис. 2.5. Вплив температури теплоносія на кінетику сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі:

V = 1,5 м/с, *W* = 20%; *d* = 10 г/кг с. п.: 1 – 50°С; 2 – 60°С; 3 – 70°С; 4 – 80°С.

На рис.2.3 – 2.5 наведено криві кінетики сушіння зерна в діапазоні температур теплоносія 50 – 80ºС. З підвищенням температури тривалість процесу скорочується в 2,1…2,5 рази.

Побудовані криві швидкості сушіння в координатах показують, що процес сушіння в основному проходить в другому періоді сушки і на стадії прогрівання зерна спостерігається його максимальне значення.

Можливості інтенсифікації сушіння зерна насіннєвого зерна за рахунок підвищення температурного рівня процесу обмежені, оскільки навіть невисокі температури негативно впливають на якісні показники насіння: схожість і енергію проростання.

Проведені теоретичні дослідження показали, що фактором, здатним впливати на інтенсивність процесу тепломасопереносу особливо при низьких температурах, є *вологовміст теплоносія*, що особливо важливо при низькотемпературному сушінні зерна насіннєвого призначення [2,51,78].

З наведених на рис.2.6 даних видно, що при зниженні вологовмісту теплоносія з 12 до 10 г/кг с. п тривалість процесу сушіння вівса зменшується на 23%. Процес сушіння відбувається в періоді падаючої швидкості сушіння з попереднім прогріванням матеріалу до максимальній швидкості сушіння 0,52 та 0,67%/хв відповідно для вологовмісту теплоносія 10 та 12 г/кг с. п. Період постійної швидкості сушіння не спостерігали [79].

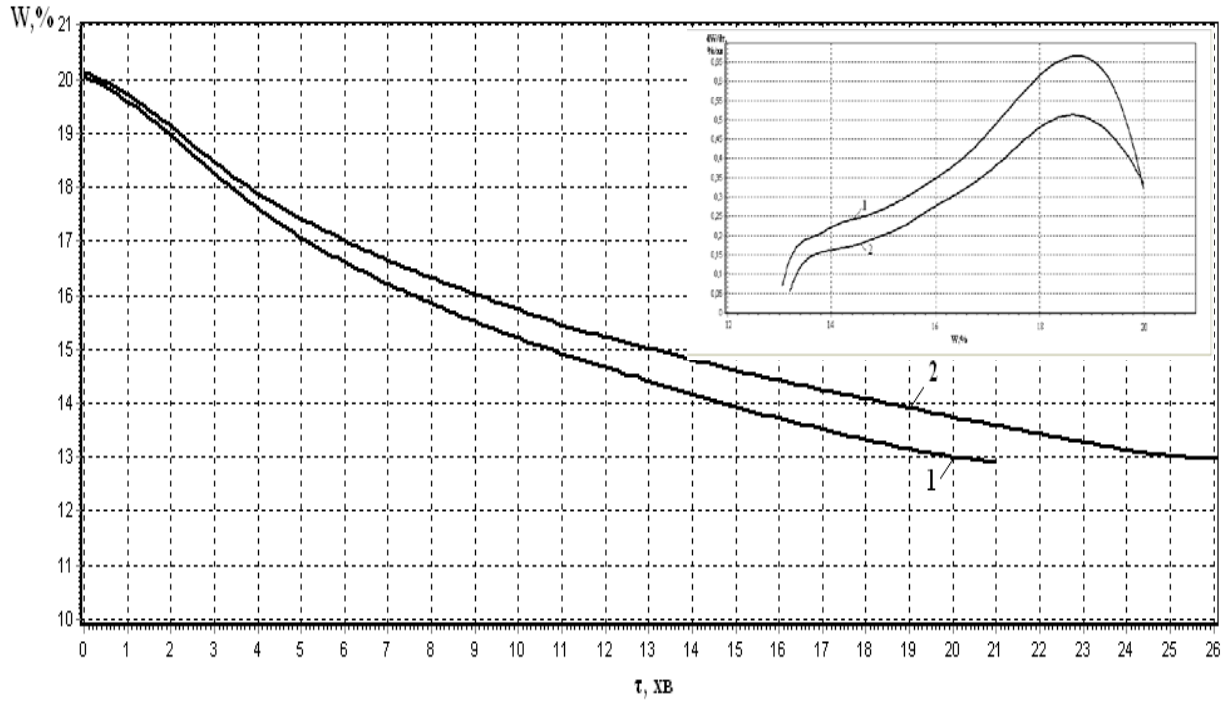


Рис. 2.6. Вплив вологовмісту теплоносія на кінетику сушіння насіння вівса в елементарному шарі:
t = 50 ºС; V = 1, 5 м/с; W = 20%; 1 – d = 10 г/кг с. п.; 2 – d = 12 г/кг с. п.

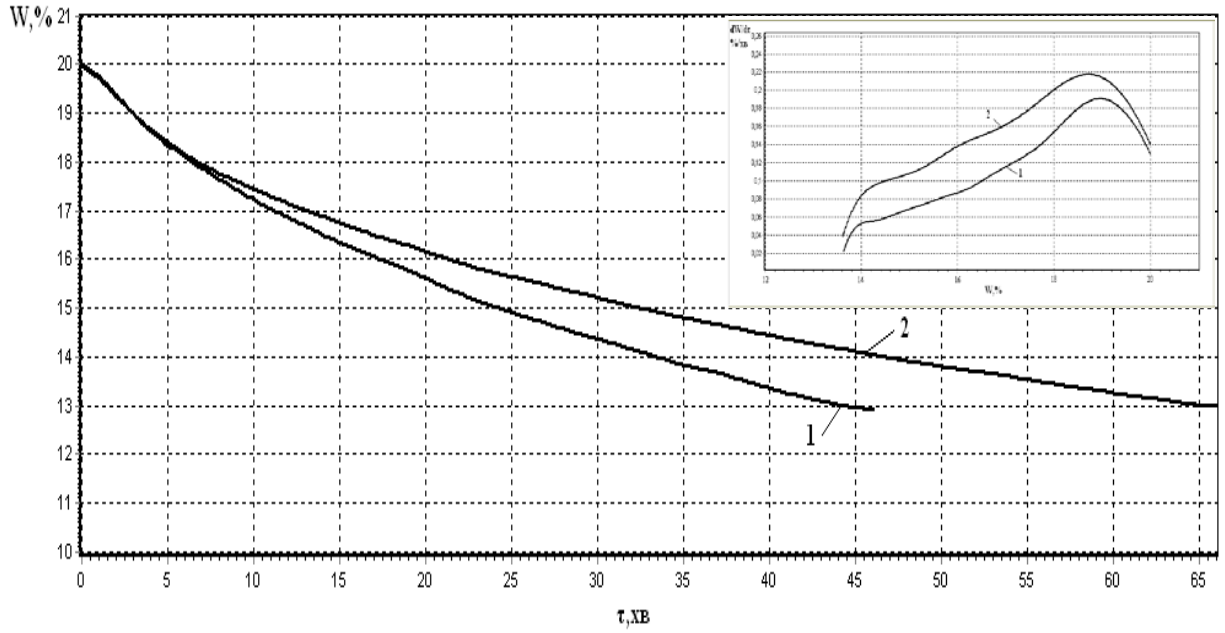


Рис.2.7. Вплив вологовмісту теплоносія на кінетику сушіння насіння ячменю в елементарному шарі:
t = 50 ºС; V = 1, 5 м/с; W = 20%; 1 – d = 10 г/кг с. п.; 2 – d = 12 г/кг с. п.

Тривалість процесу сушіння для насіння ячменю від дії вологовмісту теплоносія з 12 до 10 г/кг с. п зменшується на 30%, що в 2,5 рази більше за тривалість при сушінні вівса (рис.2.7). Характер кривих залежності швидкості сушіння від впливу вологовмісту теплоносія для ячменю, подібні кривим залежності швидкості сушіння для вівса та пшениці.

Зменшення вологовмісту теплоносія з 12 до 10 г/кг с. п, при сушінні пшениці (рис.2.8), зменшує тривалість процесу на 18%. Максимальна швидкість сушіння при вологовмісту теплоносія 10 г/кг с.п. складає 0,26 %/хв, що в 2 рази менше за швидкість сушіння вівса.

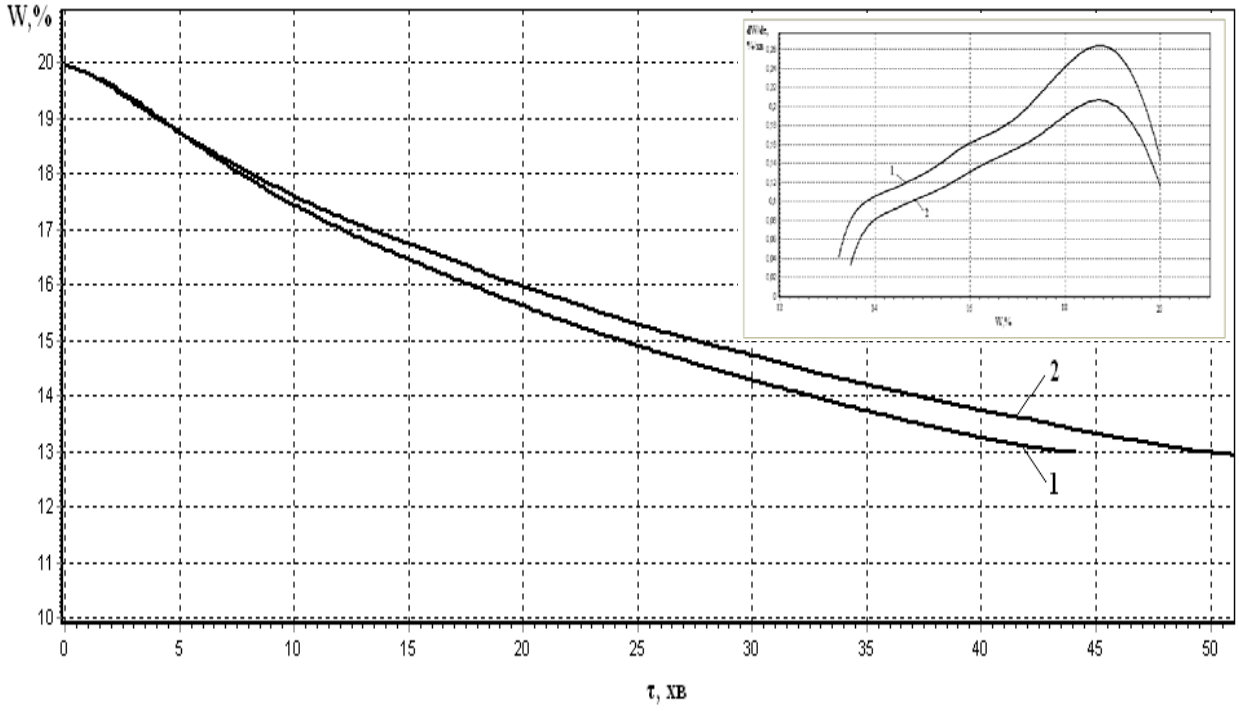


Рис.2.8. Вплив вологовмісту теплоносія на кінетику сушіння насіння пшениці в елементарному шарі:
t = 50 ºС; V = 1, 5 м/с; W = 20%; 1 – d = 10 г/кг с. п.; 2 – d = 12 г/кг с. п.

При зниженні вологовмісту теплоносія інтенсивність процесу збільшується. Зменшення вологовмісту теплоносія з 12 до 10 г/кг с. п. прискорює процес сушіння насіння ріпаку на 23%. Процес сушіння відбувається в періоді падаючої швидкості сушіння з попереднім прогріванням матеріалу до максимальної швидкості 0,35 – 0,43%/хв. в точці К, відповідно для вологовмісту теплоносія 10 та 12 г/кг с.п (рис. 2.9).

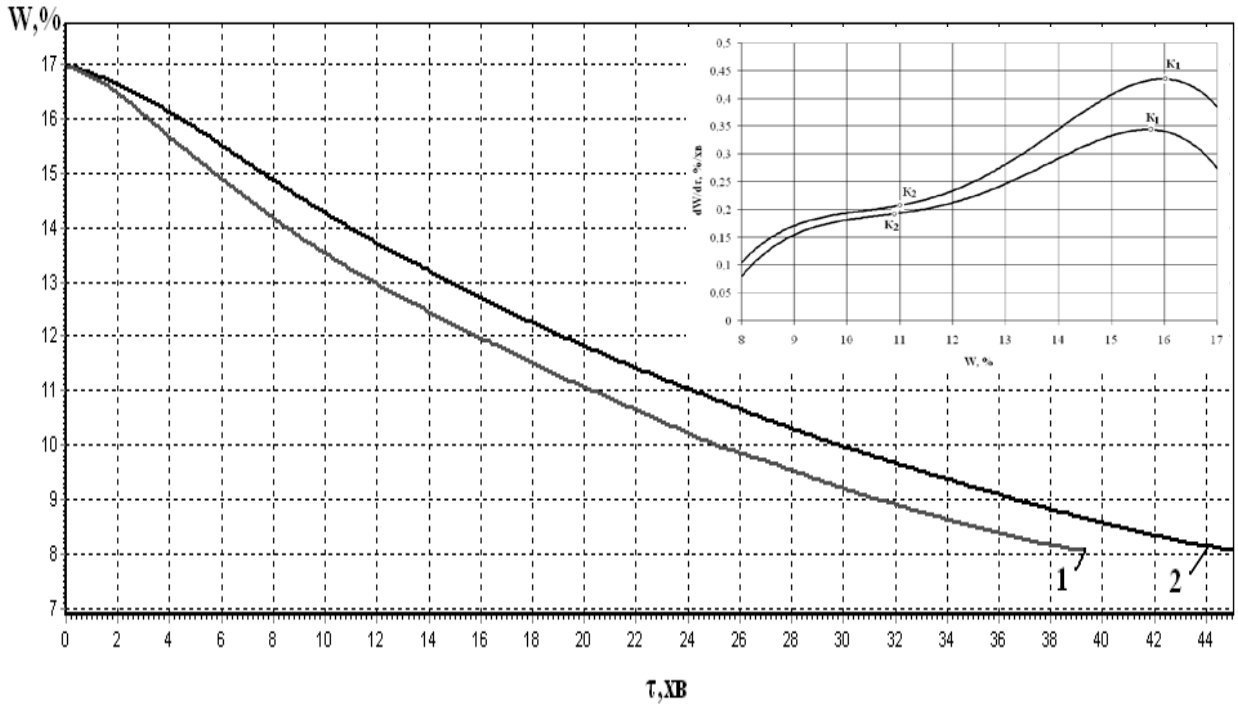


Рис. 2.9. Вплив вологовмісту теплоносія на кінетику сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі:
t = 50 ºС, *W* = 17%, *V* = 1,5 м/с; 1 – 10 г/кг с .п. 2 – 12 г/кг с .п.

Збільшення *швидкості руху теплоносія* від 0,6 до 1,5 м/с зменшує тривалість сушіння вівса, ячменю та пшениці в 1,36 – 1,38 раз, а ріпаку в 1,16 раз (рис. 2.10, 2.11, 2.12).

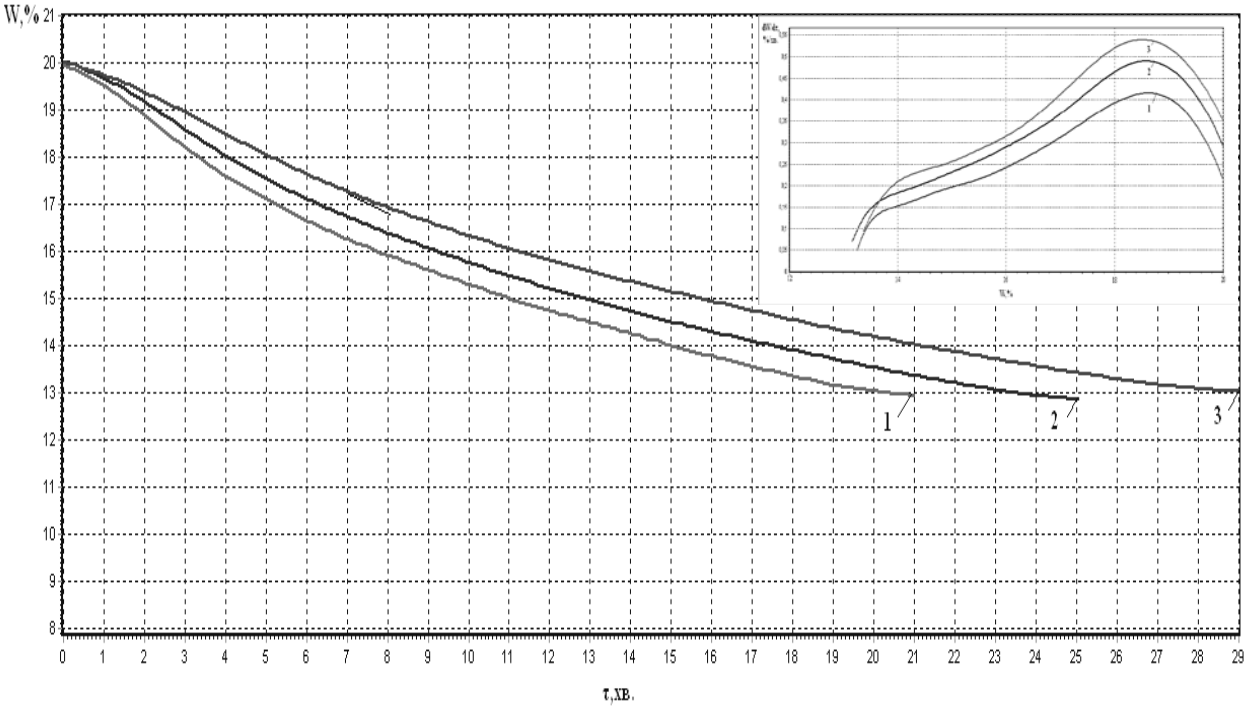


Рис. 2.10. Вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння насіння вівса в елементарному шарі:
t = 50°С, *W* = 20%; *d* = 10 г/кг с. п.:1 – 0,6 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 1,5 м/с.

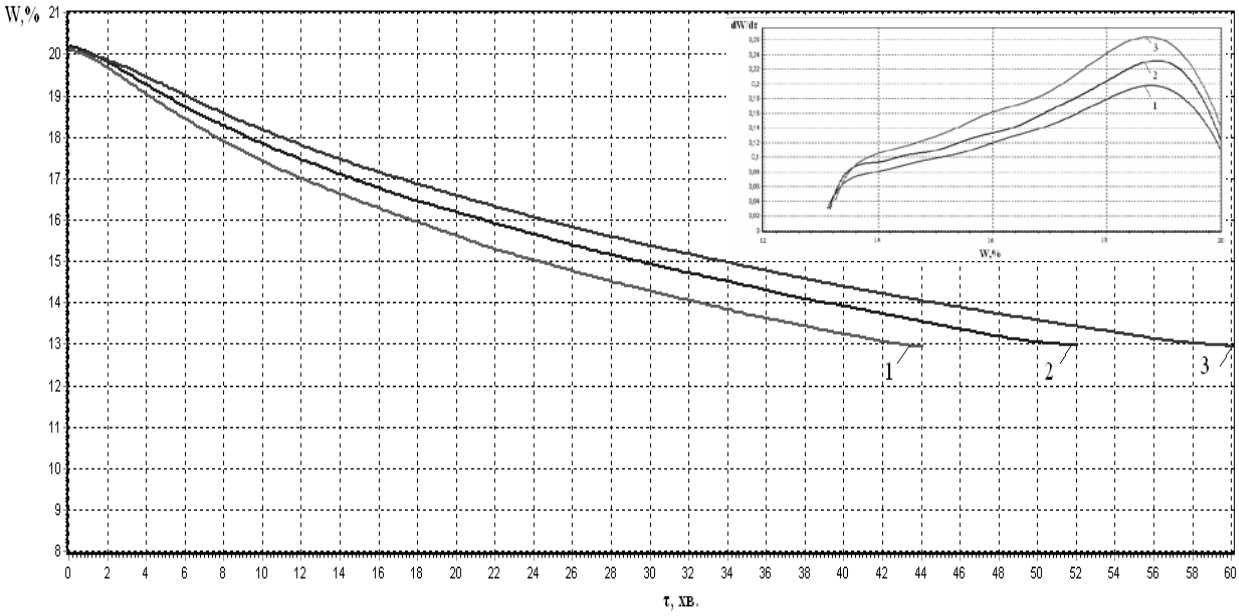


Рис. 2.11. Вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння насіння вівса в елементарному шарі:
t = 50°С, *W* = 20%; *d* = 10 г/кг с. п.:1 – 0,6 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 1,5 м/с.

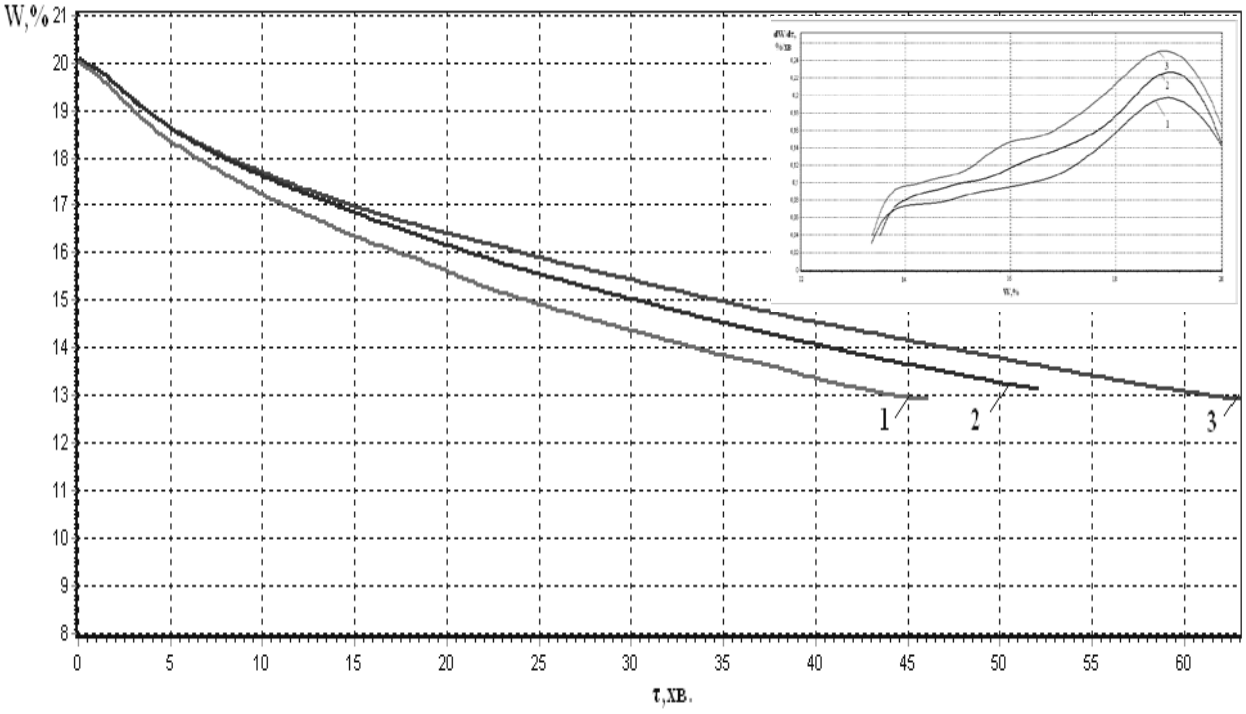


Рис.2.12. Вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння насіння ячменю (а) та пшениці (б) в елементарному шарі:
t = 50°С, W = 20%; d = 10 г/кг с. п.: 1 – 0,6 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 1,5 м/с.

На кривих швидкості сушіння характер процесу сушіння зерна залишається незмінним. Максимальна швидкість сушіння для насіння ріпаку в точці К наступає одночасно і в інтенсивному режимі, при швидкості теплоносія 1,5 м/с складає 0,44%/хв.., а при швидкості 0,6 м/с – 0,34%/хв.. (рис. 2.13) [73,74].

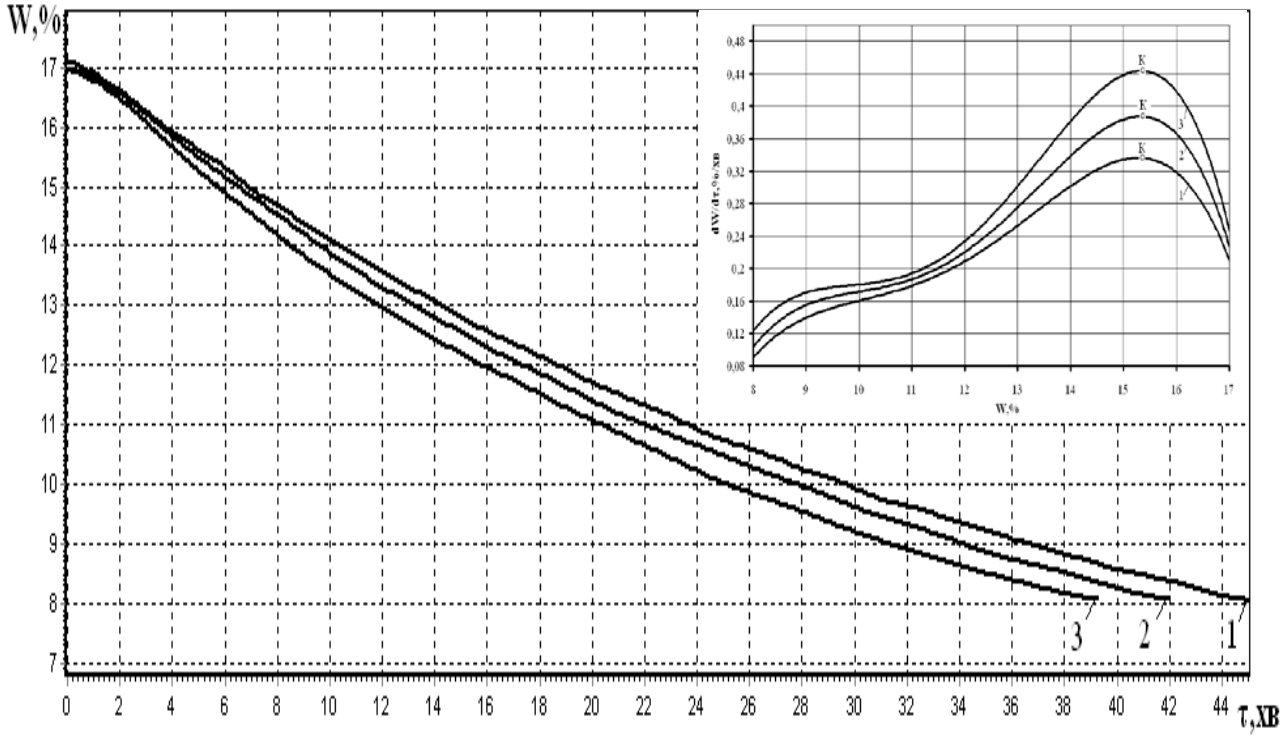


Рис. 2.13. Вплив швидкості теплоносія на кінетику сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі:
t = 50°С, W = 20%; d = 10 г/кг с. п.: 1 – 0,6 м/с; 2 – 1,0 м/с; 3 – 1,5 м/с.

Наступним фактором, який впливає на кінетику процесу сушіння є *початкова вологість насіння ріпаку*, яка вибрана в діапазоні W = 12 – 25,6%, що відповідає вологості насіння при збиранні його при різних кліматичних умовах..

Кінетика процесу сушіння ріпаку показує, що збільшення початкової вологості від 12% до 25,6% збільшує тривалість в 2,2 рази (рис. 2.14) [73,74].

Криві швидкості сушіння ріпаку від різної початкової вологості насіння ріпаку показали, що чим більша вологість матеріалу, тим інтенсивніше йде її видалення Характер процесу сушіння, в залежності від початкової вологості, насіння ріпаку, також проходить в періоди нагрівання та падаючої швидкості сушіння. Підвищення максимальної швидкості сушіння в критичній точці К відбувається в бік збільшення початкової вологості ріпаку. Максимальна швидкість сушіння ріпаку відповідає насінню при початковій вологості 25,6% і складає 0,58 %/хв., що в 1,93 рази більше максимальної швидкості сушіння при початковій вологості 12%.

Збільшення вологості теплоносія на 8% від 16 до 24% при сушінні зернових культур: вівса, пшениці та ячменю (рис. 2.15 – 2.17) – збільшує тривалість сушіння в 2,8 – 3 рази. Тривалість сушіння ячменю найбільша і при початковій вологості 24% складає 85 хвилин, що в 2,8 рази більше за тривалість сушіння вівса та в 1,3 рази більше за тривалість сушіння пшениці.

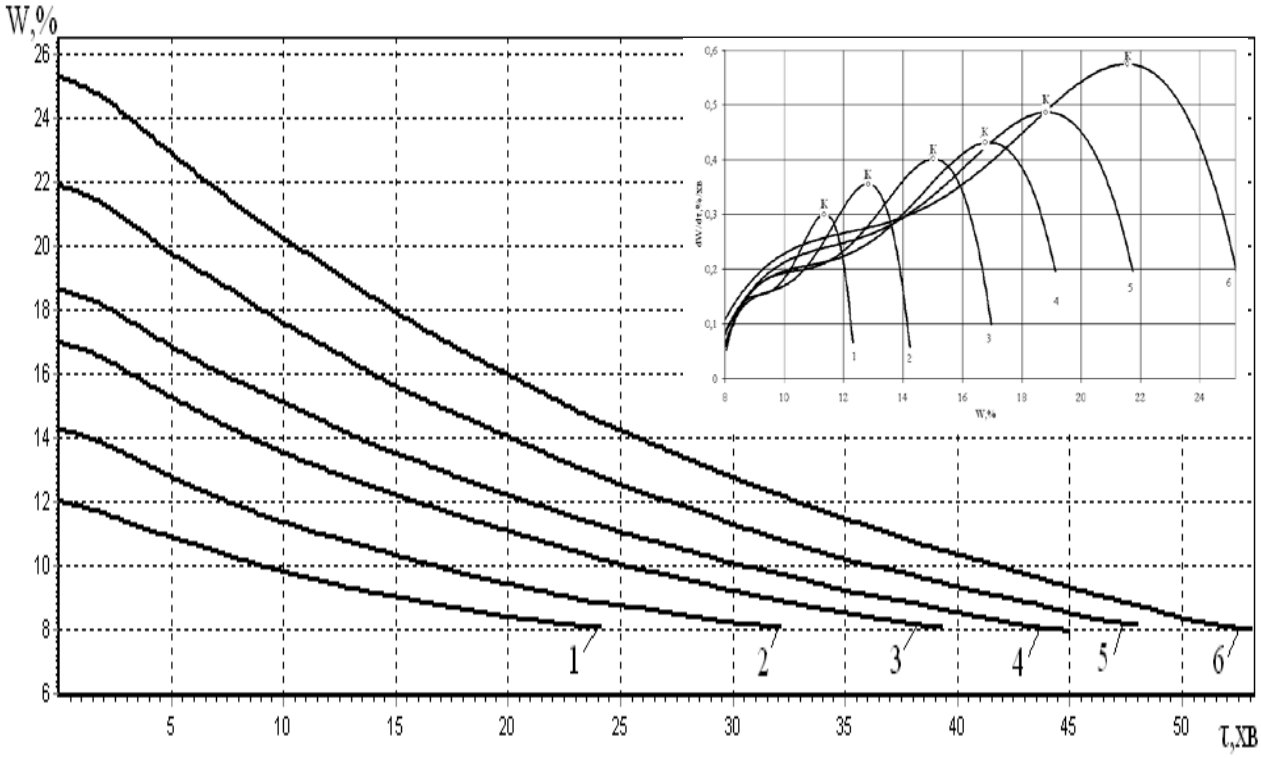


Рис. 2.14. Вплив початкової вологості насіння на кінетику сушіння ріпаку в елементарному шарі:
t = 50ºС, V = 1,5 м/с, d = 10 г/кг с. п.
:1 – 12%; 2 – 14,2%; 3 – 17%; 4 – 18,6 %; 5 – 22%; 6 – 25,6 %.

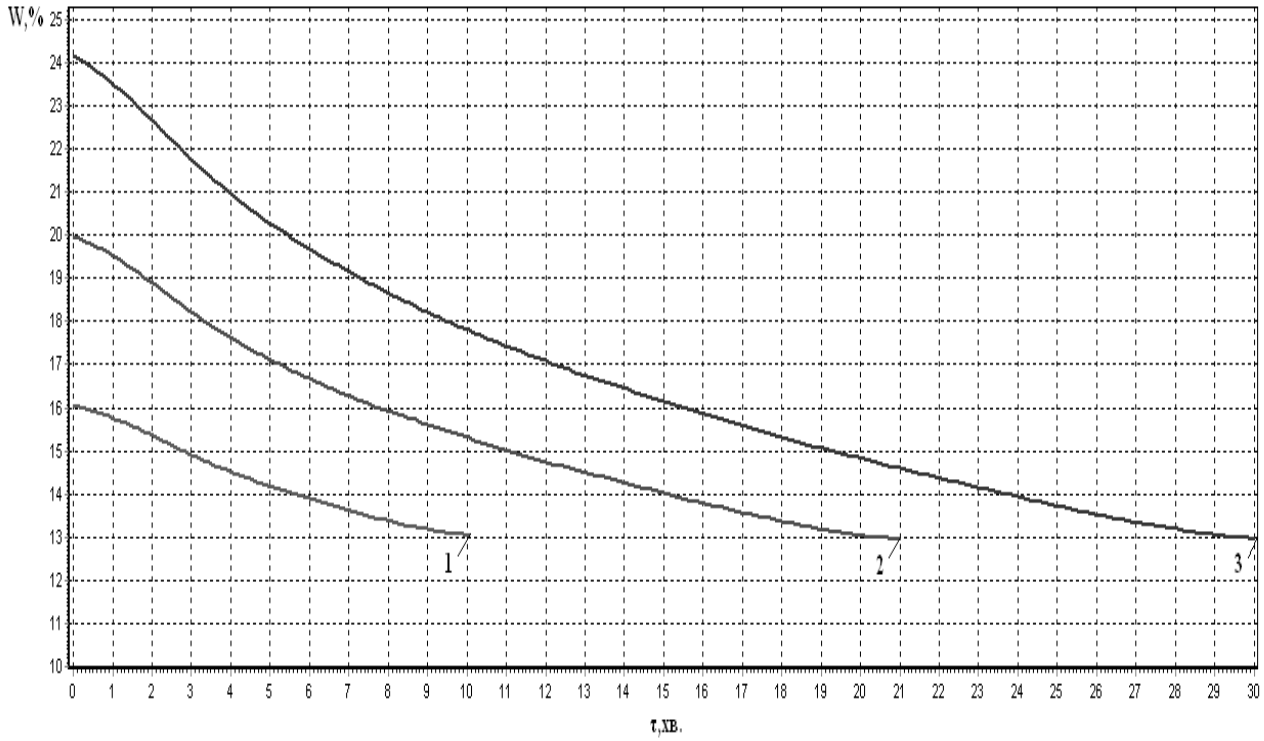


Рис. 2.15. Вплив початкової вологості насіння на кінетику сушіння вівса в елементарному шарі:
t = 50ºС, V = 1,5 м/с, d = 10 г/кг с. п.: 1 – 16%; 2 – 20%; 3 – 24%.

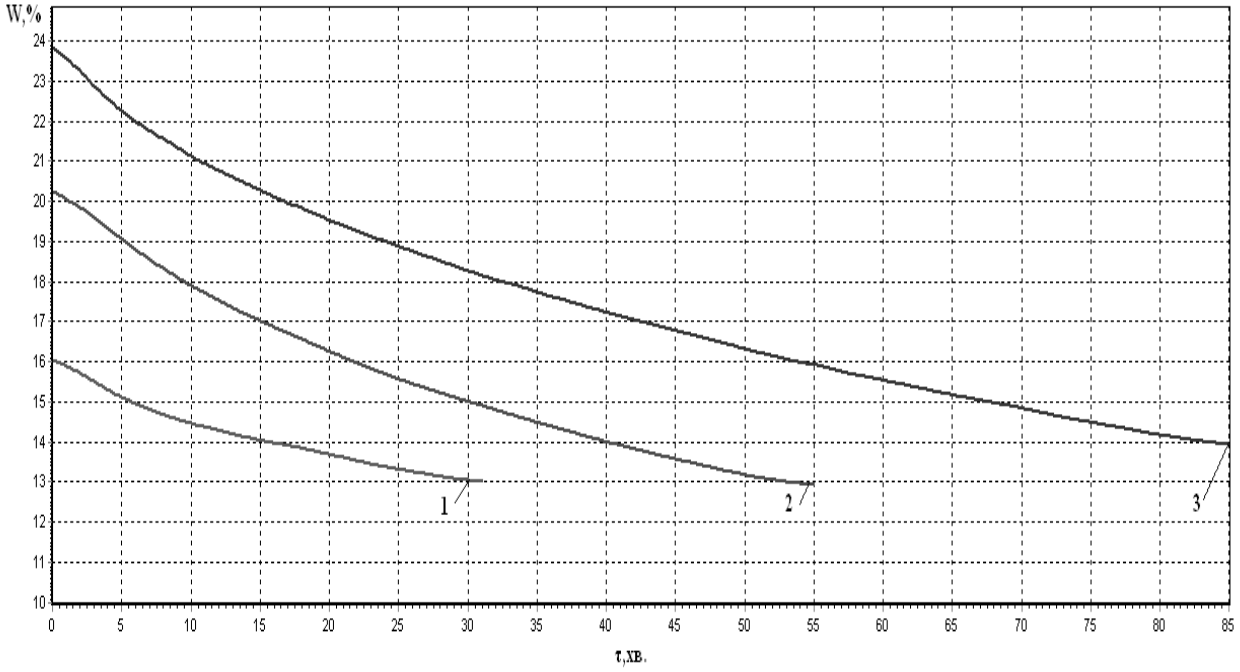


Рис. 2.16. Вплив початкової вологості насіння на кінетику сушіння ячменю в елементарному шарі:
t = 50ºС, V = 1,5 м/с, d = 10 г/кг с. п.: 1 – 16%; 2 – 20%; 3 – 24%.

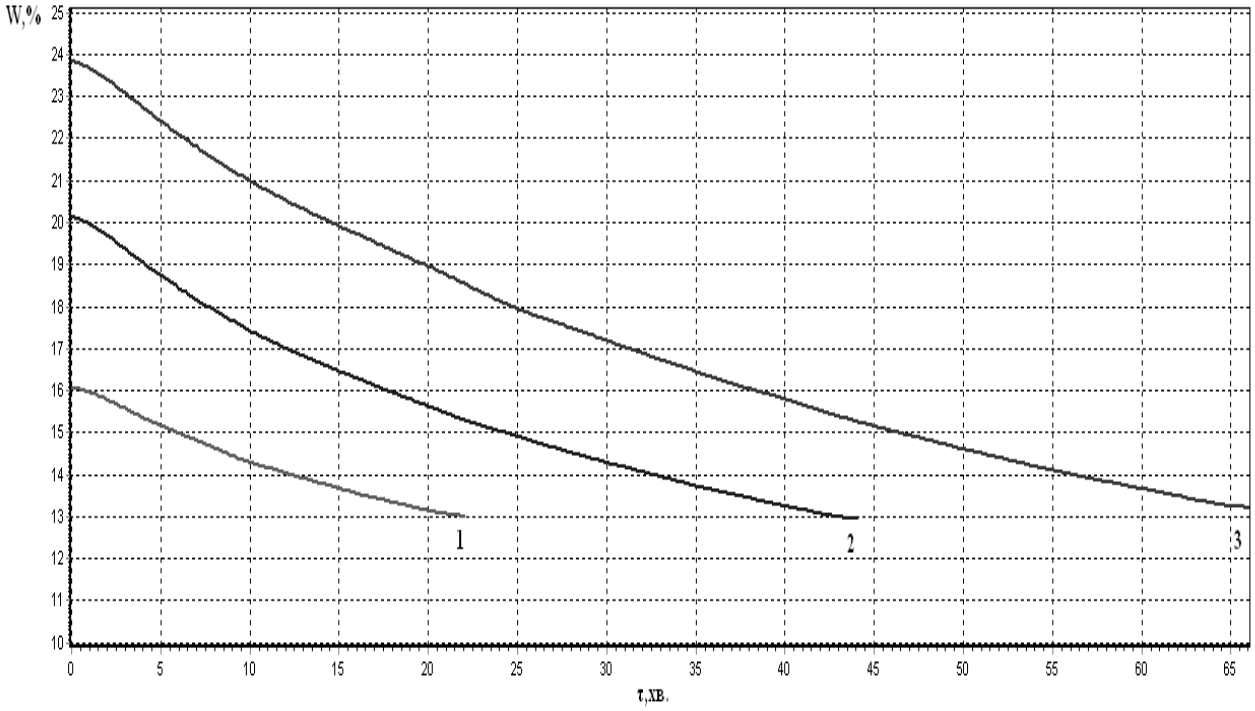


Рис. 2.17. Вплив початкової вологості насіння на кінетику сушіння пшениці в елементарному шарі:
t = 50ºС, V = 1,5 м/с, d = 10 г/кг с. п.: 1 – 16%; 2 – 20%; 3 – 24%.

2.3. Вплив режимів сушіння на якісні показники насіння

Визначення режиму сушіння залежить від якості насіння, тому нами проведений аналіз про вплив температури та початкової вологості насіння на схожість зерна.

Методика визначення якісних показників насіння

Під визначенням якісних показників насіння зернових культур відносять схожість та енергію росту.

Методика визначення якісних показників полягає в визначенні кількості насіння, здатних утворювати нормально розвинуті проростки за оптимальних умов пророщування [80].

До нормальних проростків відносять такі, у яких найбільш важливі структури (корінці, бруньки, сім'ядолі та ін.) добре і пропорційно розвинуті, цілі, здорові, а також можуть мати незначні дефекти, які не впливають на нормальний розвиток проростка.

До ненормальних проростків відносять такі, що неспроможні розвинутись у повноцінні рослини навіть за сприятливих умов. До них відносять:

– проростки, у яких відсутня або сильно пошкоджена будь – яка структура, що робить неможливим подальший пропорційний їх розвиток;

– слаборозвинуті проростки внаслідок фізіологічних порушень, а також проростки з деформованими структурами;

– згнилі проростки.

До біохімічних властивостей насіння можна віднести:

– сортову чистоту, яка визначається вмістом (в процентах) зерна основного сорту лабораторним методом.

– чистота – це ваговий вміст насіння основної культури, віднесеної в процентах до наважки.

– життєздатність насіння оцінюють процентним відношенням кількості насіння з живим зародком до загальної кількості насіння. Аналіз на життєздатність дозволяє своєчасно виключити обробку неякісного насіння на початку.

– схожість – це здатність насіння давати при оптимальних умовах нормально розвинуті проростки, які визначають процентним відношенням кількості пророслого насіння до загальної кількості . Дрібне насіння ріпаку пророщують на зрошеному фільтрувальному папері. Кількість схожого насіння менша за життєздатне.

– енергія росту – характеризує дружність сходів насіння в умовах встановлення схожості на 2 та 4 день.

Підготування та аналізування схожості насіння ріпаку

1. Термостати раз у 10 днів, а посуд перед кожним аналізуванням миємо гарячою водою з мийними засобами та дезінфікуємо 1%-м розчином марганцевокислого калію або спиртом. У робочу камеру термостату ставлять

піддон з водою. Чашки Петрі стерилізуємо у сушильній шафі при температурі (130 +2) ºС протягом години.

2. Аналізування схожості проводимо на насінні ріпаку, виділеному під час визначення чистоти. Для цього довільно відраховують 400 насінин по 100 шт. Насіння рівномірно розташовують на зволоженому фільтрувальному папері, вкладеного в чашки Петрі. Чашки Петрі накривають скляними пластинами або накривками.

3. Аналізування схожості насіння ріпаку при різних режимах сушіння проводимо при температурі 20ºС протягом 7 діб. Визначаємо енергію росту та схожість насіння на аномальні проростки (пошкоджені, слабкі, зігнилі, нерозвинуті та мертві) на 2, 4 та 7 день відповідно.

Основним критерієм підбору раціонального режиму сушіння насіння ріпаку визначалась за енергією росту та схожості ріпаку.

Результати досліджень режимів сушіння на схожість насіння зернових культур показали, що основним фактором який впливає на якісні показники насіння зерна є температура теплоносія. Найвища схожість насіння зернових культур і яка відповідає нормативним вимогам до насіннєвого зерна – це температура теплоносія – 50ºС. Так найвища схожість насіння пшениці при температурі теплоносія – 50ºС і початковій вологості зерна 23% складає 96% і відповідає нормативній схожості насіння 92% [81].

Збільшення температури теплоносія підвищує інтенсивність процесу сушіння і знижує якісні показники насіння, що впливає на вибір раціонального режиму сушіння.

Істотний вплив початкової вологості на схожість насіння спостерігається при температурі теплоносія 70ºС, де відбувається різке зниження схожості, а при температурі 80ºС втрачає всі насіннєві властивості (табл. 2.1).

Таблиця 2.1. Вплив температури теплоносія і початкової вологості на схожість зернових культур [77]

Культура	Початкова вологість зерна, %	Схожість насіння, %				
		вихідна	50ºС	60ºС	70ºС	80ºС
Овес	16	94	94	90	88	56
	23	94	92	84	54	0
Пшениця	16	96	96	92	90	18
	23	96	96	90	60	0
Ячмінь	16	94	92	90	78	18
	23	94	92	85	58	0
Ріпак	17	94	91	82	73	27
	22	94	91	81	70	0

Для вівса і особливо для ячменю спостерігається наведена здатність до високої схожості насіння, що відповідає вище прийнятій температурі теплоносія 50ºС (рис. 2.18, 2.19).

50 ºС 60 ºС 70 ºС 80 ºС

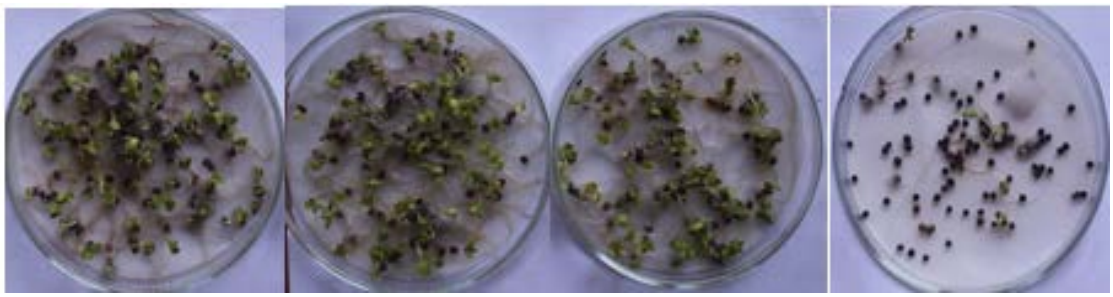
Рис. 2.18. Схожість насіння пшениці від впливу температури теплоносія

50 ºС 80ºС 50ºС 80 ºС

а) б)

Рис. 2.19. Вплив температури теплоносія на схожість насіння вівса (а) та ячменю (б)

Візуально вплив температури теплоносія при початковій вологості насіння ріпаку 22% на схожість можна оцінити за представленими фотографіями (рис. 2.20), так активне пророщування проходить при температурі 50ºС, а при 80ºС – майже не відбувається [82,83].



50ºС 60ºС 70ºС 80ºС

Рис. 2.20. Вплив температури теплоносія на схожість насіння ріпаку при початковій вологості 22%

Проведені дослідження на конвективному сушильному стенді в елементарному шарі показали, що найбільше на схожість насіння ріпаку впливає температура теплоносія. Найвища енергія росту та схожість на рівні 97 – 99% спостерігається при температурі теплоносія 50ºС, а підвищення температури теплоносія до 80ºС приводить до погіршення якості насіння на 25 – 70%. Вплив швидкості теплоносія на енергію пророщування та схожість насіння відбувається при температурі теплоносія 80ºС, так збільшення швидкості від 0,6 до 1,5 м/с приводить до зменшення схожості на 42% (табл. 2.2).

Таблиця 2.2. Вплив температури і швидкості руху теплоносія на тривалість сушіння та на якість насіння ріпаку при початковій вологості 17%

№	Параметри процесу			Параметри якості		
	Температура теплоносія t, ºС	Швидкість руху V, м/с	Тривалість сушіння τ, хв.	Енергія росту Е, %		Схожість на 7 день С,%
				2 день	4 день	абсол./відн.
1.	Вихідний ріпак			84	85	94/100
2.	50	0,6	45	82	84	93/99
3.	50	1,0	42	80	84	91/97
4.	50	1,5	39	81	83	91/97
5.	60	0,6	36	76	79	84/90
6.	60	1,0	32	78	80	83/88
7.	60	1,5	27	77	79	81/86
8.	70	0,6	29	62	64	74/79
9.	70	1,0	26	61	65	73/78
10.	70	1,5	20	60	62	73/78
11.	80	0,6	21	56	59	69/74
12.	80	1,0	19	20	27	28/30
13.	80	1,5	16	18	28	27/29

Схожість насіння ріпаку відносно схожості вихідного ріпаку взятої за 100%, свідчить про те, що згідно вимог до насіннєвого зерна за ДСТУ 2240 - 93, найбільш придатний режим сушіння при температурі теплоносія 50ºС. Так при цій температурі отримана схожість перевищує нормативну на 7%, а при температурі теплоносія 60ºС менша за нормативну на 4%.

Також нами проведені дослідження впливу температури на кислотне число олії насіння ріпаку . При температурі теплоносія 50 – 70ºС кислотне число не змінюється і знаходиться в межах 1,03 – 1,05 КОН мг/г олії. Незначне збільшення кислотного числа відбувається при температурі теплоносія 80ºС і складає 1,8 КОН мг/г олії, що пояснюється окисленням ліпідів (рис.2.21).

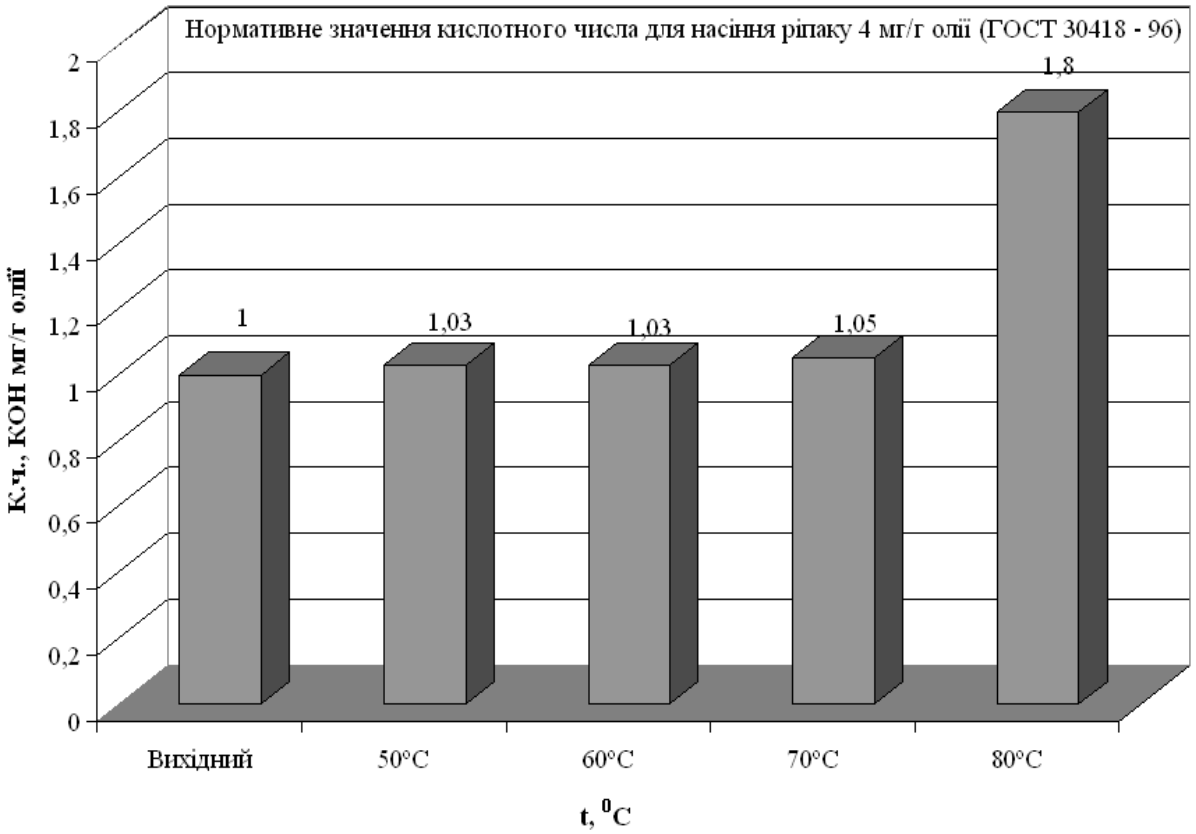


Рис. 2.21. Вплив температури теплоносія на кислотне число насіння ріпаку V = 1,5 м/с, W = 17%, d = 10 г/кг с. п.

Всі зазначені режими сушіння відповідають нормативним вимогам до кислотного числа, що забезпечують якість насіння ріпаку.

2.4. Математична обробка проведених експериментальний досліджень

Методику математичного методу планування багатофакторного експерименту розглянуто в працях [84-87].

На основі проведених досліджень кінетики процесу сушіння насіння ріпаку на конвективному сушильному стенді в елементарному шарі та лабораторних досліджень з якості зерна прийняті наступні фактори: параметри теплоносія (температура і швидкість руху) та параметри матеріалу (початкова вологість ріпаку). Критеріями оцінки ефективності процесу сушіння обрано тривалість сушіння τ та схожість насіння ріпаку С.

Значення рівнів змінюваних факторів та інтервали їх варіювання обрано на основі аналізу літературних даних [84-87] з урахуванням виробничих умов сушіння зерна та проведених досліджень на конвективному сушильному стенді.

Загальна кількість точок плану визначається за формулою (2.4):

$$N = 2^n + 2n + N_0; \qquad (2.4)$$

де: $N_1 = 2^n$ – число точок факторного простору, визначається ядром плану.

При трьохфакторному експерименті $n = 3$, тобто $N_1 = 2^3 = 8$;

$N_2 = 2n = 6$ – кількість зоряних точок;

$N_0 = 1$ – число центральних (нульових) точок плану.

Так, проведення трьохфакторного експерименту на трьох рівнях вимагає проведення 27 дослідів. Тому потрібно встановити оптимальну необхідну кількість дослідів. Це завдання можна вирішити, використовуючи сучасні методи планування експерименту, зокрема математичний, основою якою є створення математичної моделі у вигляді рівняння регресії [87].

Для математичного опису процесу сушіння ріпаку в елементарному шарі проведено трьохфакторний експеримент за ортогональним композиційним планом другого порядку.

В ортогональному центральному плануванні критерієм оптимальності плану експерименту є ортогональність стовпців матриці планування. В силу ортогональності планування всі коефіцієнти рівняння регресії визначається незалежно один від одного. Ядро композиційного плану складає план повного факторного експерименту ПФЕ 2^n.

Планування експерименту включало наступні етапи:

– складання таблиці кодування факторів та рівнів варіювання;

– складання плану – матриці;

– проведення експериментів згідно з планом – матрицею;

– складання рівняння регресії і визначення коефіцієнтів рівняння;

– перевірка адекватності отриманого рівняння регресії;

– аналіз математичної моделі у вигляді рівняння регресії.

Фактори і рівні варіювання, які впливають на процес сушіння насіння ріпаку вибрані на основі отриманих результатів досліджень на конвективному сушильному стенді та аналізу літературних джерел (табл. 2.3):

Таблиця 2.3. Фактори і рівні варіювання, які впливають на процес сушіння насіння ріпаку [88]

Показники	Фактори		
	Теплоносій		Матеріал
	Температура *t, °C*	Швидкість *V, м/с*	Початкова вологість W, %
Верхній (+1)	80	1,5	22
Середній (0)	65	1,05	17
Нижній (–1)	50	0,6	12
Інтервал варіювання	15	0,45	5
Кодове позначення	x_1	x_2	x_3

Згідно плану дослідження проводились з використанням трьох рівнів для кожного фактору – верхнього (+1), нульового (0) і нижнього (-1), кодові значення яких визначали за формулами:

$$x_1 = \frac{t - t_0}{\varepsilon_1} = \frac{t - 65}{15}; \quad x_2 = \frac{V - V_0}{\varepsilon_2} = \frac{V - 1{,}05}{0{,}45}; \quad x_3 = \frac{W - W_0}{\varepsilon_3} = \frac{W - 17}{5}, \qquad (2.5)$$

де t_0, V_0, W_0 – значення факторів на основному рівні, відповідно температура та швидкість теплоносія, початкова вологість та висота шару ріпаку;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – інтервал варіювання факторів.

Математична модель процесу будувалась у вигляді рівнянь регресії:

$$\begin{aligned} \overset{\frown}{y} &= a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + a_{11} x_1^2 + a_{22} x_2^2 + a_{33} x_3^2 + \\ &+ a_{12} x_1 x_2 + a_{13} x_1 x_3 + a_{23} x_2 x_3 \end{aligned} \qquad (2.6)$$

Коефіцієнти регресії визначали за наступними формулами:

$$a_0 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} y_k - q \sum_{i=1}^{N} a_{ii}; \qquad a_i = b_1 \sum_{k=1}^{N} x_{ik} y_k;$$

$$a_{ij} = b_2 \sum_{k=1}^{N} x_{ik} x_{jk} y_k; \qquad a_{ii} = b_3 \sum_{k=1}^{N} (x_{ik}^{/2} - q) y_k, \qquad (2.7)$$

де q – величина , яка забезпечує ортогональність композиційних планів:

$$q = \frac{1}{N}(2^n + 2R^2) = \frac{1}{15}(2^3 + 2 \cdot 1{,}215^2) = 0{,}73, \qquad (2.8)$$

b_0, b_1, b_2, b_3 – елементи дисперсійної матриці плану

$b_0 = 0{,}0667; b_1 = 0{,}0913; b_2 = 0{,}125; b_3 = 0{,}2298.$

Рекомендований вигляд матриці планування експерименту і порядок проведення дослідів представлені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Матриця плану і результати експериментів з сушіння насіння ріпаку сорту Чорний Велетень [92]

№	Умови дослідів												τ, хв	С, %
	x_1	x_2	x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	$x_1 x_2$	$x_1 x_3$	$x_2 x_3$	$x_1^/$	$x_2^/$	$x_3^/$		
1.	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	30	93
2.	+1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	12	70
3.	-1	+1	-1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	24	91
4.	+1	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	9	68
5.	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	0,27	0,27	0,27	54	91
6.	+1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	+1	-1	0,27	0,27	0,27	24	6
7.	-1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	+1	0,27	0,27	0,27	48	90
8.	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	0,27	0,27	0,27	20	4
9.	-1,215	0	0	+1,472	0	0	0	0	0	0,75	–0,73	–0,73	44	93
10.	+1,215	0	0	+1,472	0	0	0	0	0	0,75	–0,73	–0,73	17	28
11.	0	-1,215	0	0	+1,472	0	0	0	0	–0,73	0,75	–0,73	32	79
12.	0	+1,215	0	0	+1,472	0	0	0	0	–0,73	0,75	–0,73	28	77
13.	0	0	-1,215	0	0	+1,472	0	0	0	–0,73	–0,73	0,75	17	79
14.	0	0	+1,215	0	0	+1,472	0	0	0	–0,73	–0,73	0,75	37	70
15.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	–0,73	–0,73	–0,73	31	78

Оцінка дисперсії похибок при розрахунку оцінок коефіцієнтів рівняння квадратичної регресії розраховується за формулами:

$$S_{a0}^2 = \frac{b_0}{m} S_y^2 + q^2 \sum_{i=1}^{n} S_{aii}^2 ; \qquad S_{ai}^2 = \frac{b_1}{m} S_y^2 ;$$

$$S_{aij}^2 = \frac{b_2}{m} S_y^2 ; \qquad S_{aii}^2 = \frac{b_3}{m} S_y^2 , \qquad (2.9)$$

де S_y^2 – оцінка дисперсії відтвореності:

$$S_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} S_k^2 , \qquad (2.10)$$

Після проведення дослідів проводимо перевірку відтвореності дослідів з використанням критерію Кохрена:

$$G_{\max} = \frac{S_{k\max}^2}{\sum_{k=1}^{N} S_k^2} , \qquad (2.11)$$

де S_k^2 – вибіркова дисперсія вихідної величини у по к – ому рядку матриці планування, отриманих з „m” паралельних дослідів:

$$S_k^2 = \frac{1}{m-1} \sum_{l=1}^{m} (y_{kl} - y_l) , \qquad (2.12)$$

Якщо $G_{\max} < G_{кр}$, при кількості ступенів вільності $v_1 = m-1$, $v_2 = N$ та рівня значимості $\alpha = 1-\gamma$, то гіпотеза про однорідність дисперсії приймається.

Гіпотеза про статичну значимість оцінок коефіцієнтів рівняння регресії a_i перевіряється за допомогою t – критерію Стьюдента:

$$t_{ip} = \frac{|a_i|}{S_{ai}} , \qquad (2.13)$$

Параметр значно відрізняється від нуля, якщо:

$$t_{ip} > t_{кр} , \qquad (2.14)$$

В протилежному випадку нульова гіпотеза приймається та параметр a_i є статистично не значимим. Критичне значення статистики $t_{кр}$ знаходиться по відповідним таблицям критерію Стьюдента для числа степенем вільності $v = N(m-1)$ та рівня значимості $\alpha = 1-\gamma$. Якщо для значення оцінки параметру a_i умова $t_{ір} > t_{кр}$ не виконується, то відповідний фактор є не значимим та виключається з рівняння регресії.

Перевірка адекватності математичної моделі результатами експерименту відбувається по F – критерію Фішера у вигляді співвідношення:

$$F_p = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y}, \qquad (2.15)$$

де $S^2_{неад}$ – оцінка дисперсії неадекватності:

$$S^2_{неад} = \frac{1}{N-r}\sum_{j=1}^{N}(\overline{y_j} - \overset{\cap}{y}_j), \qquad (2.16)$$

де N – число точок ортогонального ЦКП;

r – число значимих параметрів рівняння регресії ;

$\overset{\cap}{y}_j$ – значення відклику, розраховане по рівнянню регресії;

$\overline{y}$ – середнє за серією з „m” дослідів значення відклику реального об’єкту.

Якщо виконується умова:

$$F_p < F_{кр}, \qquad (2.17)$$

то математична модель признається адекватною, тобто розсіяння експериментальних значень відклику відносно значень рівняння регресії такого ж порядку, що і розсіювання, викликаного похибками досліду.

Критичне значення статистики знаходиться по відповідним таблицям для заданого рівня значимості α та степенем вільності $\nu_1 = N - r$ та $\nu_2 = N_2 = (m-1)$.

Згідно представленої математичної моделі та матриці плану і результатів експерименту (табл. 2.5), отримаємо рівняння квадратичної регресії в кодових змінних для *тривалості процесу сушіння* в елементарному шарі:

$$\overset{\cap}{y} = 31{,}11 - 11{,}212x_1 - 2{,}087x_2 + 8{,}61x_3 - 0{,}328x_1^2 - 0{,}669x_2^2 - 2{,}709x_3^2 + 0{,}5x_1x_2 - 3x_1x_3 \qquad (2.18)$$

Дисперсія точки експерименту S_k^2 розраховується за формулою (2.12):

$$S_k^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{l=1}^{m}(y_{kl} - \overline{y_l}) = 8$$

Оцінка дисперсії відтвореності визначається за формулою (2.10):

$$S_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} S_k^2 = \frac{8}{15} = 0{,}53$$

Після проведення дослідів проводимо перевірку відтвореності з використанням критерію Кохрена за формулою (2.11):

$$G_{\max} = \frac{S_{k\max}^2}{\sum_{k=1}^{N} S_k^2} = \frac{0{,}7}{8} = 0{,}0875$$

Для рівня значимості $\alpha = 1 - \gamma = 0{,}05$ при кількості ступенів вільності $v_1 = m - 1 = 2$, $v_2 = N = 15$ за таблицями знаходимо критичне значення статистики критерію: $G_{кр} = 0{,}3346$.

Так як $G_{\max} = 0{,}0875 < G_{кр} = 0{,}3346$, то можна зробити висновок про відтвореність експерименту.

Оцінка дисперсії похибки для відповідних коефіцієнтів рівняння регресії визначається за формулою (2.9):

$$S_{a0}^2 = \frac{b_0}{m} S_y^2 + q^2 \sum_{i=1}^{n} S_{aii}^2 = \frac{0{,}0667}{3} \cdot 0{,}53 + 0{,}73^2 \cdot 0{,}022 \cdot 3 = 0{,}47. \qquad S_{a0} = 0{,}68.$$

$$S_{ai}^2 = \frac{b_1}{m} S_y^2 = \frac{0{,}0913}{3} \cdot 0{,}53 = 0{,}016. \qquad S_{a1} = S_{a2} = S_{a3} = 0{,}13.$$

$$S_{aii}^2 = \frac{b_3}{m} S_y^2 = \frac{0{,}2298}{3} \cdot 0{,}53 = 0{,}041. \qquad S_{a11} = S_{a22} = S_{a33} = 0{,}21.$$

$$S_{aij}^2 = \frac{b_2}{m} S_y^2 = \frac{0{,}125}{3} \cdot 0{,}53 = 0{,}022. \qquad S_{a12} = S_{13} = S_{23} = 0{,}15.$$

Приймаємо рівень значимості $\alpha = 1 - \gamma = 0{,}05$ і користуючись таблицями критерію Стьюдента для $\alpha = 0{,}05$ і $v = N(m-1) = 30$, критичне значення статистики $t_{кр} = 2{,}04$.

Значення коефіцієнтів розраховуємо за критерієм Стьюдента за формулою (2.13) і зводимо в табл. 2.6:

Таблиця 2.5. Визначення значимості коефіцієнтів регресії

a_i, a_{ii}, a_{ij}	S_{ai}, S_{aii}, S_{aij}	t_{ip}
$a_0 = 31{,}11$	0,68	45,75
$a_1 = -11{,}212$	0,13	86,24
$a_2 = -2{,}087$	0,13	16,05
$a_3 = 8{,}61$	0,13	66,23
$a_{11} = -0{,}328$	0,21	1,56
$a_{22} = -0{,}669$	0,21	3,18
$a_{33} = -2{,}709$	0,21	12,9
$a_{12} = 0{,}5$	0,15	3,33
$a_{13} = -3$	0,15	20
$a_{23} = 0$	0	0

В отриманому рівнянні 3.1 оцінки коефіцієнтів $a_{11} = -0{,}328$ та $a_{23} = 0$ виявились не значимими. Коефіцієнти a_{11}, a_{23} виключаємо з рівняння регресії.

Тоді рівняння регресії приймає вигляд:

$$\overset{\frown}{y} = 31{,}11 - 11{,}212x_1 - 2{,}087x_2 + 8{,}61x_3 - 0{,}669x_2^2 - 2{,}709x_3^2 + 0{,}5x_1x_2 - 3x_1x_3 \quad (2.19)$$

Приведене рівняння регресії показує, що всі факторами зазначені в рівнянні регресії, є визначальними. Найбільше на тривалість сушіння ріпаку впливає температура теплоносія та початкова вологість насіння.

Перевіримо правильність отриманого рівняння регресії. Для цього задамо значення факторів x_i, які відповідають першому рядку досліду (табл.2.5) Тоді:

$$\overset{\frown}{y} = 31{,}11 - 11{,}212(-1) - 2{,}087(-1) + 8{,}61(-1) - 0{,}669(+1) - 2{,}709(+1) + 0{,}5(+1) - 3(+1) = 29{,}926.$$

Оцінку дисперсії неадекватності знаходимо за формулою (2.16):

$$S^2_{неад} = \frac{1}{N-r}\sum_{j=1}^{N}(\overline{y_j} - \overset{\frown}{y_j})^2 = \frac{1}{15-8}\cdot 3{,}18 = 0{,}46.$$

Перевірка адекватності математичної моделі результатами експерименту відбувається по F – критерію Фішера за формулою (2.19):

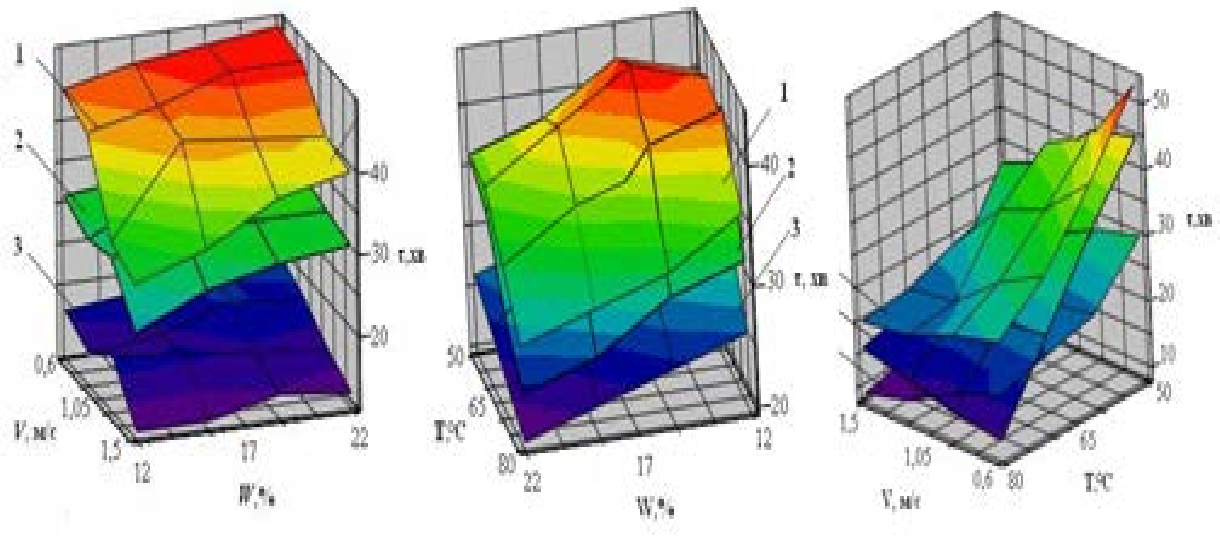
$$F_p = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y} = \frac{0{,}46}{0{,}53} = 0{,}87.$$

Для числа степені вільності $v_2 = N - r = 7$ і $v_1 = N(m-1) = 30$ та рівня значимості $\alpha = 0{,}05$ за таблицями знаходимо критичне значення статистики Фішера $F_{кр} = 2{,}35$. Так як $F_p = 0{,}87 < F_{кр} = 2{,}35$, то математична модель у вигляді рівняння квадратичної регресії адекватна реальному об'єкту.

Перейдемо в рівняння квадратичної регресії від кодованих факторів x_i до відповідних фізичних величин:

$$\tau = 31{,}11 - 11{,}212 \cdot \left(\frac{t-65}{15}\right) - 2{,}087 \cdot \left(\frac{V-1{,}05}{0{,}45}\right) + 8{,}61 \cdot \left(\frac{W-17}{5}\right) - 0{,}669 \cdot \left(\frac{V-1{,}05}{0{,}45}\right)^2 -$$
$$- 2{,}709 \cdot \left(\frac{W-17}{5}\right)^2 + 0{,}5 \cdot \left(\frac{t-65}{15}\right) \cdot \left(\frac{V-1{,}05}{0{,}45}\right) - 3 \cdot \left(\frac{t-65}{15}\right) \cdot \left(\frac{W-17}{5}\right) = 51{,}096 - \qquad (2.20)$$
$$- 0{,}148 \cdot t - 9{,}45 \cdot V + 4{,}32 \cdot W - 3{,}3 \cdot V^2 - 0{,}108 \cdot W^2 - 0{,}074 \cdot t \cdot V - 0{,}04 \cdot t \cdot W$$

За отриманим рівнянням регресії тривалості сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі знайдено поверхні відгуку від дії трьох факторів і побудовано в графічній програмі Mathcad. За поверхнями відгуку, описаними за ортогональним композиційним планом другого порядку, можна знайти проміжні значення тривалості сушіння в залежності від зазначених факторів (рис. 2.22) [88]:



а) б) в)

Рис. 2.22. Поверхні відгуку тривалості сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі від дії наступних факторів:

а) температури: 1 – 50ºС; 2 – 65ºС; 3 – 80ºС;

б) швидкості: 1 – 0,6 м/с; 2 – 1,05 м/с; 3 – 1,5 м/с.

в) початкової вологості: 1 – 12%; 2 – 17%; 3 – 22%.

Поверхні тривалості сушіння насіння ріпаку від дії трьох факторів показують, що в області низької вологості, високих температур і швидкості теплоносія збільшується інтенсивність процесу. Так, при температурі теплоносія 80ºС, швидкості 1,5 м/с і початковій вологості насіння 12% тривалість процесу сушіння мінімальна і складає 7 хв.

Результати трьохфакторного експерименту за ортогональним композиційним планом другого порядку, дозволили отримати рівняння квадратичної регресії в кодових змінних для *схожості* процесу сушіння:

$$\overset{\cap}{y} = 78 - 27x_1 - 0{,}86x_2 - 16{,}14x_3 - 11{,}73x_1^2 - 0{,}17x_2^2 - 2{,}21x_3^2 - 0{,}125x_1x_2 - \\ - 15{,}625x_1x_3 + 0{,}125x_2x_3. \qquad (2.21)$$

Дисперсія точки експерименту S_k^2 розраховується за формулою (2.12):

$$S_k^2 = \frac{1}{m-1}\sum_{l=1}^{m}(y_{kl} - \overline{y_l}) = 18.$$

Оцінка дисперсії відтвореності визначається за формулою (2.10):

$$S_y^2 = \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} S_k^2 = \frac{18}{15} = 1{,}2.$$

Після проведення дослідів проводимо перевірку відтвореності дослідів з використанням критерію Кохрена за формулою (2.16):

$$G_{\max} = \frac{S_{k\max}^2}{\sum_{k=1}^{N} S_k^2} = \frac{2}{18} = 0{,}111.$$

Для рівня значимості $\alpha = 1 - \gamma = 0{,}05$ при кількості ступенів вільності $v_1 = m - 1 = 2$, $v_2 = N = 15$ по таблицям знаходимо критичне значення статистики критерію: $G_{кр} = 0{,}3346$.

Оскільки $G_{\max} = 0{,}111 < G_{кр} = 0{,}3346$, то можна зробити висновок про відтвореність експерименту.

Оцінка дисперсії похибки для відповідних коефіцієнтів рівняння регресії визначається за формулою (2.9):

$$S_{a0}^2 = \frac{b_0}{m} S_y^2 + q^2 \sum_{i=1}^{n} S_{aii}^2 = \frac{0{,}0667}{3} \cdot 1{,}2 + 0{,}73^2 \cdot 0{,}09 \cdot 3 = 0{,}17; \;\; S_{a0} = 0{,}41.$$

$$S_{ai}^2 = \frac{b_1}{m} S_y^2 = \frac{0{,}0913}{3} \cdot 1{,}2 = 0{,}036; \qquad S_{a1} = S_{a2} = S_{a3} = 0{,}19.$$

$$S_{aii}^2 = \frac{b_3}{m} S_y^2 = \frac{0{,}2298}{3} \cdot 1{,}2 = 0{,}09, \qquad S_{a11} = S_{a22} = S_{a33} = 0{,}3.$$

$$S_{aij}^2 = \frac{b_2}{m} S_y^2 = \frac{0{,}125}{3} \cdot 1{,}2 = 0{,}05; \qquad S_{a12} = S_{13} = S_{23} = 0{,}22.$$

Приймаємо рівень значимості $\alpha = 1 - \gamma = 0{,}05$ і користуючись таблицями критерію Стьюдента для $\alpha = 0{,}05$ і $v = N(m-1) = 30$, критичне значення статистики $t_{кр} = 2{,}04$.

Значення коефіцієнтів t_{ip} розраховуємо за критерієм Стьюдента за формулою (2.13) і зводимо в табл. 2.6:

Таблиця 2.6.Визначення значимості коефіцієнтів регресії

a_i, a_{ii}, a_{ij}	S_{ai}, S_{aii}, S_{aij}	t_{ip}
a_0=78	0,41	190,2
$a_1 = 27$	0,19	142,2
$a_2 = -0{,}86$	0,19	4,53
$a_3 = -16{,}14$	0,19	84,94
$a_{11} = -11{,}73$	0,3	39,1
$a_{22} = 0{,}17$	0,3	0,57
$a_{33} = -2{,}21$	0,3	7,36
$a_{12} = -0{,}125$	0,22	0,57
$a_{13} = -15{,}625$	0,22	71,05
$a_{23} = 0{,}125$	0,22	0,57

В отриманому рівнянні оцінки коефіцієнтів $a_{12} = -0{,}125$, $a_{22} = 0{,}17$, та $a_{23} = 0{,}125$ виявились не значимими. Коефіцієнти a_{12}, a_{22}, a_{23} виключаємо з рівняння регресії.

Тоді рівняння регресії приймає вигляд:

$$\hat{y} = 78 - 27x_1 - 0{,}86x_2 - 16{,}14x_3 - 11{,}73x_1^2 - 2{,}21x_3^2 - 15{,}625x_1x_3. \qquad (2.22)$$

Приведене рівняння регресії показує, що найбільш визначальними факторами є температура та початкова вологість насіння ріпаку.

Перевіримо правильність отриманого рівняння регресії. Для цього задамо значення факторів x_i, які відповідають першому рядку досліду. Тоді:

$$\overset{\frown}{y} = 78 - 27(-1) - 0{,}86(-1) - 16{,}14(-1) - 11{,}73(+1) - 2{,}21(+1) - 15{,}625(+1) = 92{,}45.$$

Оцінка дисперсії неадекватності розраховуємо за формулою (2.20):

$$S^2_{неад} = \frac{1}{N-r}\sum_{j=1}^{N}(\overline{y_j} - \overset{\frown}{y_j})^2 = \frac{1}{15-7}\cdot 1{,}27 = 0{,}16.$$

Перевірка адекватності математичної моделі результатами експерименту відбувається по F – критерію Фішера за формулою (2.21):

$$F_p = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y} = \frac{0{,}16}{1{,}2} = 0{,}13.$$

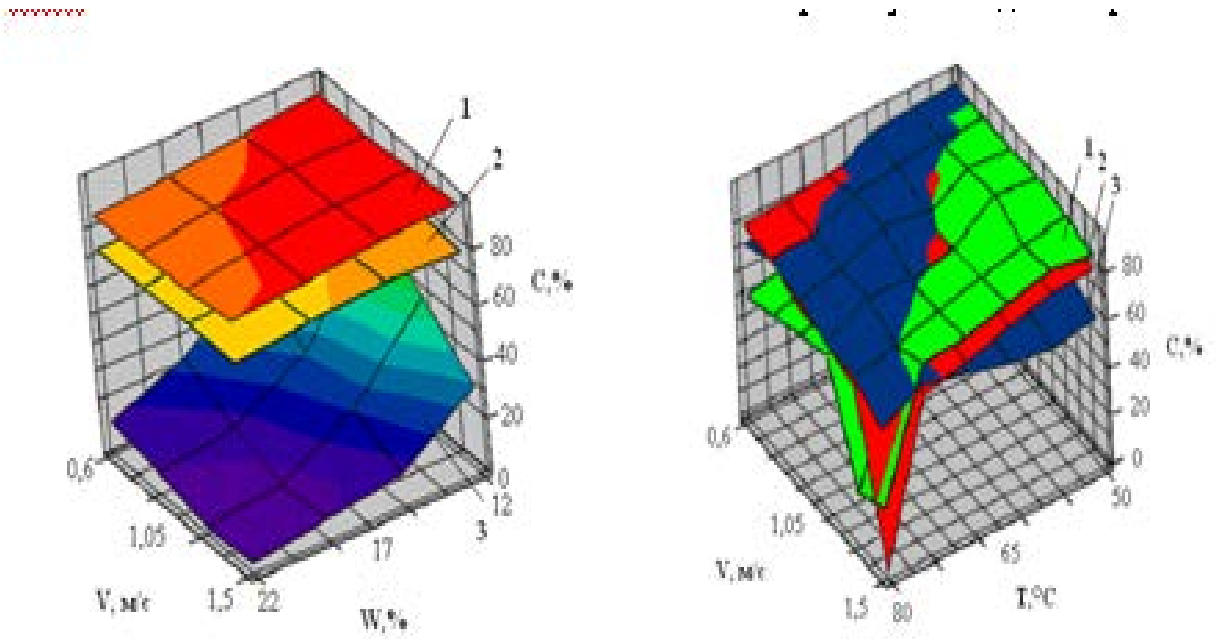
Для числа степені вільності $v_2 = N - r = 8$ і $v_1 = N(m-1) = 30$ та рівня значимості $\alpha = 0{,}05$ за таблицями знаходимо критичне значення статистики Фішера $F_{кр} = 2{,}27$. Оскільки $F_p = 0{,}13 < F_{кр} = 2{,}27$, то математична модель у вигляді рівняння квадратичної регресії адекватна реальному об'єкту.

Перейдемо в рівняння квадратичної регресії від кодованих факторів x_i до відповідних фізичних величин:

$$C = 78 - 27\cdot\left(\frac{t-65}{15}\right) - 0{,}86\cdot\left(\frac{V-1{,}05}{0{,}45}\right) - 16{,}14\cdot\left(\frac{W-17}{5}\right) - 11{,}73\cdot\left(\frac{t-65}{15}\right)^2 -$$
$$-2{,}21\cdot\left(\frac{W-17}{5}\right)^2 - 15{,}625\cdot\left(\frac{t-65}{15}\right)\cdot\left(\frac{W-17}{5}\right). = 267{,}4 + 1{,}6\cdot t - 1{,}91\cdot V + \qquad (2.23)$$
$$+10{,}32\cdot W - 0{,}052\cdot t^2 - 0{,}088\cdot W^2 - 0{,}21\cdot t\cdot W$$

За отриманим рівнянням регресії схожості насіння ріпаку після сушіння в елементарному шарі знайдено поверхні відгуку від дії трьох факторів.

Аналіз поверхонь схожості (рис. 2.23) показує, що в інтервалі температур від 50 до 65ºС визначальним фактором є температура теплоносія, так як поверхні відгуку мають лінійний характер. Представлені поверхні тривалості сушіння від впливу температуру теплоносія показують, що при температурі 80ºС – інтенсивність найвища, але схожість мінімальна. Зменшення температури теплоносія до 65ºС суттєво підвищує схожість, але не відповідає нормативній схожості для насіння ріпаку. Висока схожість насіння ріпаку можлива лише при зниженні температури до 50С [74,88].



а) б)

Рис. 2.23. Поверхні відгуку схожості насіння ріпаку після сушіння в елементарному шарі від дії наступних факторів:

а) температури: 1 – 50ºС, 2 – 65ºС, 3 – 80ºС;

б) початкової вологості: 1 – 12%, 2 – 17%, 3 – 22%.

Проведені дослідження кінетики сушіння насіння ріпаку в елементарному шарі, дозволили розробити режими сушіння, при яких схожість становить 97 – 100 %.

Отримані регресійні рівняння та побудовані поверхні відгуку критеріїв оптимізації від впливу температури, швидкості теплоносія та початкової вологості насіння на тривалість сушіння та схожість ріпаку. Встановлено, що вплив на тривалість сушіння та схожість насіння мають всі фактори, але найбільший вплив спостерігається від температури теплоносія.

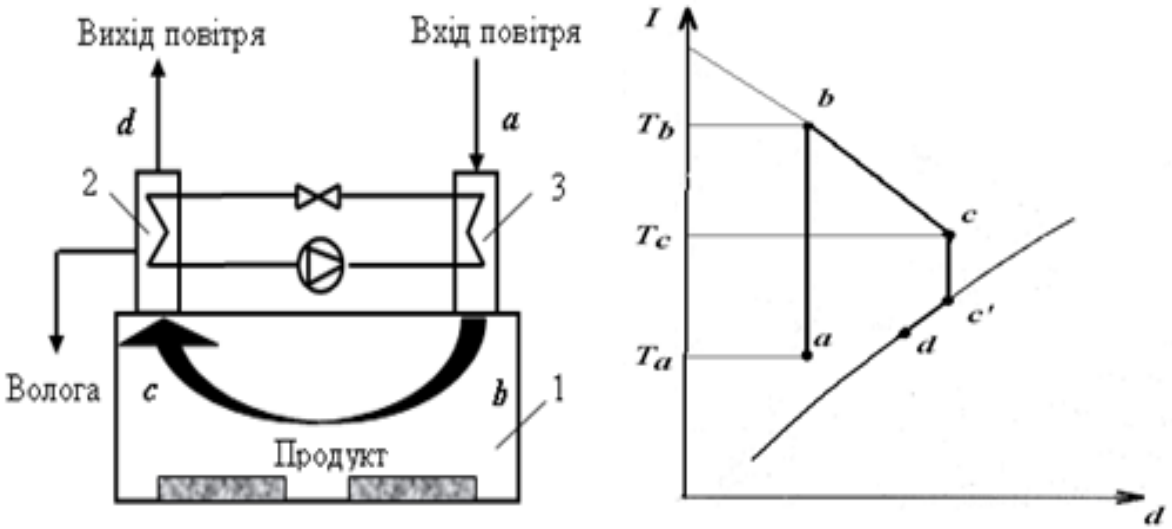
РОЗДІЛ 3
ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА КОНДЕНСАЦІЙНИМ МЕТОДОМ

Традиційні конвективні сушильні установки, разом з безперечними перевагами , що відображаються в простоті конструкції та експлуатації, мають ряд істотних недоліків, основними з яких є низька інтенсивність процесу, значні витрати теплоти з відпрацьованим теплоносієм, залежність ефективності роботи сушарки від вологовмісту атмосферного повітря.

При використанні ТН обладнання для сушіння різноманітних матеріалів волога, що вилучається з матеріалу, не виноситься теплоносієм в навколишнє середовище, як це має місце в конвективних сушарках, а конденсується на холодній поверхні випарника ТН і вилучається в скрапленому вигляді. Таким чином, з'являється можливість утилізувати теплоту конденсації і повернути її в процес сушіння на більш високому температурному рівні, що суттєво знижує витрати енергії на вилучення вологи з матеріалу в порівнянні з традиційними конвекційними сушарками.

Здатність ТН знижувати вологовміст теплоносія робить їх незамінними при вирішенні питання інтенсифікації вологовидалення, особливо при низькотемпературному сушінні насіннєвого зерна.

В залежності від схем підключення ТН в циркуляційний контур сушарки їх можна поділити на рекуперативні та зневоднюючи (або конденсаційні) (рис.3.1, 3.2) [89].



а) б)

Рис. 3.1. Схема рекуперативної теплонасосної зерносушарки (а) і принцип роботи в I-d діаграмі (б):
1 – сушарка; 2 – випарник; 3 – конденсатор.

Теплонасосна сушарка рекуперативного типу працює наступним чином: атмосферне повітря надходить на конденсатор 3 теплового насосу, де

відбувається нагрів теплоносія (лінія a – b), потім відбувається сушіння продукту (лінія b – c). Теплоносій охолоджується до точки роси (лінія c - c′) і на випарнику теплового насосу 2 відбувається його зневоднення на виході з рекуперативної сушарки.

Теплонасосна сушарка конденсаційного типу (рис. 3.2) відрізняється від сушарки рекуперативного типу тим, що теплоносій знаходиться в замкнутому контурі, де відбувається постійне відведення вологи через випарник теплового насосу 2.

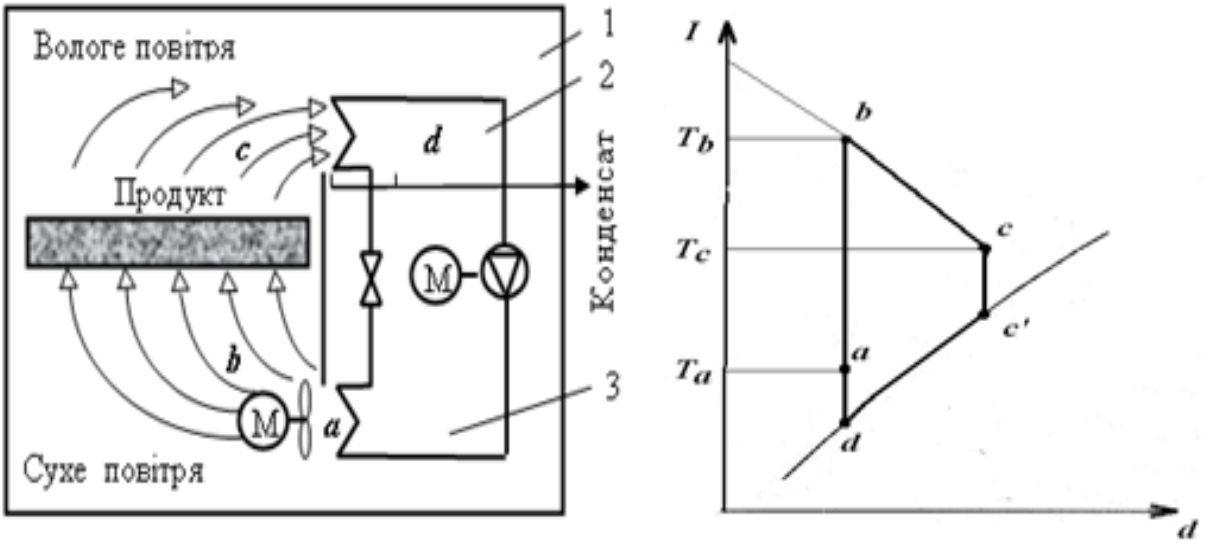


Рис. 3.2. Схема конденсаційної теплонасосної зерносушарки (а) і принцип роботи в I-d діаграмі (б):
1 – сушарка; 2 – випарник; 3 – конденсатор.

Теплонасосна сушарка конденсаційного типу працює наступним чином: Вологе повітря подається на випарник теплового насосу 2, де відбувається охолодження теплоносія до точки роси c - c′ і його зневоднення c′ - d. На конденсаторі теплового насосу 3 відбувається нагрівання теплоносія, після чого циркуляційним вентилятор направляється на сушіння продукту a – b. Зволожений теплоносія після сушіння надходить на випарник теплового насосу 2 і сушильний цикл повторюється.

При проектуванні теплонасосної зерносушарки нами були враховані ці схеми і вибрана схема рекуперативного типу з розімкнутою схемою із-за високої засміченості зерна, що в свою чергу ускладнює експлуатацію зерносушарки.

3.1. Теплонасосна дослідна зерносушарка

Принцип дії теплонасосного агрегату оснований на використанні низкопотенційної теплоти, яка з витратою необхідної роботи в компресорі перетворюється в теплоту більш високого потенціалу. Від холодильних машин теплові насоси відрізняються призначенням – для підігрівання об’єкту та межами

робочих температур. Температура теплоносія для сушіння насіннєвого зерна на виході з теплонасосної зерносушарки регулюється в діапазоні t = 25 – 50°С.

Теплонасосна зерносушарка працює наступним чином: повітря з оточуючого середовища (рис. 3.3) через фільтр подається на вхід циркулюючого вентилятора, проходить регенеративний теплообмінник 3 (а – а´) і прямує до випарника 4, де зневоднюється за рахунок охолодження нижче температури роси (а´ – о), а скраплена волога відводиться до збірника конденсату [90,91].

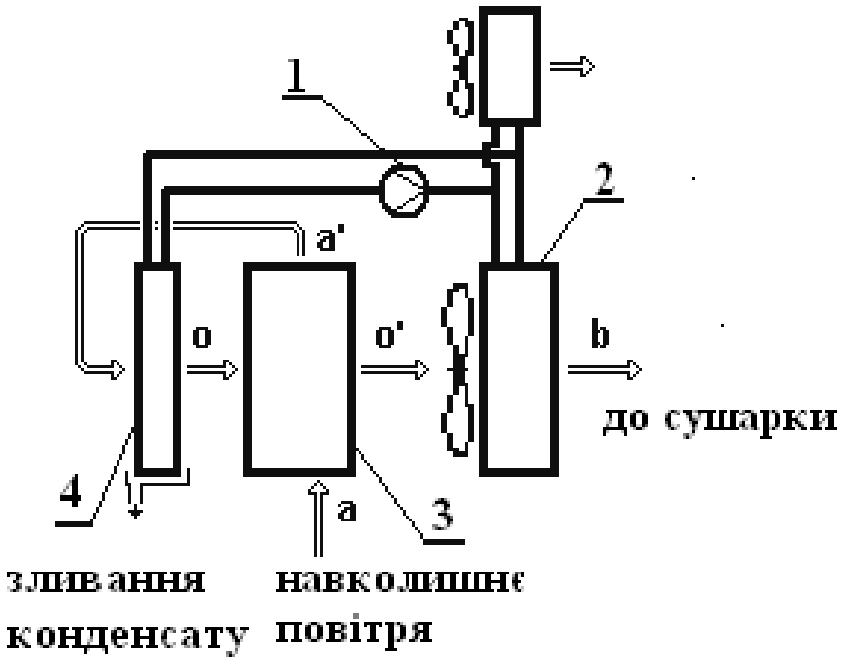


Рис. 3.3. Схема роботи теплонасосної зерносушарки:
1 – компресор; 2 – повітряний конденсатор; 3 – рекуператор; 4 – випарник
а – а´ – попереднє охолодження навколишнього середовища в рекуператорі;
а´ – о – зневоднення навколишнього середовища;
о – о´ – часткове відновлення температури повітря;
о´ – b – нагрівання в конденсаторі до заданої температури.

Зневоднене повітря прямує до регенеративного теплообмінника 3, частково відновлює свій температурний потенціал (о – о´) і направляється до конденсатора 2, де нагрівається до заданої температури (о´ – b). Нагріте зневоднене повітря через повітропровід поступає до сушильної камери, де вступає в тепломасообмінний контакт з вологим зерном. Проходячи крізь шар вологого зерна, гаряче сухе повітря забирає з зерна зайву вологу і викидається в зовнішнє середовище.

Для дослідження та відпрацювання технологічного режиму сушіння насіннєвого зерна виготовлений експериментальний зразок теплонасосної сушарки періодичної дії (рис.3.4) обладнаний контрольно-вимірювальними приладами та системою автоматики, які дозволяють автоматично підтримувати заданий режим зневоднення, вимірювати та фіксувати необхідні параметри

робочого процесу (температуру, вологовміст і швидкість руху теплоносія, витрати енергії та зменшення маси зерна), а також температуру і тиск випаровування та конденсації холодоагенту. Розроблена програма ”Cooler” дозволяє автоматично знімати інформації про зміну часу та температури шару насіння ріпаку в ході видалення вологи.

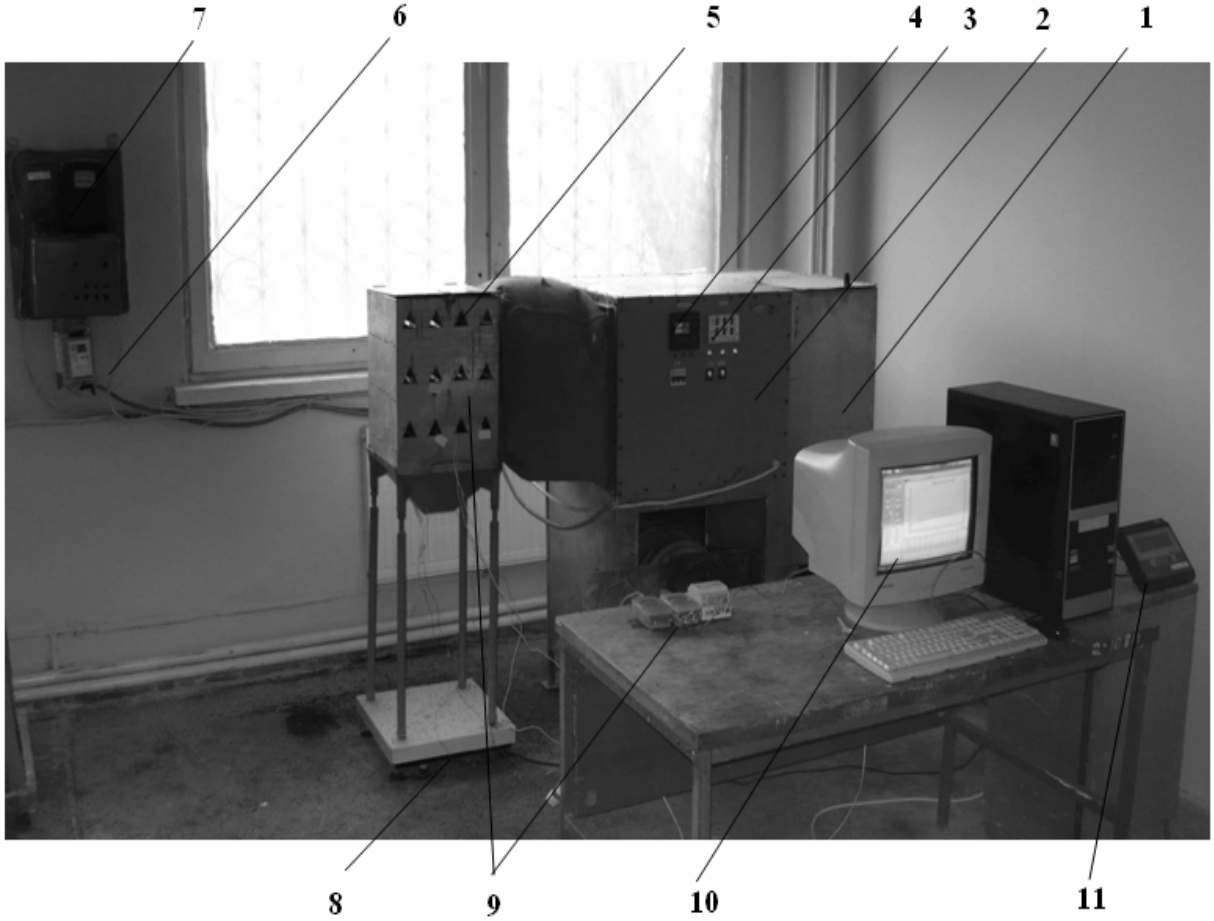


Рис. 3.4. Експериментальна теплонасосна зерносушарка:
1 – теплонасосний агрегат; 2 – щит керування; 3 – реле часу; 4 – термореле; 5 – сушильна шахта; 6 – регулятор швидкості; 7 – лічильник електроенергії; 8 – напільні терези; 9 – аналоговий цифровим перетворювачем *i-7018*, конвертор-інтерфейс *i-7520* та хромель-копелеві термоелектричні перетворювачі; 10 – персональним комп’ютер; 11 – цифрове табло терезів.

Технічна характеристика експериментальної теплонасосної зерносушарки

1. Продуктивність по вилученій волозі	2 кг/год
2. Температура теплоносія на вході в сушильну камеру	25÷50 °С
4. Температура випаровування холодоагенту	5÷+10 °С
5. Холодоагент	R22
6. Вологовміст теплоносія на вході в сушильну камеру	10÷14 г/кг с.п.
7. Місткість сушильної камери	0,05 $м^3$
8. Витрати теплоносія	250÷800 $м^3$/год
9. Встановлена потужність	4,75 кВт
10. Габаритні розміри:	

сушильна камера $0{,}32 \times 0{,}32 \times 0{,}48 м$

теплонасосний агрегат $0{,}7 \times 0{,}9 \times 1{,}3 м$

Температура сушильного агенту в сушарці підтримується автоматично на заданому рівні за допомогою електронного блоку регулювання температури “Termo 9902”. Термін сушіння регулюється трьохланцюговим реле часу ВЛ-81.

Експериментальна теплонасосна зерносушарка складається з наступних частин (рис. 3.4): теплонасосного агрегату 1, зернової шахти 5 та приладів контрольно-вимірювальними приладами та систем автоматики: регулятора швидкості 6, лічильника електроенергії 7, терезів 8 з цифровим табло 11.

Корпус теплонасосного агрегату складається з рами, перегородок та лицьових панелей з отворами для забору та виходу теплоносія. На одній з лицьових панелей розміщується пульт керування. Внутрішні перегородки корпуса розташовані таким чином, що створюють направлений потік теплоносія за маршрутом: циркуляційний вентилятор, гарячий бік рекуперативного теплообмінника, випарник, холодний бік рекуперативного теплообмінника, головний конденсатор. В окремих відсіках корпуса розташовані додаткові конденсатор з вентилятором та пульт керування.

Компресор ZR49K3E – TFD : :холодопродуктивність 11,21 кВт

встановлена потужність електродвигуна 4,08 кВт

Випарник – трирядний ребристий змієвиковий апарат розмірами $548 \times 415 \times 54$ мм. Апарат виготовлений з мідної труби діаметром 10 мм. Загальна площина теплообмінної поверхні випарника 12 м^2.

Рекуперативний теплообмінник являє собою трирядний пакет ребристих теплових труб, заповнених фреоном R22. Проектна ефективність теплообмінника 0,43. Головний конденсатор – трирядний змієвиковий ребристий апарат розмірами $510 \times 500 \times 54$. Загальна площа поверхні конденсатора 14,4 м^2.

Циркуляційний вентилятор Ц14-46 № 2,5. Потужність електродвигуна – 0,75 кВт, число обертів – 1450 об/хв.

Додатковий конденсатор – дворядний змієвиковий ребристий апарат розмірами $330 \times 440 \times 36$. Загальна площа теплообмінної поверхні – 4,8 м^2.

Ресивер – герметична ємність місткістю 6 л.

Додатковий вентилятор відцентрового типу з діаметром робочого колеса 0,4 м і електродвигуном з регульованим числом обертів.

Методика проведення експерименту на теплонасосній зерносушарці:

1. Перед проведенням дослідів визначаємо початкову вологість ріпаку за ДСТУ 4138 – 2002 [84]. Ріпак засипаємо в бюкси і висушуємо в сушильному шкафу при температурі 105ºС на протязі 5 годин. Охолодження відбувається в ексикаторі з силікагелем для запобігання сорбції вологи з повітря.

2. Проведення досліду починається з вмиканням теплонасосної зерносушарки та комп’ютерної система збору та обробки інформації, яка безперервно реєструє час досліду, температуру сушильного агенту, температуру на поверхні та в середині шару матеріалу, зміну маси навіски.

3. Після встановлення в теплонасосній зерносушарці режиму сушіння засипаємо партію насіннєвого ріпаку в сушильну шахту і проводимо сушіння до кінцевої вологості ріпаку – 8%.

4. З партії отриманого висушеного насіннєвого ріпаку відбираємо дві проби:

4.1. Перша проба йде на визначення насіннєвих властивостей матеріалу.

4.2. Друга – визначає кінцеву вологість матеріалу за пунктом 1.

5. Після визначення абсолютно сухої масі зразка розраховуємо і будуємо криві сушіння та швидкості сушіння ріпаку: $W = f(\tau)$, $dW/d\tau = f(W)$.

3.2. Вплив режимів сушіння на кінетику процесу

При виборі режимів сушіння в теплонасосній зерносушарці використовувались дані експериментальних досліджень на конвективному сушильному стенду та результати лабораторних досліджень з якості насіння ріпаку.

Інтенсифікувати процес сушіння насіння ріпаку в теплонасосній зерносушарці при підвищення температури теплоносія можна за рахунок зменшення вологовмісту теплоносія.

Значення вологовмісту теплоносія визначаємо за I – d діаграмою на лінії насичення φ = 100% і вибираємо в залежності від температури випарника теплового насосу (рис. 3.5) [92,93].

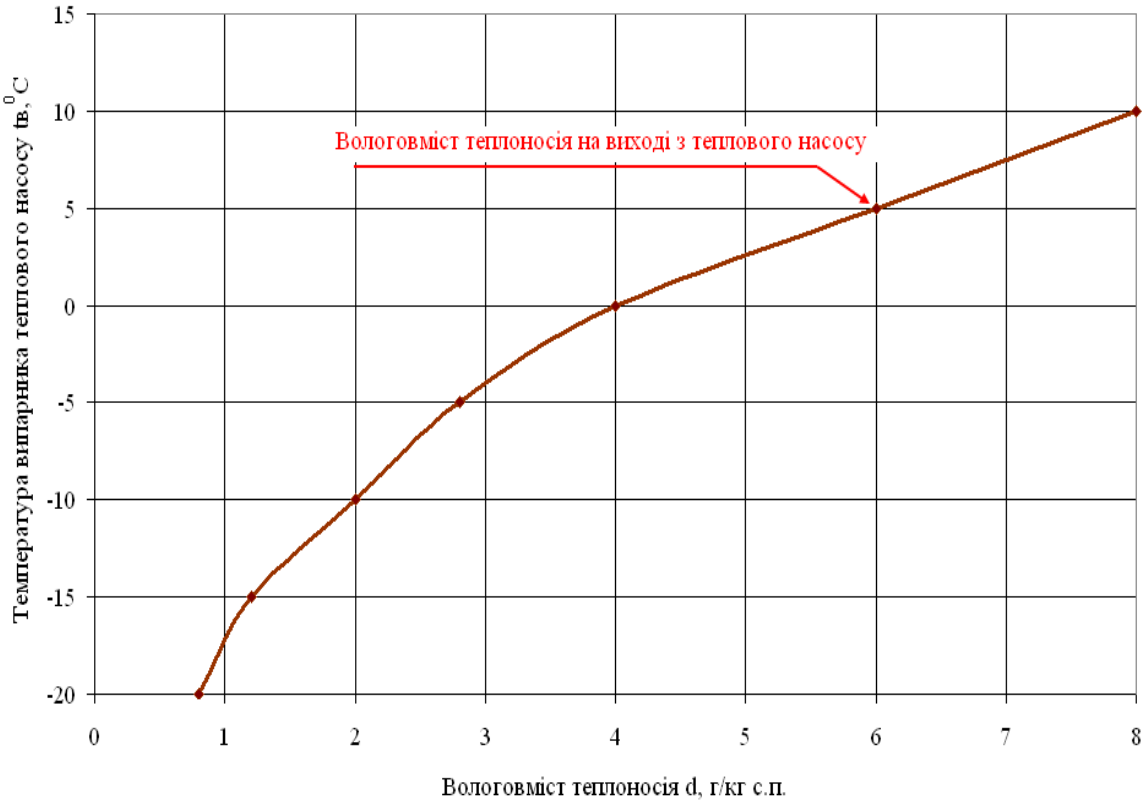


Рис. 3.5. Залежність вологовмісту теплоносія від температури випарника теплового насосу з компресором ZR49K3E – TFD фірми Copeland ZR при роботі на фреоні R 22

За даними досліджень на конвективному сушильному стенді найкраща схожість насіння ріпаку відбувається при температурі теплоносія 50ºС, тобто при температурі випарника +5ºС і температурі конденсатора 50ºС – коефіцієнт перетворення теплового насосу складає 3,2 (рис. 3.6). Як видно з рис. 4.2 зменшення температури теплоносія на конденсаторі теплового насосу до 40ºС приводить до збільшення коефіцієнту перетворення теплової енергії до 4,3. Таким чином необхідно визначити, наскільки зменшення температури теплоносія від 40 до 50ºС впливає на кінетику процесу з визначенням енергетичних витрат та якості насіння ріпаку?

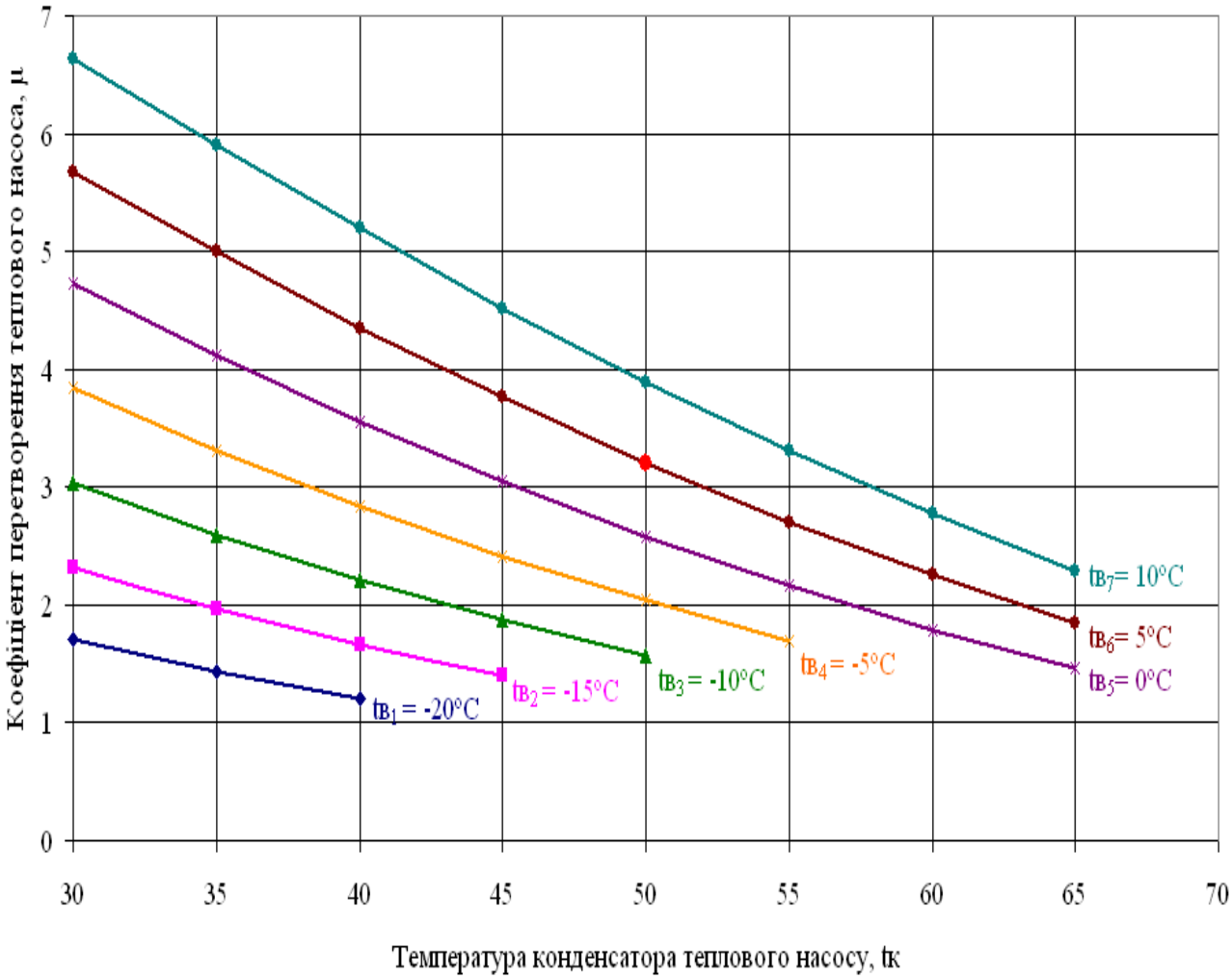


Рис. 3.6. Залежність коефіцієнту перетворення від зміни температури випарника та конденсатора теплового насосу з компресором ZR49K3E – TFD фірми Copeland ZR при роботі на фреоні R 22

Значення коефіцієнту перетворення теплового насосу також залежить від виду холодоагенту. В тепловому насосі з компресором ZR49K3E – TFD фірми Copeland ZR використовуються два виду фреону: R 22 та R 407 (рис. 3.7).

Як видно з рис. 3.7, при використанні холодоагенту R 407 маємо кращий коефіцієнт перетворення при низьких температурах конденсації теплового насосу, ніж при фреоні R 22 . При температурі конденсації теплового насосу

50 ºС найбільший коефіцієнтом перетворення в холодоагенту R 22, тому вибираємо його для роботи в тепловому насосі.

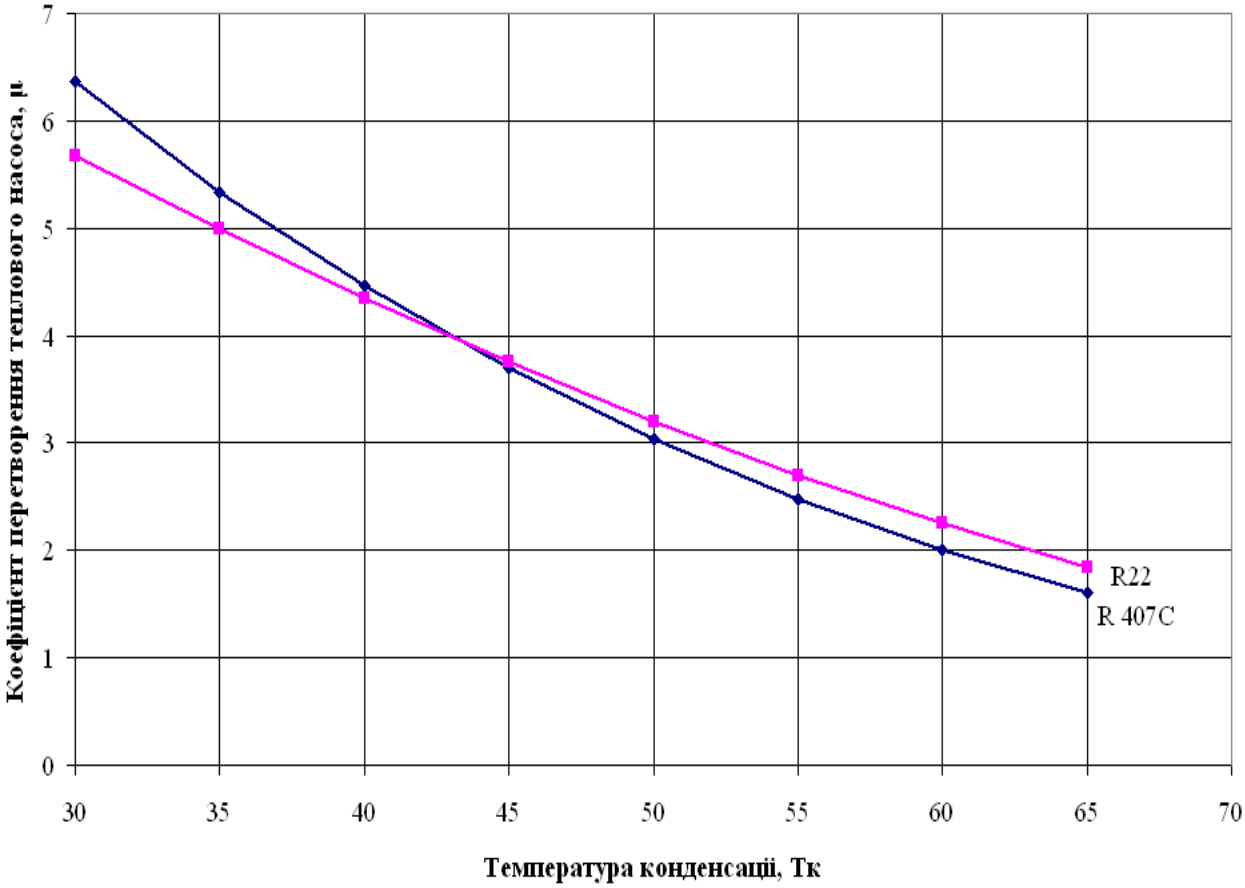


Рис. 3.7. Залежність коефіцієнту перетворення від виду холодоагенту (фреону) та температури конденсації теплового насосу з компресором ZR49K3E – TFD фірми Copeland ZR

Експериментальні дослідження в теплонасосній зерносушарці проводились згідно методики. Сушіння в теплонасосній установці відбувалось в сушильній шахті в нерухомому щільному шарі.

Конструктивні особливості зерносушильної шахти дозволяють інтенсифікувати процес сушіння насіння ріпаку за рахунок зменшення відстані між коробами до 20 – 40 мм та збільшення швидкості руху теплоносія на виході з зерносушарки до 1,2 – 1,5 м/с. Конструкція зерносушильної шахти наведена на
рис. 3.8.

Основні дослідження в теплонасосній зерносушарці проводимо на насінні ріпаку від дії наступних факторів: температури, швидкості та вологовмісту теплоносія, початкової вологості, шару насіння та від виду зерна.

Як зазначалось вище, найкраща схожість та енергія росту насіння ріпаку спостерігається при температурі теплоносія 50ºС. Знижуючи температуру теплоносія – підвищуємо коефіцієнт перетворення теплового насосу, тому для

дослідження вибираємо температуру теплоносія на конденсаторі теплонасосної зерносушарки 40 та 50ºС.

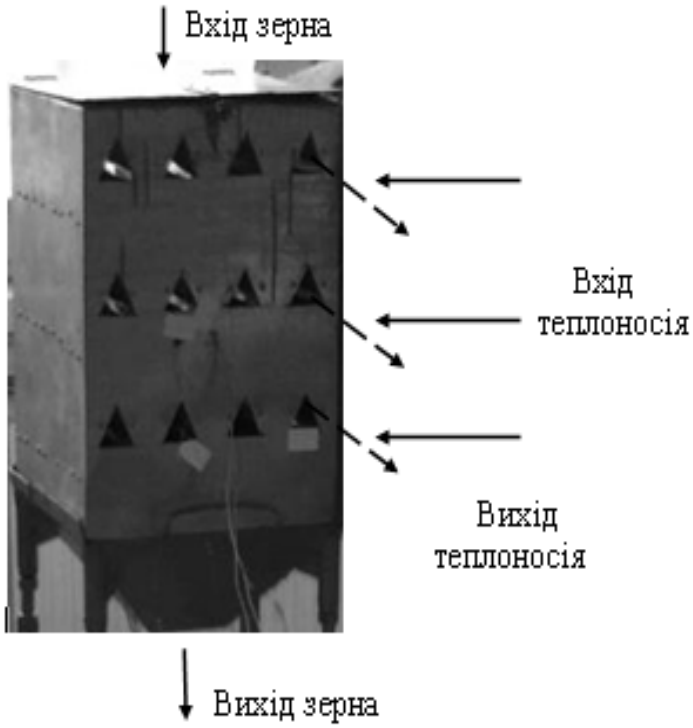


Рис. 3.8. Конструкція зерносушильної шахти

Результати проведених досліджень *впливу температури* на кінетику процесу сушіння в теплонасосній зерносушарці показали, що збільшення температури на 10ºС (40 – 50ºС) зменшує тривалість сушіння на 12% (рис. 3.9).

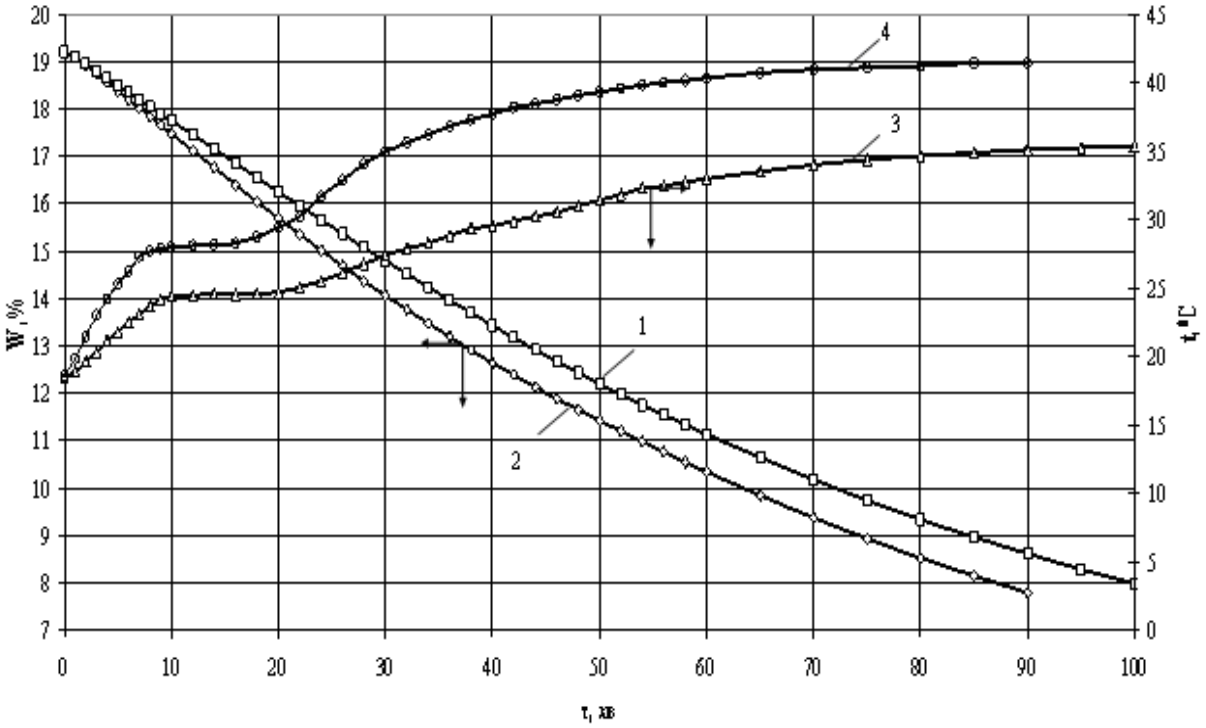


Рис. 3.9. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння ріпаку при різній температурі теплоносія: 1, 3 – 40ºС; 2, 4 – 50ºС.

V =1,2 м/с, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/кг с. п.

Найбільш інтенсивне прогрівання шару ріпаку відбувається при температурі теплоносія 50ºС і при вологості 8% кінцева температура становить 42,4 ºС, а при температурі 40ºС – 35,4ºС.

Кінетику процесу сушіння ріпаку за отриманими експериментальними даними описали за допомогою поліномів 2 степені та знайшли величину достовірності апроксимації в графічній програмі Excel. Апроксимуючі функції (3.1 – 3.2), гарно описують кінетику процесу сушіння ріпаку при різних температурах при достовірності апроксимації R^2 = 0,999.

Так, для температури 50ºС рівняння кінетики сушіння дорівнює:

$$W_{50} = 0{,}0006\tau^2 - 0{,}1783\tau + 19{,}359 \qquad (3.1)$$

Для температури 40ºС:

$$W_{40} = 0{,}0008\tau^2 - 0{,}1969\tau + 19{,}325 \qquad (3.2)$$

Процес швидкості сушіння насіння ріпаку в теплонасосній сушильній установці (рис. 3.10) проходить наступні етапи: прогрівання, період постійної та період падаючої швидкості сушіння.

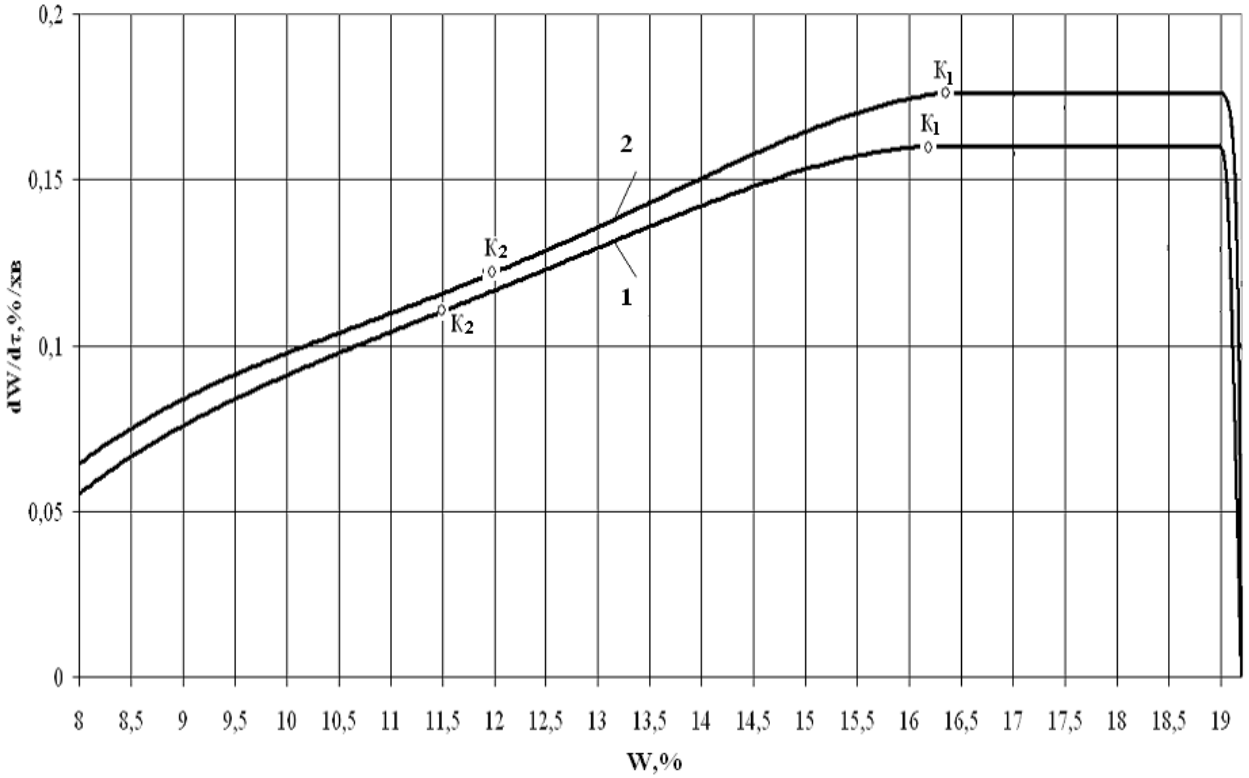


Рис. 3.10. Криві швидкості сушіння ріпаку при різній температурі теплоносія: 1 – 40ºС; 2 – 50ºС.
V =1,2 м/с, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/ кг с. п.

Максимальна швидкість сушіння при температурі теплоносія 50ºС в точці $К_1$ становить 0,181%/хв., а при температурі 40ºС – 0,155%/хв. В періоді падаючої швидкості сушіння спостерігається друга критична точка $К_2$ при вологості 11,5 – 12%.

Інтенсивність процесу сушіння насіннєвого ріпаку в сушильних шахтах теплонасосної зерносушарки з відстанню між коробами 20 – 40 мм забезпечується максимальною швидкістю руху теплоносія відповідно 1,2 та 1,5 м/с (в залежності від можливості виносу насіння через відвідні канали зерносушарки). Порівняння режимів сушіння з зазначеними *швидкостями руху теплоносія* проводимо на сушильній шахті з відстанню між коробами 40 мм (рис. 3.11).

Результати проведених досліджень показали, що чим вища швидкість руху теплоносія – тим інтенсивніше проходить процес сушіння насіння ріпаку. При швидкості руху теплоносія 1,5 м/с тривалість сушіння складає 72 хв., що в 1,2 рази менше ніж при швидкості руху 1,2 м/с. Як видно з температурних кривих найбільш інтенсивно прогрівається ріпак при швидкості теплоносія 1,5 м/с з кінцевою температурою шару ріпаку 42,4ºС.

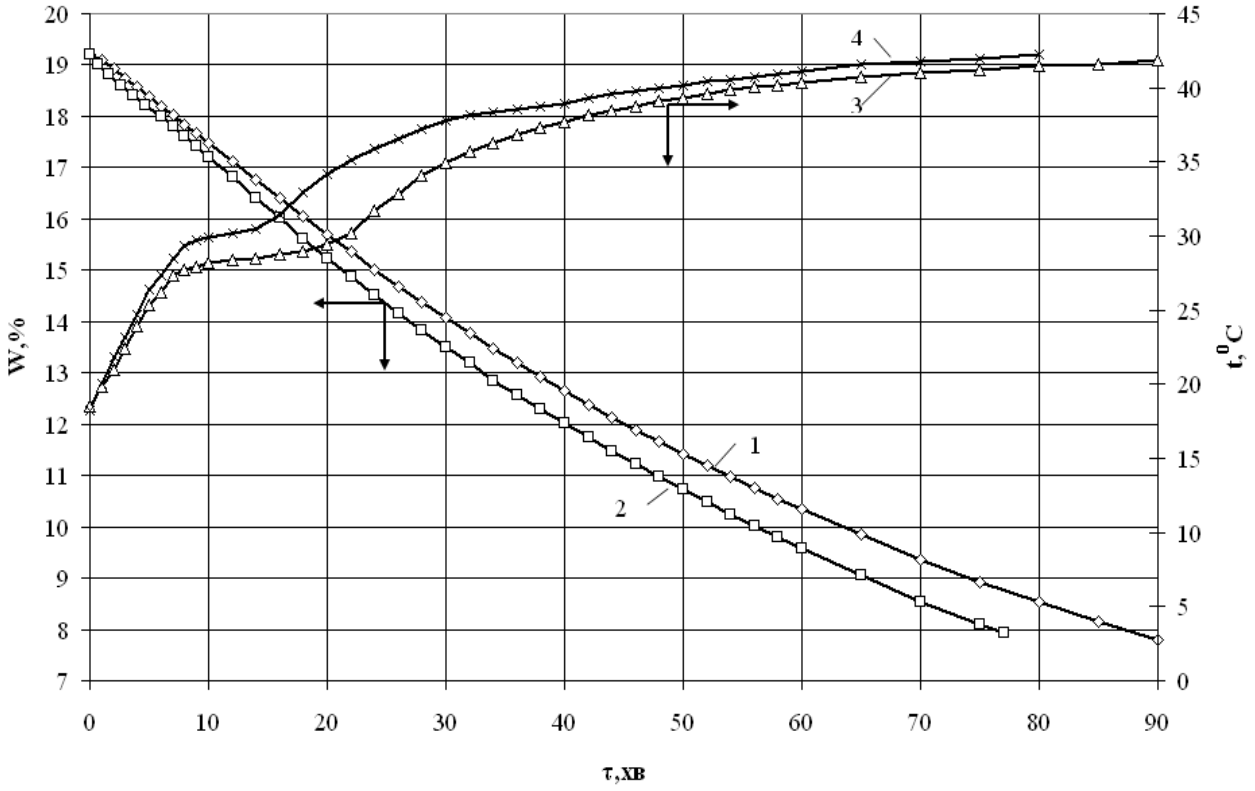


Рис. 3.11. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння ріпаку при різній швидкості руху теплоносія: 1,3 – 1,2 м/с, 2,4 – 1,5 м/с. t = 50ºС, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/ кг с. п.

Кінетику процесу сушіння ріпаку по отриманим експериментальним даним описали за допомогою поліномів 2 степені (рис.3.11) та знайшли величину

достовірності апроксимації в графічній програмі Excel. Апроксимуючі функції (3.3 – 3.4) гарно описують кінетику процесу сушіння ріпаку при різних швидкостях руху теплоносія з достовірності апроксимації R^2 = 0,999.

Для швидкості руху теплоносія V = 1,2 м/с рівняння кінетики сушіння:

$$W_{1,2} = 0{,}0006\tau^2 - 0{,}1783\tau + 19{,}359 \qquad (3.3)$$

Для швидкості руху теплоносія V = 1,5 м/с:

$$W_{1,5} = 0{,}00009\tau^2 - 0{,}2159\tau + 19{,}213 \qquad (3.4)$$

Чим більша швидкість руху теплоносія (рис. 3.12), тим більша швидкість сушіння ріпаку. Характер кривої швидкості сушіння не відрізняється від попередніх кривих швидкості сушіння ріпаку при різних температурах теплоносія. Максимальна швидкість в точці K_1 при всіх швидкостях руху теплоносія наступає при вологості ріпаку 16,6% і складає 0,181%/хв. та 0,22%/хв. відповідно до швидкостей руху теплоносія 1,2 і 1,5 м/с. Критична точка K_2 знаходиться при різних швидкостях руху в області 12%.

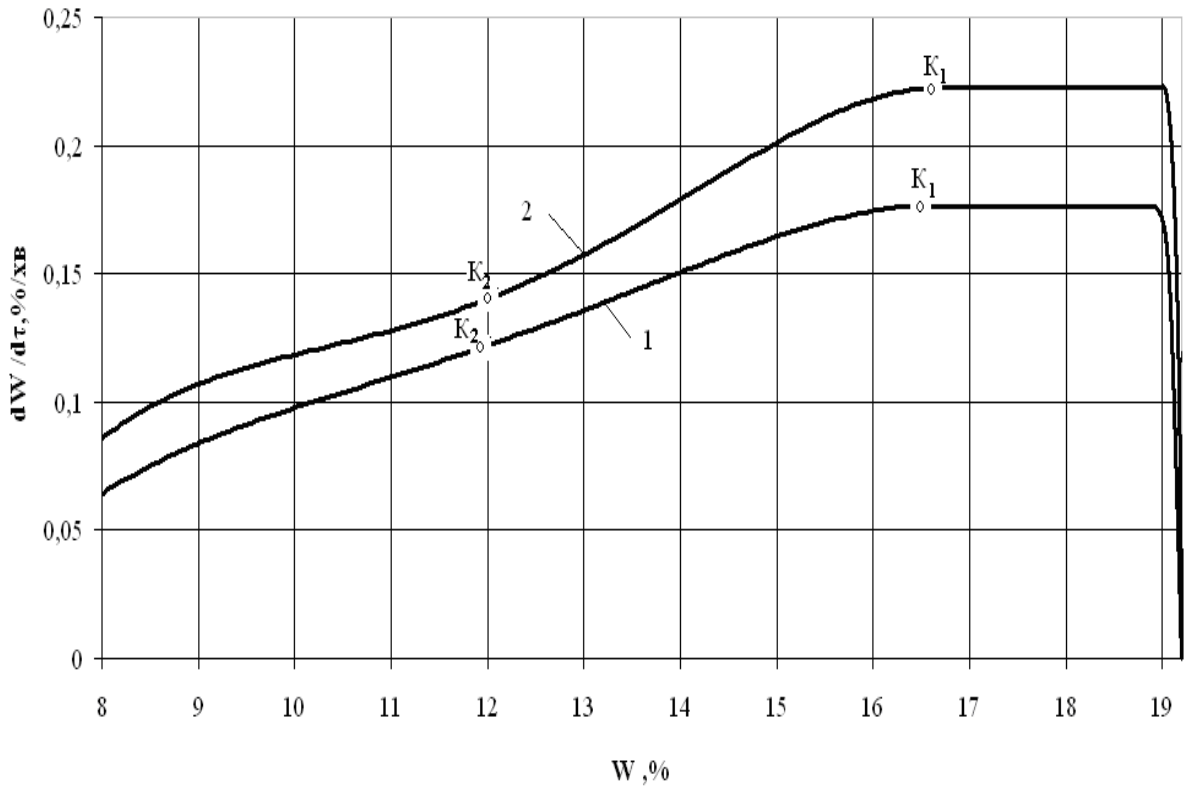


Рис. 3.12. Криві швидкості сушіння ріпаку при різній швидкості руху теплоносія: 1 – 1,2 м/с, 2 – 1,5 м/с. t = 50ºС, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/ кг с. п.

Для визначення *впливу товщини шару насіння ріпаку* на кінетику процесу сушіння в теплонасосній сушильній установці були створені конструкції сушильних шахт з різною відстанню між коробами 20, 30, 40 мм. Для

порівняння сушильних шахт з різною товщиною шару матеріалу вибираємо такі параметри сушіння: температура теплоносія – 50ºС, швидкість руху теплоносія –
1,2 м/с, початкова вологість насіння ріпаку – 19,2% (рис. 3.13).

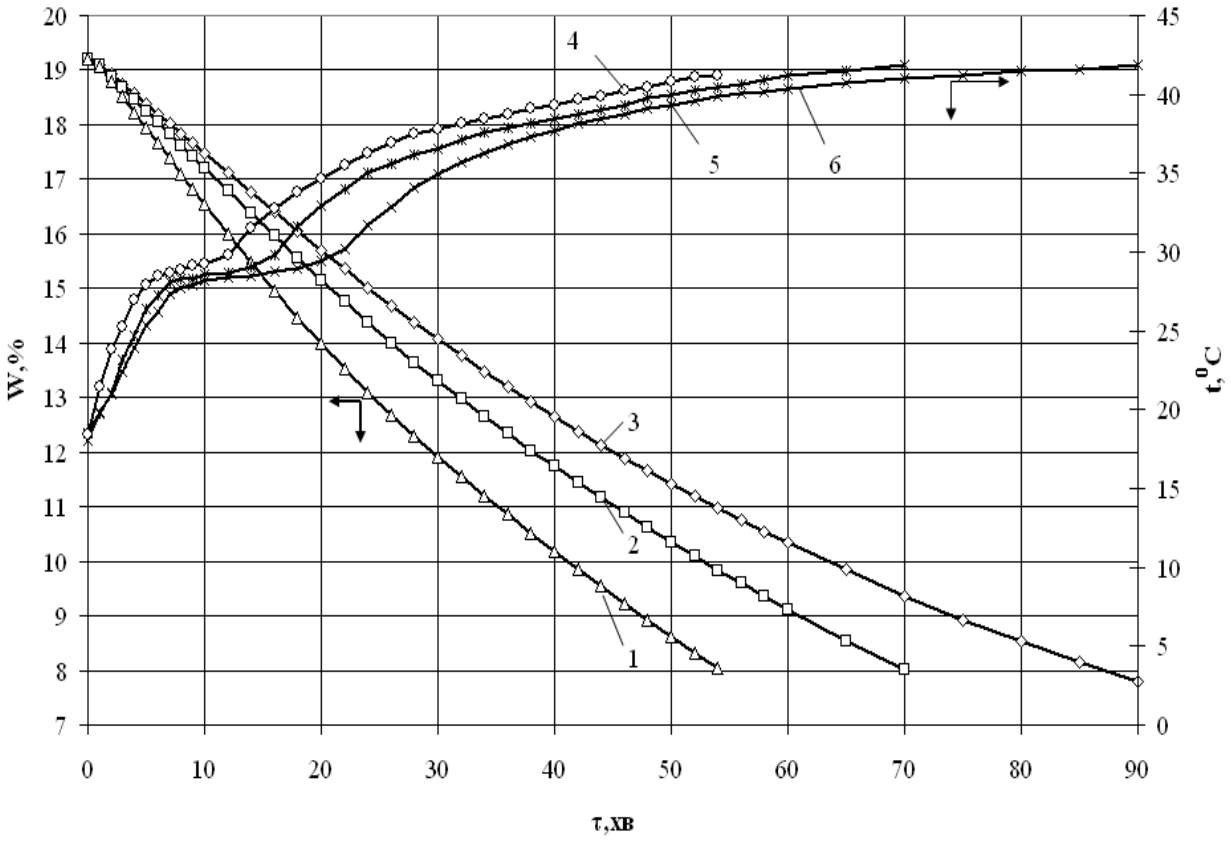


Рис. 3.13. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння ріпаку при різній товщині шару ріпаку: 1, 4 – 20 мм; 2, 5 – 30 мм; 3, 6 – 40 мм.
t = 50ºС, V = 1,2 м/с, W_n = 19,2%, d = 6 г/ кг с. п.

Результати проведених досліджень показали, що чим менше товщина шару – тим швидше відбувається сушіння ріпаку в шарі. Так збільшення товщини шару від 20 мм до 30 мм – збільшує тривалість сушіння на 38%, а при збільшенні до 40 мм – на 73% (рис. 3.13). Шар ріпаку 20 мм прогрівається більш
інтенсивно, чим інші і становить 41,8ºС при тривалості сушіння насіння ріпаку 52 хв. Прогрівання шарів 30 та 40 мм проходить більш повільніше до кінцевої температури 42 – 42,4ºС при тривалості сушіння відповідно 70 хв. та 88 хв.

Кінетику процесу сушіння ріпаку по отриманим експериментальним даним описали за допомогою поліномів 2 степені (рис. 3.13) та знайшли величину достовірності апроксимації в графічній програмі Excel. Апроксимуючі функції (3.5 – 3.7) гарно описують кінетику процесу сушіння ріпаку при різних швидкостях руху теплоносія і достовірність апроксимації R^2 = 0,999.

Так, для товщини шару δ = 20 мм рівняння кінетики сушіння дорівнює:

$$W_{20} = 0{,}0017\tau^2 - 0{,}2978\tau + 19{,}346 \qquad (3.5)$$

Для товщини шару δ =30 мм:

$$W_{30} = 0{,}001\tau^2 - 0{,}229\tau + 19{,}352 \qquad (3.6)$$

Та для товщини шару δ = 40 мм :

$$W_{40} = 0{,}0006\tau^2 - 0{,}1783\tau + 19{,}359 \qquad (3.7)$$

Криві швидкості сушіння ріпаку при різній товщині шару ріпаку представлені на рис. 3.14.

Максимальна швидкість сушіння ріпаку в критичній точці $К_1$ (рис.3.14) при товщині шару 20 мм – 0,32%/хв., при збільшенні шару швидкість зменшується і при 30 мм складає 0,21%/хв., а при 40 мм – 0,181 %/хв. Критична точка $К_2$ знаходиться при різні товщині шару в області 12%.

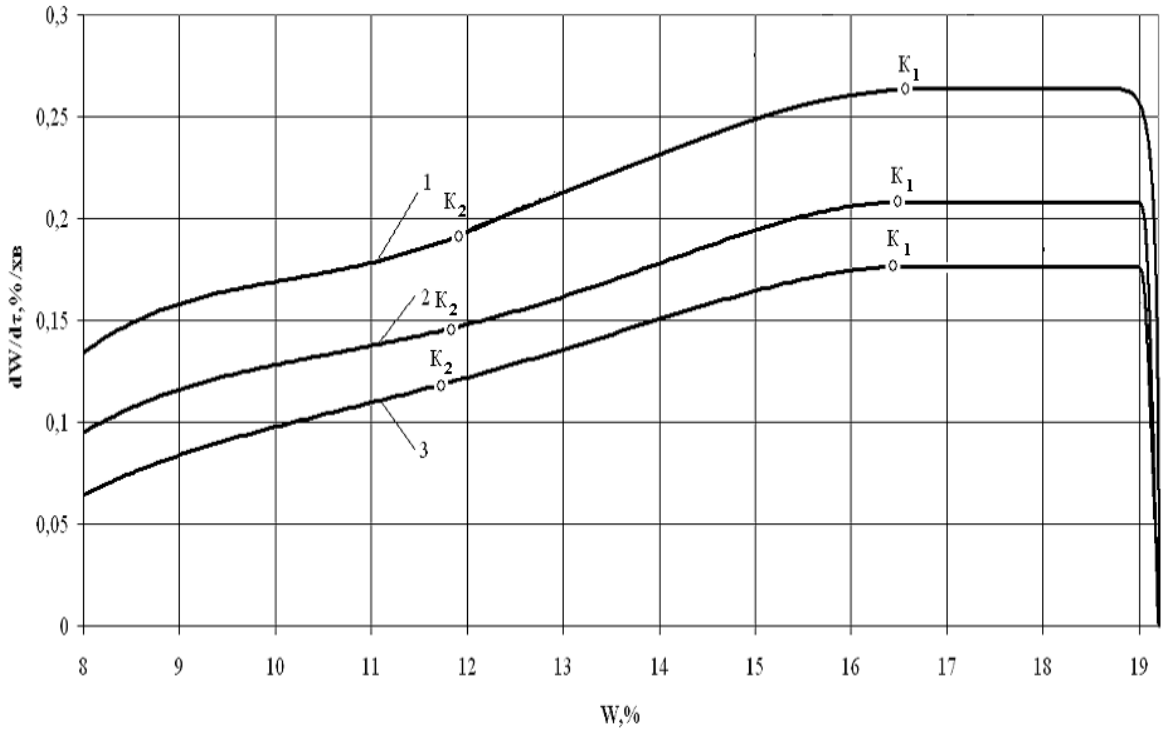


Рис. 3.14. Криві швидкості сушіння ріпаку при різній товщині шару ріпаку: 1 – 20 мм; 2 – 30 мм; 3 – 40 мм.
t = 50ºС, V=1,2 м/с, W_n = 19,2%, d = 10 г/ кг с. п.

Дослідження впливу *початкової вологості насіння ріпаку* в теплонасосній зерносушарці на кінетику процесу сушіння проводились при наступній початковій вологості матеріалу: 19,2% та 32%.

Результати проведених досліджень показали, що збільшення вологості від 19,2% до 32% збільшує тривалість сушіння на 44% (рис. 3.15).

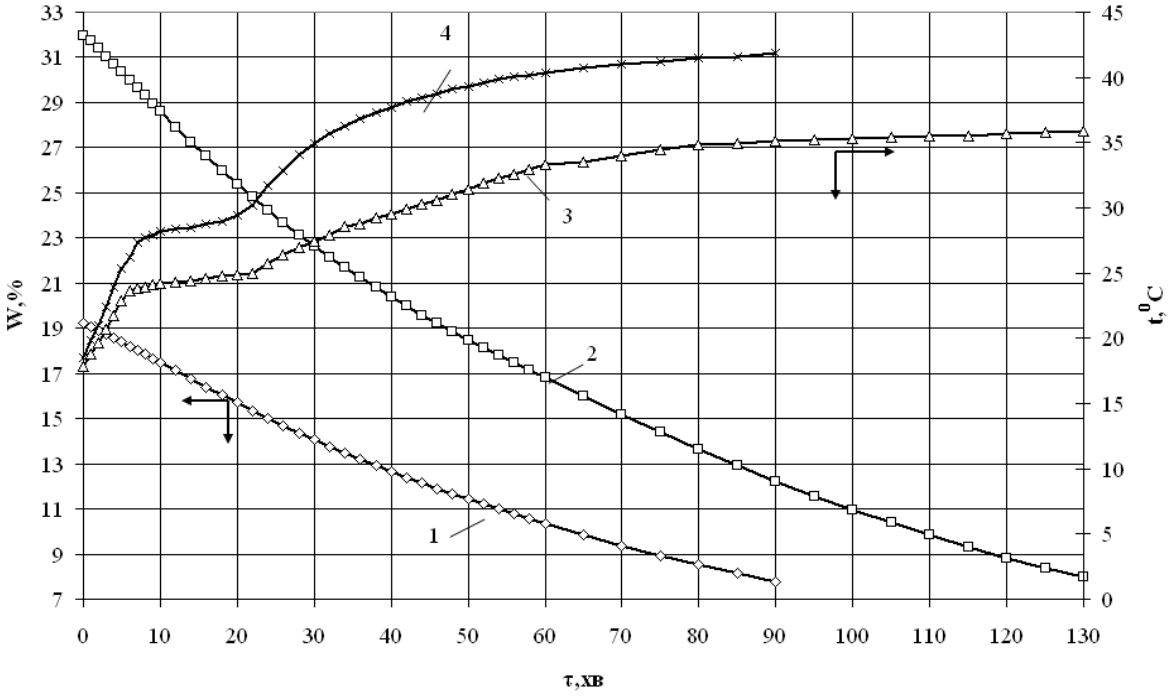


Рис. 3.15. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння ріпаку при різній початковій вологості ріпаку: 1,4 –19,2% ; 2,3 – 32%. t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.

Прогрівання шару ріпаку відбувається більш інтенсивно при температурі теплоносія 50ºС і початковій вологості 19,2%. Кінцева температура насіння ріпаку при початковій вологості 19% становить 42,4 ºС, а при 32% – 36,6 ºС.

Кінетику процесу сушіння ріпаку за отриманими експериментальними даними описали за допомогою поліномів 2 та 3 степені (рис. 3.15) і знайшли величину достовірності апроксимації в графічній програмі Excel. Апроксимуючі функції (3.8 – 3.9), гарно описують кінетику процесу сушіння ріпаку при різних швидкостях руху теплоносія з достовірності апроксимації R^2 = 0,999.

Для початкової вологості ріпаку $W_П = 19{,}2\%$:

$$W_{19} = 0{,}0006\tau^2 - 0{,}1783\tau + 19{,}359 \qquad (3.8)$$

Та для початкової вологості ріпаку $W_П = 32\%$:

$$W_{32} = -0{,}0000006\tau^3 - 0{,}0023\tau^2 - 0{,}3724\tau + 32{,}067 \qquad (3.9)$$

Характер кривої швидкості сушіння не відрізняється від попередніх кривих швидкості сушіння ріпаку при різних режимах. Чим більша початкова вологість (рис.3.16), тим більша швидкість сушіння ріпаку. Максимальна

швидкість сушіння ріпаку для початкової вологості 32% в критичній точці $К_1$ складає 0,35%/хв., а при початковій вологості 19,2% –0,181%/хв.

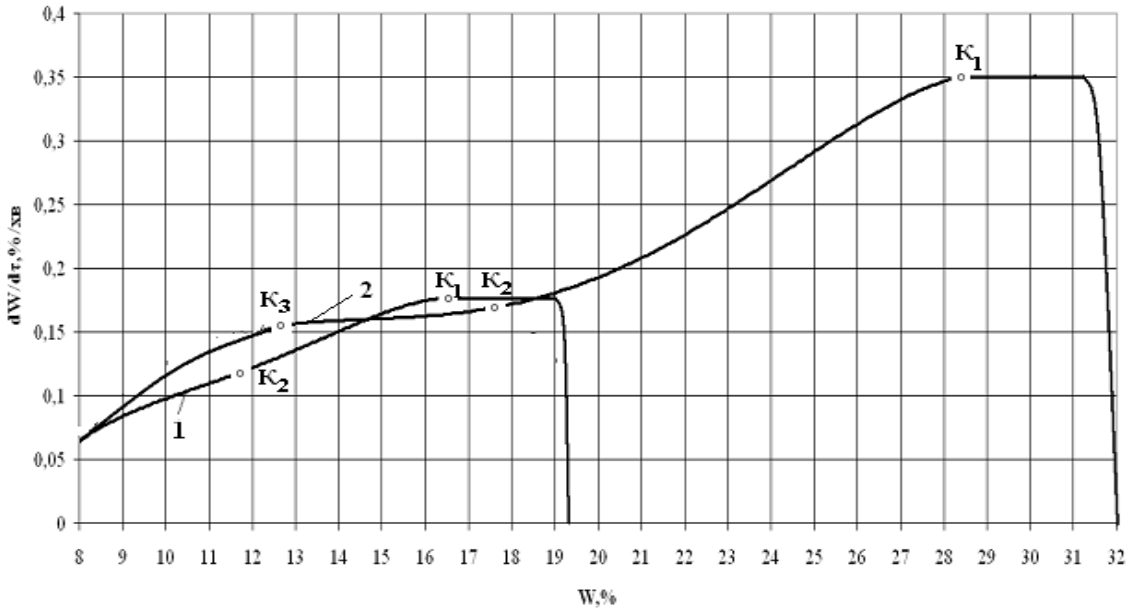


Рис 3.16. Криві швидкості сушіння насіння ріпаку при різній початковій вологості: 1 – 19,2%, 2 –32%.
t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.

Проведені дослідження на насінні ріпаку показали, що найбільш доцільний режим сушіння в теплонасосній зерносушарці – це температура теплоносія 50ºС, швидкість руху 1,5 м/с та товщини шару в шахті зерносушарки 20 мм. В процесі дослідження кінетики процесу сушіння були взяті *насіння зернових культур*: вівса, пшениці та ячменю (рис. 3.17).

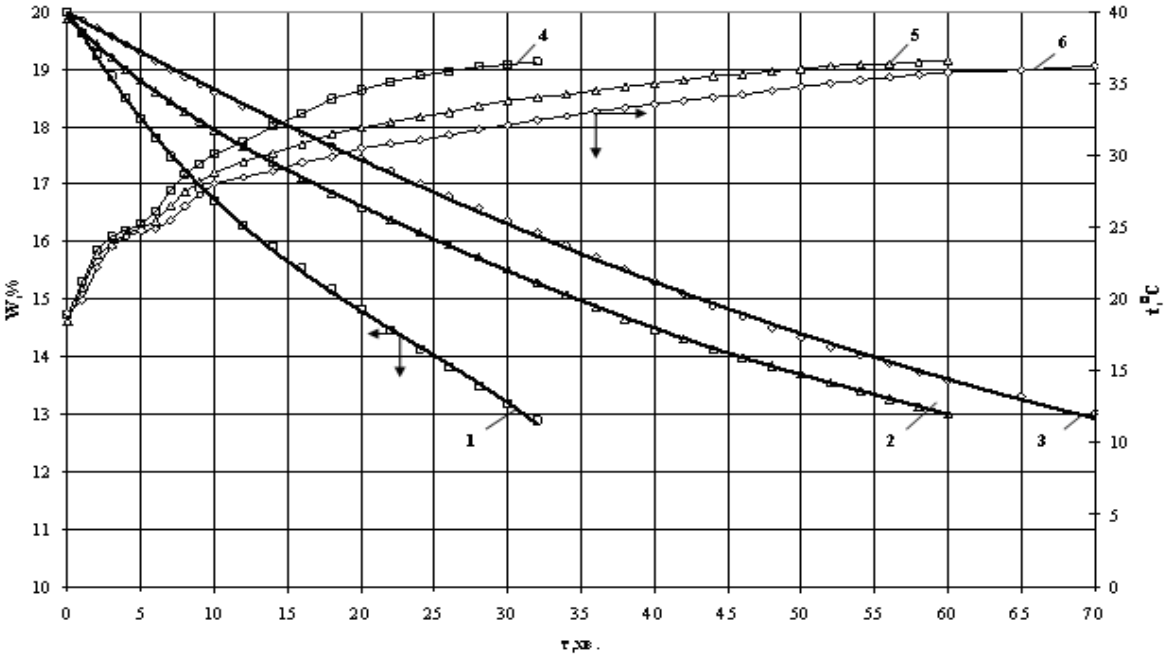


Рис. 3.17. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння вівса, пшениці та ячменю:

t = 50ºC, V = 1,2 м/с, W_n = 20%, S= 20 мм, d = 6 г/ кг с. п.
1,4 – овес; 2,5 – пшениця; 3,6 – ячмінь.

З рис. 3.17 видно, що найменша тривалість сушіння для насіння вівса при кінцевій вологості 13% складає 32 хв., що на 1,8 раз менше за пшеницю та на 2,18 раз менше за ячмінь. Прогрівання насіння зернових культур відбувається до температури 36 – 36,5ºС.

Кінетику процесу сушіння насіння зернових культур по отриманим експериментальним даним описали за допомогою поліномів 2 степені і знайшли величину достовірності апроксимації в графічній програмі Excel.

Апроксимуючі функції (3.10 – 3.12), гарно описують кінетику процесу сушіння ріпаку при різному види зернових культур з достовірністю апроксимації R^2 = 0,9997.

Для насіння вівса:

$$W_O = 0{,}0039\tau^2 - 0{,}3348\tau + 19{,}8 \qquad (3.10)$$

Для насіння пшениці:

$$W_П = 0{,}0011\tau^2 - 0{,}1752\tau + 19{,}696 \qquad (3.11)$$

Для насіння ячменю:

$$W_Я = 0{,}0005\tau^2 - 0{,}1373\tau + 19{,}969 \qquad (3.12)$$

Сушіння насіння зернових культур при різних видах зерна проходить періоди прогрівання, постійної та падаючої швидкості сушіння (рис.3.18). Характер кривої швидкості сушіння не відрізняється від кривих швидкості сушіння насіння ріпаку. Максимальна швидкість сушіння вівса складає 0,375%/хв., пшениці – 0,218 %/хв. та ячменю –0,142 %/хв.

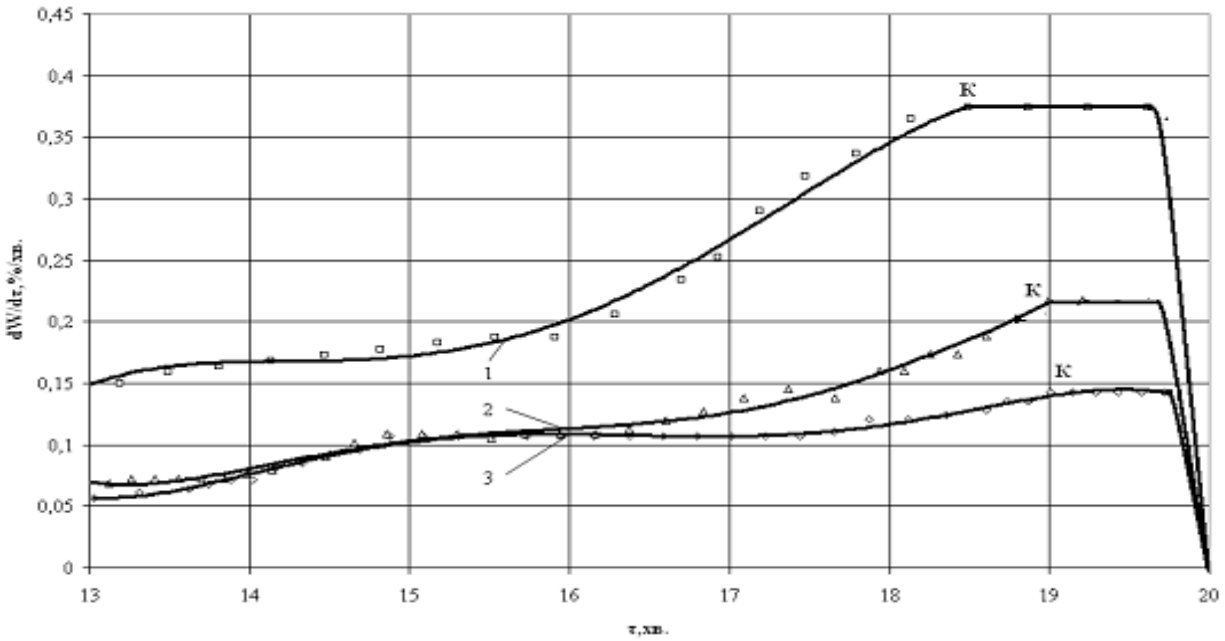


Рис 3.18. Криві швидкості сушіння насіння вівса, пшениці та ячменю:
t = 50ºС, *V* = 1,2 м/с, W_n = 20%, *S*= 20 мм, *d* = 6 г/ кг с. п.
1 – овес; 2 – пшениця; 3 – ячмінь.

Вплив *вологовмісту теплоносія* на кінетику сушіння насіння ріпаку визначаємо між вологовміст теплоносія на виході з теплового насосу 6 г/кг с. п. та вологовмістом теплоносія без теплового насосу 10 г/кг с. п. з підігріванням теплоносія за допомогою електропідігрівачів.

Дослідження кінетики процесу сушіння насіння ріпаку проводилась в зерносушильній шахті з відстанню між коробами 20 мм при температурі теплоносія 50ºС з швидкістю руху 1,2 м/с.

Зменшення вологовмісту теплоносія в тепловому насосі прискорює процес сушіння насіння ріпаку на 11%. Кінцева температура теплоносія в шарі ріпаку в теплонасосній зерносушарці при вологості зерна 8% складає 40,9°С, з електричним нагріванням - 41,2°С (рис. 3.19).

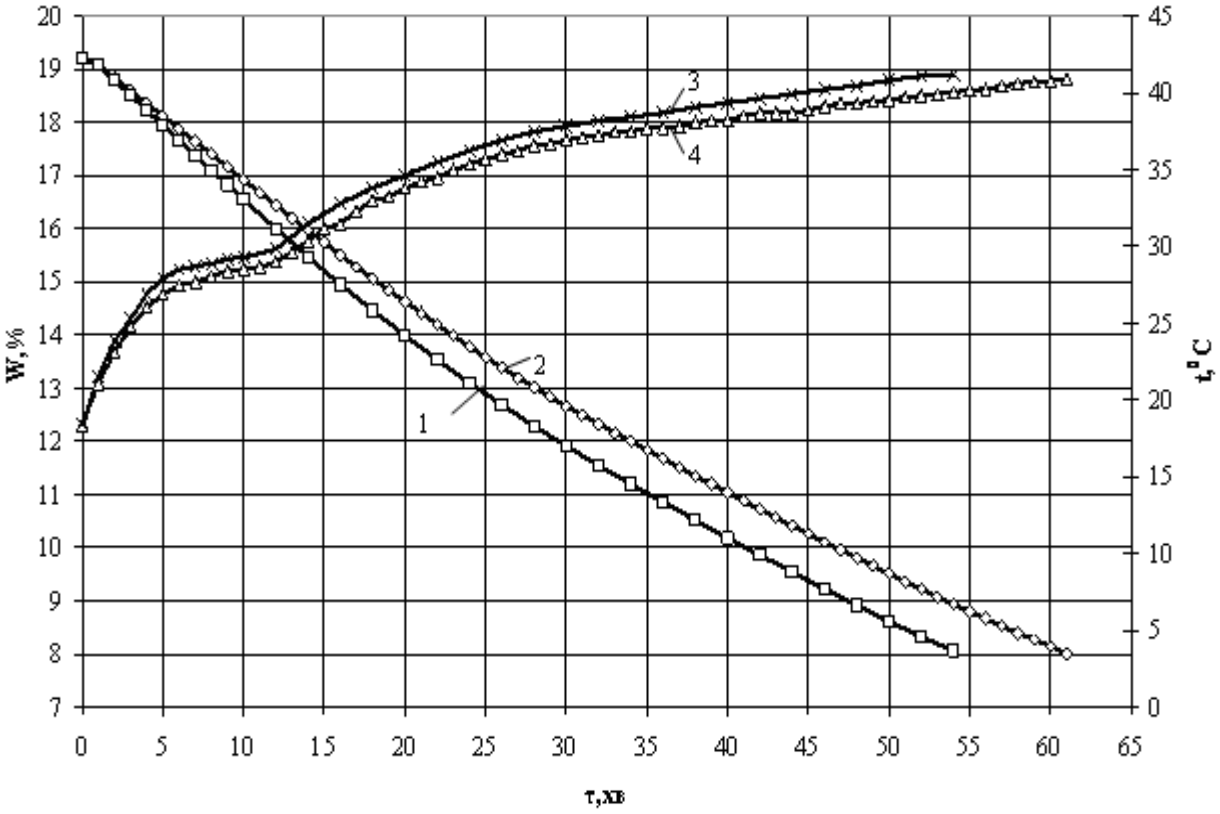


Рис. 3.19. Кінетика процесу та температурні криві сушіння насіння ріпаку з: 1 – тепловим насосом (d = 6 г/ кг с. п.); 2 – електронагрівом (d = 10 г/ кг с. п.). t = 50ºС, V = 1,2 м/с, W_n = 19,2%, δ = 20 мм.

Кінетику процесу сушіння ріпаку по отриманим експериментальним даним описали за допомогою поліномів 2 степені (3.10 – 3.11) з достовірністю апроксимації R^2 = 0,9998.

Для вологовмісту повітря d = 6 г/кг с. п.:

$$W_6 = 0{,}0017\tau^2 - 0{,}2978\tau + 19{,}346 \qquad (3.13)$$

Для вологовмісту повітря d = 10 г/кг с. п.:

$$W_{10} = 0{,}0012\tau^2 - 0{,}2855\tau + 19{,}32 \qquad (3.14)$$

Сушіння насіння ріпаку при різних вологовмісту теплоносія проходить періоди нагрівання, постійної та падаючої швидкості сушіння (рис. 3.20).

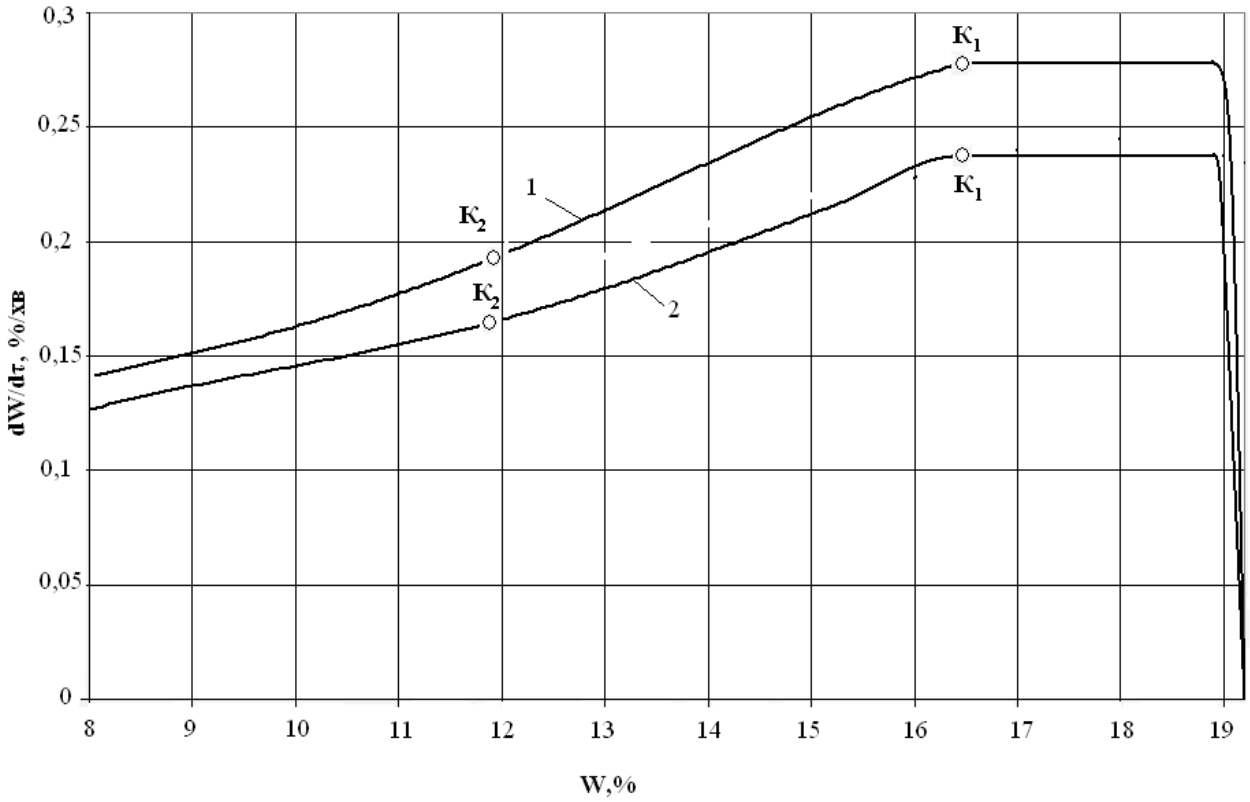


Рис. 3.20. Криві швидкості сушіння ріпаку при різному вологовмісту теплоносія: 1 – тепловим насосом (*d* = 6 г/ кг с. п.); 2 – електронагрівом (*d* = 10 г/ кг с. п.). *t* = 50ºС, *V* = 1,2 м/с, W_n = 19,2%, δ = 20 мм.

Зменьшення вологовмісту теплоносія, збільшує швидкість сушіння насіння ріпаку. Максимальна швидкість сушіння ріпаку для вологовмісту повітря 6 г/кг с. п. в критичній точці $К_1$ складає 0,283%/хв, а при вологовмісту повітря 10 г/кг с. п. – 0,243%/хв. Критичні точки $К_2$ в залежності від режиму сушіння знаходяться при вологості насіння ріпаку 11,8 – 11,9% з швидкістю сушіння 0,16 – 0,19 %/хв.

3.3. Вплив режимів сушіння на енергоефективність, інтенсивність процесу сушіння та якість насіннєвого зерна

Знімаючи кінетику сушіння насіннєвого ріпаку проводились дослідження по визначенню питомих витрат теплоти на 1 кг випареної вологи в залежності від способу підігрівання та режимів сушіння в теплонасосній зерносушарці.

Порівнюючи середні питомі витрати теплоти в зерносушарці з електричним підігріванням в режимі 1 та в теплонасосній зерносушарці в режимі 5, можна зазначити, що витрати збільшуються в 4 рази і не відповідають нормативним вимогам за витратами теплоти для насіннєвого зерна (рис.3.21).

Порівняння режимів сушіння 2 та 3 показують, що витрати теплоти більші при температурі 40°С (режим 2) складають 4828 кДж/кг вип. вологи, при температурі 50°С в 1,17 раз. Незважаючи на більший коефіцієнт перетворення теплового насосу вирішальне значення має тривалість сушіння насіння ріпаку, яка збільшує витрати енергії. Наведені середні питомі витрати теплоти в залежності від режиму сушіння показують, що всі вони менші на 20 – 40% за нормативні ГОСТ 28293-89 [94,95]. Найменші витрати теплоти в тепловому насосі спостерігаються в режими 4 та 5 і складають відповідно 3675 – 3700 кДж/кг. Зменшення швидкості теплоносія від 1,5 до 1,2 м/с при температурі 50°С – збільшує питомі витрати теплоти на 11% (режим 4,3), а зменшення температури від 50°С до 40°С при швидкості руху 1,2 м/с збільшує на 17% [91,96].

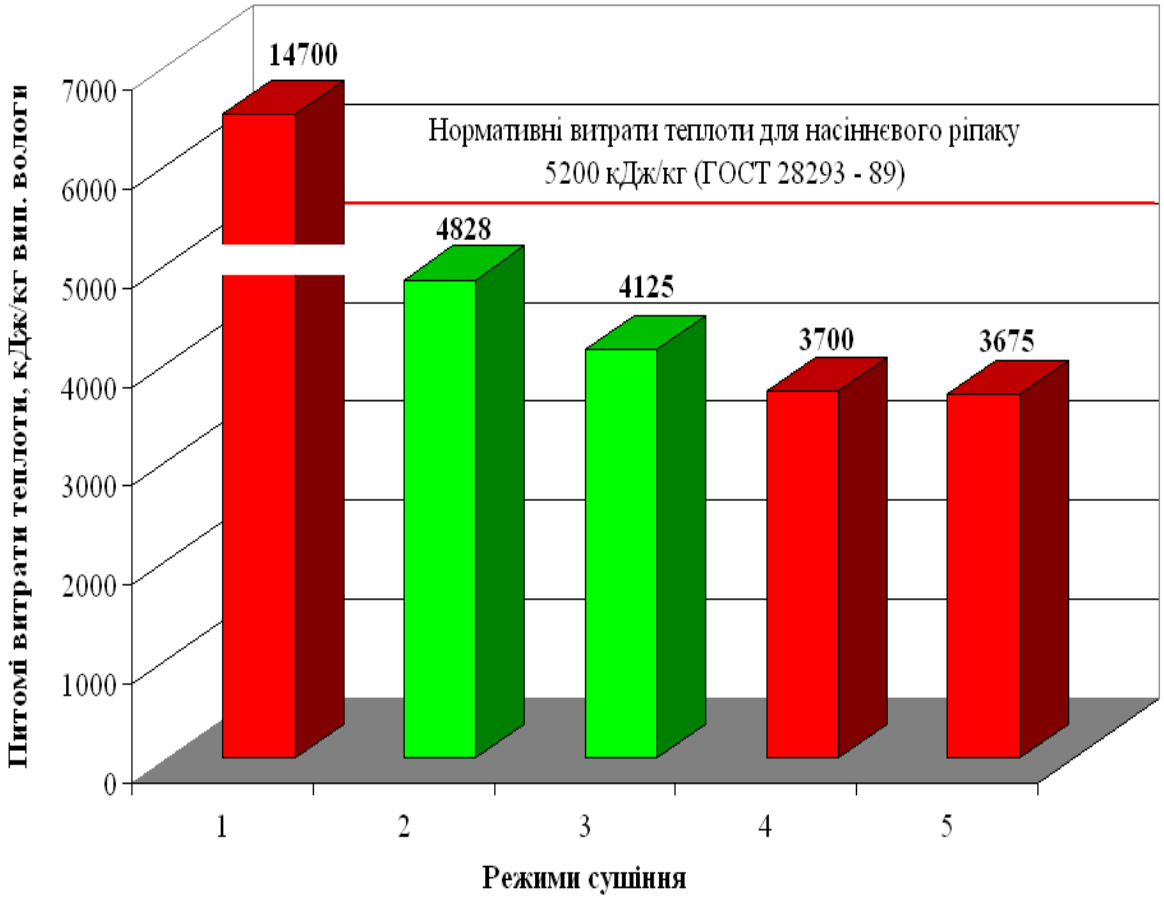


Рис. 3.21. Середні питомі витрати теплоти від режиму сушіння ріпаку:
електронагрівом: 1 – t = 50°С, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 10 г/ кг с. п.;
в тепловому насосі: 2 – t = 40°С, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
3 – t = 50°С, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
4 – t = 50°С, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;

5 – t = 50°С, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 6 г/ кг с. п..

Зміна питомих витрат теплоти в процесі сушіння насіння ріпаку в залежності від температури і швидкості руху теплоносія, товщини шару приведені на (рис. 3.22 – 3.24). Спостерігається загальна тенденція у всіх наведених залежностях параметрів сушіння від питомих витрат теплоти: на початку процесу витрати теплоти мінімальні і складають 2400 – 3500 кДж/кг, поступове їх збільшення відбувається до вологості 11,5 – 12%,що відповідає критичній точці $К_2$, а потім витрати різко збільшуються до вологості 8%.

Збільшення питомих витрат при кінцевій вологості 8% (рис. 3.22), становить для температури 40°С – 5150 кДж/кг, а для температури 50°С - 4600 кДж/кг, що на 6 – 12% вище за середніх питомих витрат при цих режимах сушіння представлених на рис. 3.21.

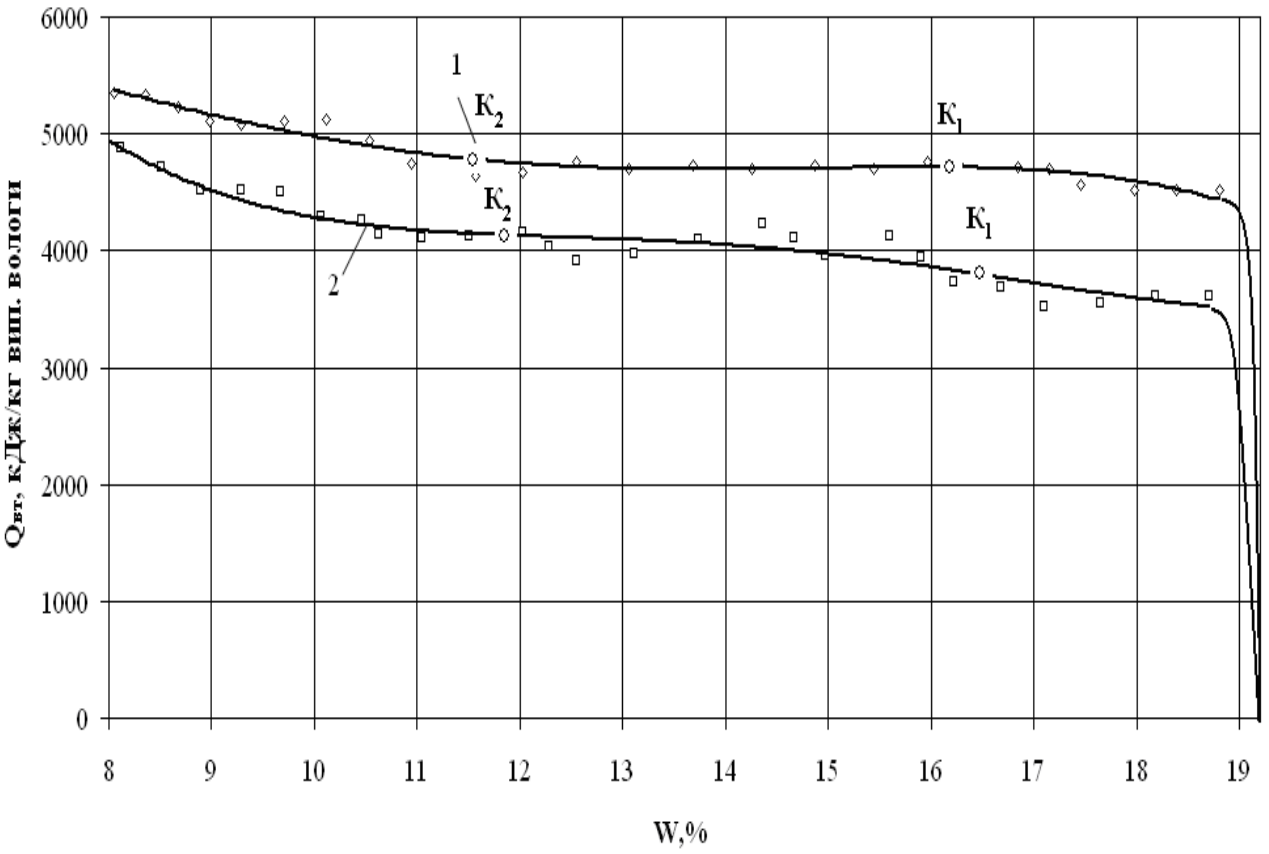


Рис. 3.22. Питомі витрати теплоти від вологості ріпаку в процесі сушіння насіння ріпаку при різній температури теплоносія: 1 – 40ºС; 2 – 50ºС. V =1,2 м/с, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/кг с. п.

З збільшенням швидкості руху теплоносія до 1,5 м/с при вологості 8% (рис. 3.23) питомі витрати теплоти становить 4420 кДж/ кг, що на 7% більше за середні питомі витрати теплоти при цьому режимі сушіння.

Зі зменшенням товщини шару насіння ріпаку до 20 мм при вологості 8% (рис. 3.24) питомі витрати теплоти складають 3967 кДж/ кг, що на 8% більше за середні питомі витрати теплоти при цьому режимі сушіння. Видалення 2 – 3% в

самому кінці сушіння насіння ріпаку збільшує енергетичні витрати на 6 – 12% від середніх витрат на процес.

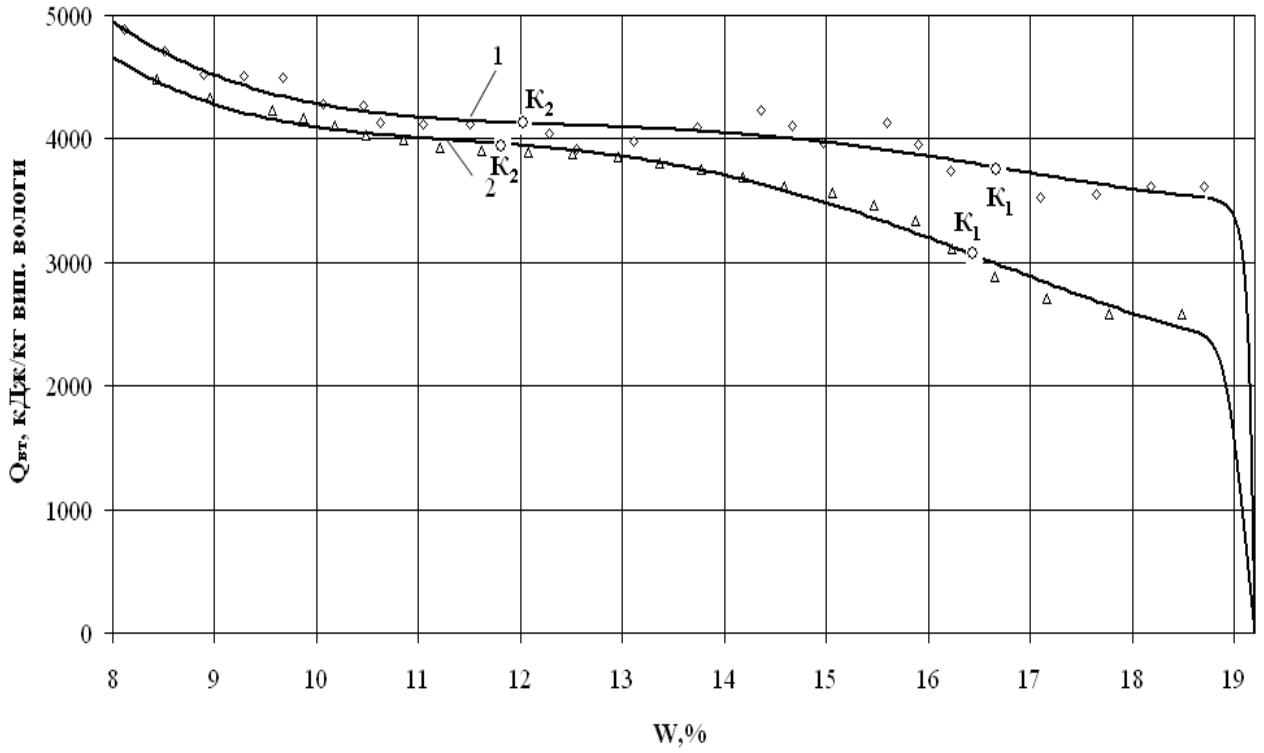


Рис. 3.23. Питомі витрати теплоти від вологості ріпаку в процес сушіння насіння ріпаку при швидкості руху теплоносія: 1 – 1,2 м/с, 2 – 1,5 м/с. t = 50ºС, δ = 40 мм, W_n = 19,2 %, d = 6 г/ кг с. п.

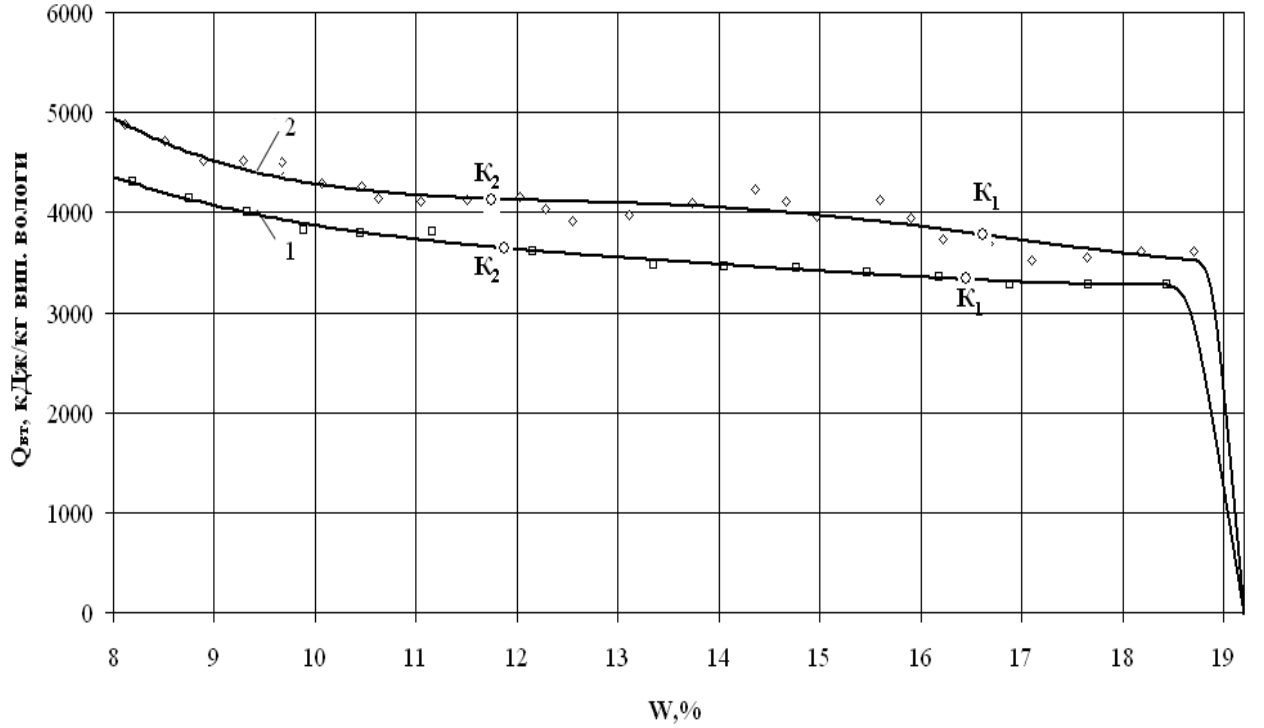


Рис. 3.24. Питомі витрати теплоти від вологості ріпаку в процесі сушіння насіння ріпаку при різній товщині шару: 1 – 20 мм; 2 – 40 мм. t = 50ºС, V=1,2 м/с, W_n = 19,2%, d = 10 г/ кг с. п.

Інтенсивність процесу сушіння насіння ріпаку в теплонасосній зерносушарці можна оцінити за вологонапруженістю об'єму сушарки, тобто кількістю випареної вологи з 1 м^3 його об'єму за годину. На величину вологонапруженості впливає температура теплоносія (режим 4, 5), швидкість руху (режим 2, 4), вологовміст теплоносія (режим 1,3), товщина шару насіння (режим 1,4) (рис. 3.25) [96].

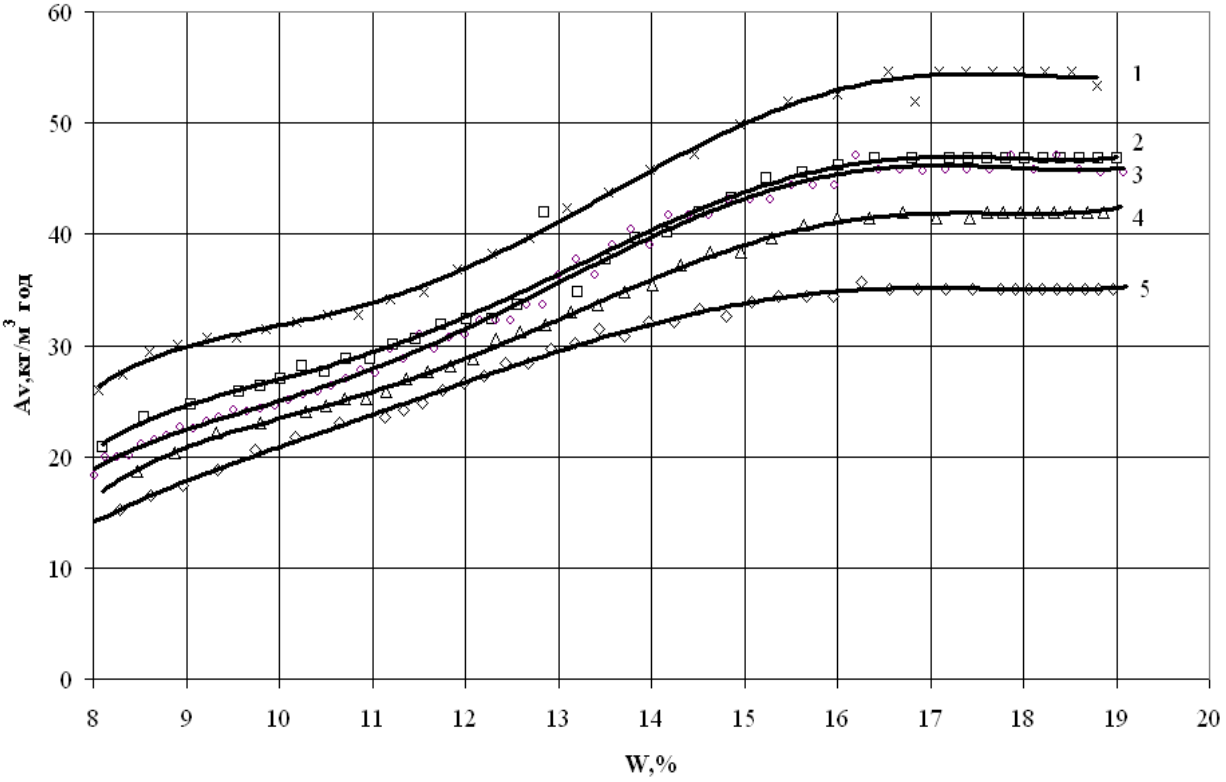


Рис. 3.25. Зміна інтенсивності сушіння насіння ріпаку від режиму:
1 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
2 – t = 50ºС, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
3 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 10 г/ кг с. п.;
4 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
5 – t = 40ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.

Як видно, вплив параметрів сушіння в теплонасосній зерносушарці на інтенсивність сушіння відбувається від зміни товщини шару насіння на 57%, вологовмісту теплоносія на 20%, температури на 17%. та швидкості руху теплоносія на 15%.

Найбільша інтенсивність сушіння ріпаку відбувається в шарі 20 мм при вологовмісту теплоносія d = 6 г/ кг с. п. та температури 50ºС з швидкості руху 1,2 м/с і складає 54 кг/м^3 год.

Інтенсивність в процесі сушіння насіння ріпаку на початку максимальна, при цьому енергетичні витрати мінімальні. Потім йде поступове зменшення інтенсивності сушіння та збільшення енергетичних витрат і при кінцевій

вологості матеріалу 8% - інтенсивність сушіння зменшується на 50 – 60%,.а енергетичні витрати максимальні.

Порівнюючи отримані дані значення середньої інтенсивності теплонасосної зерносушарки з прямоточними шахтними зерносушарками [28,63], інтенсивність процесу підвищується в 1,5 – 2 рази (табл. 3.1).

Таблиця 3.1.Середня інтенсивність (вологонапруженість) від типу зерносушарки [2] та режиму сушіння насіння ріпаку (нумерація режимів згідно рис. 3.25) в теплонасосній зерносушарці [96]

Тип зерносушарки	Прямоточні шахтні		Теплонасосна			
	ДСП – 24	ДСП – 32	Режими			
			1	2	4	5
Вологонапруженість зерносушарки, кг/м^3 год.	20,5	28,4	42	38	34	30

Якщо порівняти зміну інтенсивності сушіння та питомі витрати теплоти від вологості насіння ріпаку в режимі сушіння t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 6 г/ кг с. п., то можемо спостерігати таку залежність: на початку процесу сушіння інтенсивність висока – питомі витрати теплоти малі, поступово інтенсивність зменшується, а витрати збільшуються (рис.3.26). Оптимальне значення інтенсивності 36 кг/м^3 год. та середніх питомих витрат теплоти 3675 кДж/ кг знаходиться в точці $К_2$ при вологості 11,8%.

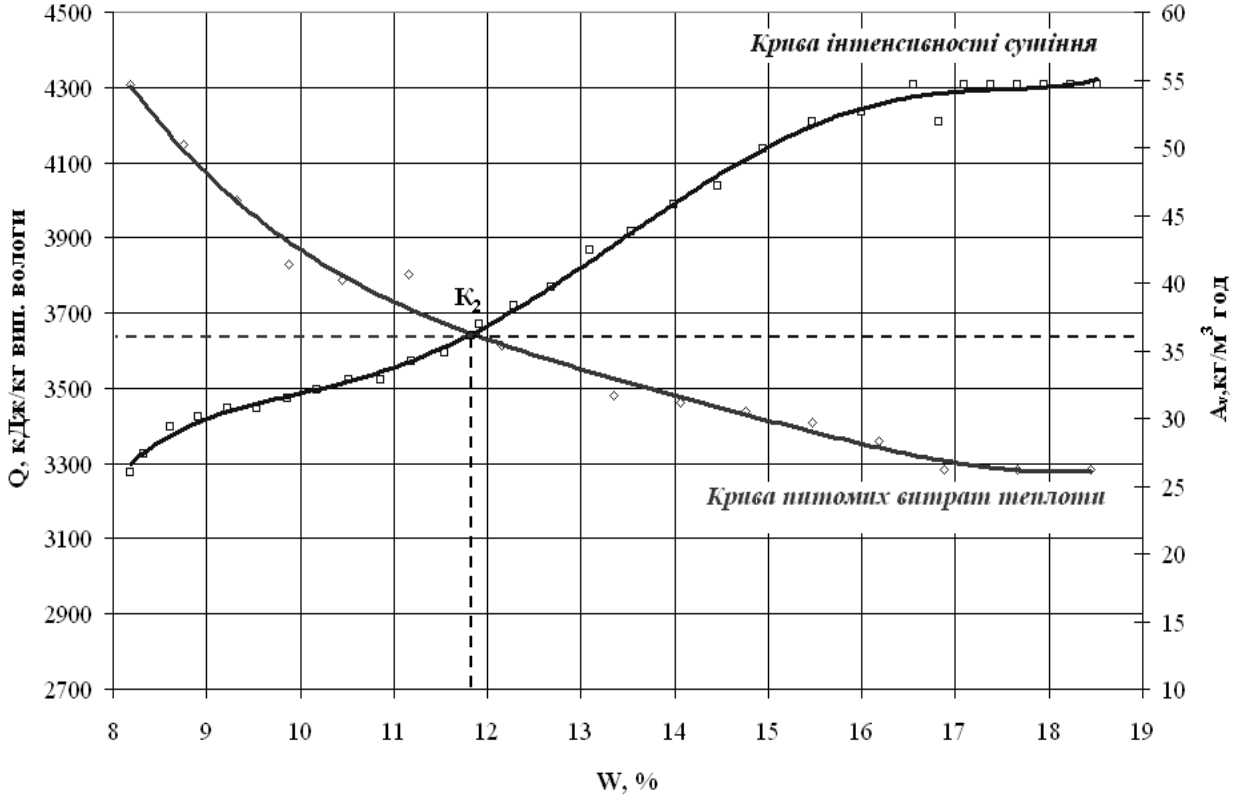


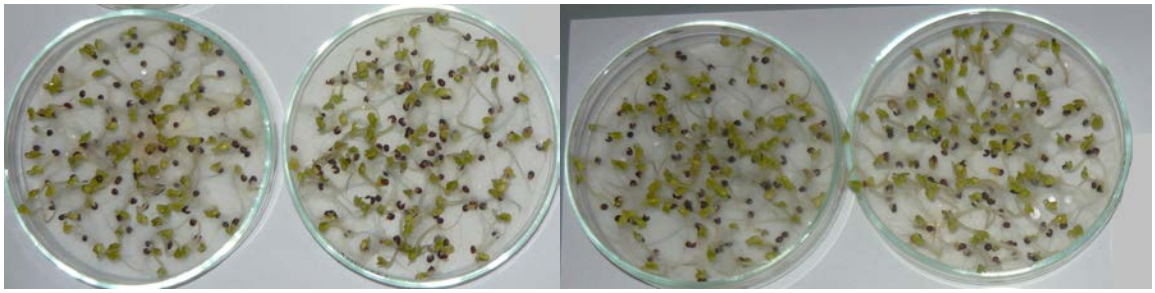
Рис. 3.26. Визначення оптимальної вологості насіння ріпаку в інтенсивному режимі сушіння (t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 6 г/ кг с. п.) при порівнянні інтенсивності та питомих витрат теплоти.

Незалежно від режиму сушіння схожість насіння ріпаку в теплонасосній зерносушарці по відношенню до вихідного ріпаку залишається високою і складає 100 (табл. 3.2). Енергія росту на 2 – 4 день змінюється від вихідної на 1 – 2%.

Таблиця 3.2. Вплив температури теплоносія на якість насіння ріпаку [90]

№	Параметри процесу				Параметри якості		
	Температура теплоносія t, ºС	Швидкість руху V, м/с	Товщина шару δ, мм	Початкова вологість насіння W, %	Енергія росту Е, %		Схожість на 7 день С,%
					2 день	4 день	абс./відн.
	Вихідний ріпак				83	85	89/100
1.	40	1,2	40	19,2	83	85	89/100
2.	50	1,2	40	19,2	82	84	89/100
3.	50	1,5	40	19,2	79	83	89/100
4.	50	1,2	40	32	80	84	89/100

Вплив режимів сушіння на схожість насіння ріпаку після сушіння на теплонасосній зерносушарці на 7 день пророщування, можна оцінити візуально за наведеними фотографіями на рис. 3.27.



Режими: 1 2 3 4

Рис. 3.27. Вплив режимів сушіння в теплонасосній зерносушарці на схожість насіння ріпаку

1 – t = 40ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.
2 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
3 – t = 50ºС, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм, d = 6 г/ кг с. п.;
4 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм, d = 6 г/ кг с. п.

Визначено та експериментально підтверджено залежність коефіцієнту перетворення теплового насосу від вологовмісту теплоносія та режимних параметрів процесу сушіння насіння ріпаку при яких енерговитрати мінімальні.

Досліджена кінетика сушіння в теплонасосній зерносушарці. Розроблені ефективні режим сушіння, при якому схожість насіння ріпаку максимальна, а енерговитрати мінімальні.

РОЗДІЛ 4
ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЛОГОБМІНУ ПРИ СУШІННІ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА

4.1. Дослідження кінетики тепловологообміну при сушінні насіннєвого зерна

Відомо, що характер процесу сушіння, відображений на кривих сушіння, швидкості сушіння та температурних кривих, в основному визначається фізико –хімічними, структурно – механічними властивостями матеріалу, від яких залежить форма зв'язку вологи з ним, дифузійною природою явища, а також методом підведення теплоти, тобто закономірністю взаємодії тіла з навколишнім середовищем. Багатоманітність факторів та їх взаємозв'язок значно ускладнює отримання аналітичних залежностей кінетики сушіння матеріалу. Тому при описанні сушіння використовують емпіричні залежності. Найбільш наближеним методом розрахунку кінетики сушіння, є метод оснований на вивченні загальних закономірностей процесу, що наближує теорію і практику сушіння. До цих методів відносяться методи А. В. Ликова [97], Г. К. Філоненко [98], М.Ф. Докучаєва і М.С. Смирнова[99] та метод В. В. Красникова [100].

З наведених методів розрахунку кінетики тепловологообміну при сушінні ріпаку нами використано метод В. В. Красникова.

Під кінетикою сушіння розуміють зміну середньої вологості та середньої температури матеріалу на протязі часу. Ці залежності дають можливість розрахувати кількість випареної з матеріалу вологи, витрати теплоти на сушіння та тривалість процесу.

Аналіз багатьох експериментальних даних з кінетики сушіння різних матеріалів (зерно, овочі, листові волокнисті матеріали – тканини, папір, картон, азбест) різними методами сушіння (конвективний, кондуктивний, комбінований, інфрачервоними променями, в киплячому шарі), отриманих вітчизняними та закордонними дослідниками [98,101], дозволив встановити наступну закономірність: при сушінні визначеного матеріалу, який має початковий вологість W_n, при будь-якому режимі сушіння зберігається незалежною величина $N\tau$, яка відповідає даній проміжній вологості W.

В математичній формі запису ці законозалежності представлені виразом:

$$N_1\tau_1 = N_2\tau_2 = \ldots = N_n\tau_n = (N\tau)_W = const \qquad (4.1)$$

де: N_1, N_2,…N_n – швидкість сушіння в перший період (при відсутності першого періоду – максимальна швидкість сушіння) при різних режимах;

τ_1, τ_2,... τ_n – проміжний час сушіння, на протязі якого вологість змінюється від початкової вологості W_n до вологості W.

Змінна $N\tau$ є стійким комплексом величин, характерних для процесу сушіння, тому у відповідності з основами теорії подібності і аналізу

розмірностей [102,103] величину $N\tau$ назвали узагальненою змінною або узагальненим часом сушіння.

В частковому випадку для першого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W \tag{4.2}$$

В загальному випадку для другого періоду сушіння:

$$(N\tau)_W = W_n - W + W_x = const \tag{4.3}$$

де: W_x – величина, яка залежить від властивостей матеріалу, визначається з експерименту.

Оперування узагальненим часом сушіння придає дослідженню процесу сушіння узагальнюючий характер. Одне і те ж значення може бути отримано внаслідок великої кількості різних комбінацій N і τ, тобто фіксованому значенню $N\tau$ відповідає не одна визначена сукупність першочергових величин, а велика кількість подібних сукупностей. Відповідно, при дослідженні процесу сушіння з використанням $N\tau$ аналізується не єдиний частковий випадок, а велика кількість різних випадків сушіння, об'єднаною деякою узагальненістю параметрів процесів. Чим більше величина N, тим менше час сушіння τ, необхідний для досягнення заданої вологості W, але згідно (4.1) або (4.3) при всіх можливих N, для цього W, величина $N\tau$ лишається постійною. З наведеного вище витікає, що якщо по вісі абсцис відкладати узагальнюючий час $N\tau$, а по вісі ординат – величину проміжної вологості W, то всі експериментальні криві сушіння матеріалу, отримані при одній початковій вологості W_n, але при різних режимах (сімейство кривих), перенесені в нову систему координат W– $N\tau$, з'єднуються в єдину криву, названу узагальненою кривою кінетики сушіння.

По В.В.Красникову швидкість сушіння в кожній частині другого періоду являє собою лінійну функцію вологості, тобто, дійсна крива швидкості сушіння в другому періоді замінюється ломаною прямою.

Використовуємо для розгляду, так звану відносну швидкість сушіння, яка визначається виразом:

$$N^* = \left|\frac{dW}{d\tau}\right| \div N = \frac{1}{N}\left|\frac{dW}{d\tau}\right| \tag{4.4}$$

Величина відносної швидкості сушіння при даному W, яка знаходиться з узагальненої кривої сушіння W – $N\tau$, чисельно рівна тангенсу кута нахилу кривої точки W до вісі $N\tau$, тобто N^* знаходиться безпосередньо з узагальненої кривої сушіння:

$$N^* = \frac{1}{N}\frac{dW}{d\tau} = tg(W, N\tau) = f(W) \tag{4.5}$$

Величина N^* не залежить від режиму сушіння і для конкретного матеріалу при даному методі сушіння є лише функцією вологості.

Провівши графічне диференціювання всього лише однієї узагальненої кривої кінетики сушіння, можна отримати криву N^*– W, яка носить назву узагальненої кривої швидкості сушіння.

Криві сушіння та швидкості сушіння капілярно-пористих тіл, не дивлячись на різноманіття режимів сушіння, а також відмінність в механізмах перенесення вологи і тепла в широкому діапазоні температур теплоносія мають в основному однаковий характер. На кривих знаходиться два періоди, другий період ділиться на дві або три частини, виявлені критичні точки $W_{к1}$, $W_{к2}$ і $W_{к3}$. Відмінність виявляється лише в кількісному відношенні. Подібна аналогія спостерігається, також, при порівнянні кривих сушіння та швидкості сушіння визначеного матеріалу різними методами сушіння, тобто, відмінність в режимах і методах сушіння не приводить до змін виду кривих сушіння і швидкості сушіння даного матеріалу. При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді, у зв'язку з викладеним, обов’язково повинні враховуватися величини емпіричних коефіцієнтів, обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти, як правило, визначаються безпосередньо, з досліду по сушінню даного матеріалу.

Рівняння кривої сушіння в першому періоді має вигляд:

$$W = W_n - N\tau \qquad (4.6)$$

Другий період сушіння починається при всіх режимах в $Wк_1$ і часу τ, рівного тривалості першого періоду сушіння.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(Wк_1 - Wp) - K_1\tau_1$$

$$Wк_1 \geq W \geq Wк_2 \qquad (4.7)$$

де K_1 – коефіцієнт сушіння 1-ої частини другого періоду;
τ_1 – час, який відраховується від початку 1-ої частини другого періоду.

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(Wк_2 - Wp) - K_2\tau_2$$

$$Wк_2 \geq W \geq Wк_3 \qquad (4.8)$$

де K_2 – коефіцієнт сушіння 2-ої частини другого періоду;
τ_2 – час, який відраховується від початку 2-ї частини другого періоду.

Рівняння для третьої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_3 - Wp) - K_3\tau_3$$

$$W\kappa_3 \geq W \geq W\kappa \qquad (4.9)$$

де K_3 – коефіцієнт сушіння 3-ої частини другого періоду;
τ – час, який відраховується від початку 3-ї частини другого періоду.

Величина W_p являє собою рівноважну вологість матеріалу. Величина $W\kappa$ визначає кінцеву вологість висушуваного матеріалу.

Коефіцієнти K_1, K_2 і K_3 – називають коефіцієнтами сушіння, чисельно рівне тангенсам кутів нахилу відрізків прямих до вісі τ в напівлогарифмічному анаморфозі. Величина цих коефіцієнтів залежить від роду вологого матеріалу, його властивостей, режиму і методу сушіння.

Вплив режиму на коефіцієнти K_1, K_2 і K_3 може бути відображено величиною N – максимальною швидкістю сушіння матеріалу при даному режимі в перший період сушіння (або при відсутністю першого періоду – максимальною швидкістю сушіння при даному W_n). Це можливо тому, що N є узагальненою величиною, в якій відображено вплив всіх параметрів, які впливають на швидкість сушіння даного матеріалу і розповсюджується на весь другий період сушіння.

$$K_1 = \chi_1 N \qquad (4.10)$$

$$K_2 = \chi_2 N \qquad (4.11)$$

$$K_3 = \chi_3 N \qquad (4.12)$$

Значення величин χ_1, χ_2, χ_3 – мають назву відносними коефіцієнтами сушіння, в двох (трьох) частинах другого періоду різні, вони визначаються формою зв’язку вологи з матеріалом, його структурою та методом сушіння, але не залежить від режиму.

Відносні коефіцієнти сушіння легко визначаються з дослідної кривої за наступним виразом:

$$\chi_1 = \frac{\lg W\kappa_1 - \lg W\kappa_2}{N\tau_1} \qquad (4.13)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W\kappa_2 - \lg W\kappa_3}{N\tau_2} \qquad (4.14)$$

$$\chi_3 = \frac{\lg W\kappa_3 - \lg W\kappa}{N\tau_3} \qquad (4.15)$$

Загальна тривалість процесу сушіння $\tau_т$ (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_1, в 1-й τ_2, 2-й τ_3 і 3-й τ_4 частинах другого періоду:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3 + \tau_4 \qquad (4.16)$$

Вирішивши рівняння (5.6) – (5.9) відносно τ і використовуючи співвідношення (5.10), (5.11) і (5.12) отримують вираз для розрахунку тривалості сушіння в кожній частині процесу.

Тривалість сушіння в перший період дорівнює:

$$\tau = \frac{Wn - W\kappa}{N} \qquad (4.17)$$

Тривалість сушіння в 1 – й частині другого періоду:

$$\tau_2 = \frac{1}{\chi_1 N} \lg \frac{W\kappa_1}{W\kappa_2} \qquad (4.18)$$

Тривалість сушіння в 2 – й частині другого періоду:

$$\tau_3 = \frac{1}{\chi_2 N} \lg \frac{W\kappa_2}{W\kappa_3} \qquad (4.19)$$

Тривалість сушіння в 3 – й частині другого періоду:

$$\tau_4 = \frac{1}{\chi_3 N} \lg \frac{W\kappa_3}{W\kappa} \qquad (4.20)$$

Загальна тривалість процесу:

$$\tau_T = \frac{1}{N}(Wn - W\kappa_1 + \frac{1}{\chi_1}\lg\frac{W\kappa_1}{W\kappa_2} + \frac{1}{\chi_2}\lg\frac{W\kappa_2}{W\kappa_3} + \frac{1}{\chi_3}\lg\frac{W\kappa_3}{W\kappa}) \qquad (4.21)$$

При відсутності першого періоду в (4.21) замість N вводять максимальну швидкість сушіння, а $W\kappa_1$ замінюється на $W_п$.

Даний метод розрахунку тривалості сушіння є подальшим розвитком метода А. В. Ликова [102] і має високу точність. В порівнянні з методом А. В. Ликова і Г. К. Філоненко в наведеному методі знаходження вхідних в формулу

величин та розрахунок по ним спростився. Додаток, який знаходиться в формулі (4.21) постійний для конкретного матеріалу при незмінних *Wn* і *Wк* та не залежить від режиму сушіння.

Кінетика теплообміну при сушінні може бути повністю виявлена по даним кінетики вологообміну.

Густина теплового потоку витрачена на випаровування, розраховується за інтенсивністю вологообміну *m(τ)* з виразу:

$$q_{вип} = rm(\tau) = rg\frac{d\overline{W}}{d\tau} \qquad (4.22)$$

При цьому усадку матеріалу не враховуємо.

Густина теплового потоку на підігрівання матеріалу визначаємо співвідношенням:

$$q_{під} = \bar{c}g\frac{d\bar{t}}{d\tau}, \qquad (4.23)$$

де $\bar{c}$ – теплоємність вологого тіла.

У відповідності з законом збереження енергії, питомий потік теплоти на одиницю поверхні тіла дорівнює:

$$q(\tau) = rg\frac{d\overline{W}}{d\tau} + \bar{c}g\frac{d\bar{t}}{d\tau} = gr\frac{d\overline{W}}{d\tau}\left[1 + \frac{\bar{c}}{r}\frac{d\bar{t}}{d\overline{W}}\right] \qquad (4.24)$$

Значення величини $\frac{d\overline{W}}{d\tau}$ визначає зміну середньої температури висушуваного матеріалу на одиницю зміни її середньої вологості за нескінченно малий проміжок часу і носить назву температурний коефіцієнт сушіння:

$$b = \frac{d\bar{t}}{d\overline{W}} \qquad (4.25)$$

Величина *b* є функцією інтегрального вологості $b = f(\overline{W})$.

Загальна змінна $b\frac{\bar{c}}{r}$, як видно з рівняння (4.25) є інтегральною характеристикою кінетики процесу сушіння. Вона визначає відношення кількості теплоти на нагрівання матеріалу при сушінні та на випаровування вологи за нескінченно малий проміжок часу. Цей основний критерій сушіння названий критерієм Ребіндера:

$$Rb = b\frac{\bar{c}}{r} = \frac{\bar{c}}{r}\left(\frac{d\bar{t}}{d\overline{W}}\right) \qquad (4.26)$$

Величина числа Rb залежить від температурного коефіцієнту сушіння, питомої теплоємності вологого матеріалу та питомої теплоти випаровування, а відповідно від форми зв'язку вологи з матеріалом. В період постійної швидкості сушіння $\frac{d\bar{t}}{d\overline{W}} = 0$, тобто число Rb також дорівнює нулю, тоді:

$$q = gr\left(\frac{d\overline{W}}{d\tau}\right) = gr\frac{N}{100} = const \qquad (4.27)$$

Аналіз проведених методів показав, що вони успішно можуть бути застосовані до дослідження кінетики тепловологообміну при сушінні ріпаку.

4.2. Кінетика вологообміну при сушінні насіннєвого зерна

З метою описання кінетики вологообміну при сушінні насіння ріпаку експериментальні дані оброблялись за методикою описаної в п. 4.1.

Рівняння кривої сушіння в першому періоді має вигляд:

$$W = Wn - N\tau\ ,$$

$$Wn \geq W \geq W\kappa_1\ , \qquad (4.28)$$

де W, Wn та $W\kappa_1$ –поточний, початковий та кінцевий вологовміст, %;

N – швидкість сушіння в перший період, %/хв.;

τ – поточний час, хв.

Для побудови кривої сушіння ріпаку в другому періоді визначаємо значення рівноважної вологості матеріалу при температурах сушіння ріпаку t = 40, 50ºС. З табл. 1.17 знаходимо рівноважну вологість матеріалу W_p при вологості атмосферного повітря φ = 60% , яка при температурі t = 40ºС – W_p = 6,1%, а при температурі t = 50ºС – W_p = 5,0%.

Другий період сушіння починається при всіх режимах із $W\kappa_1$ і часу τ_1 , рівного тривалості першого періоду сушіння. Цей час можна прийняти за початок першого періоду сушіння. З рис. 4.1. крива сушіння в другий період побудована в напівлогарифмічних координатах $\lg(W - Wp)$, τ і складається з двох частин.

Рівняння для першої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_1 - Wp) - K_1\tau_1$$

$$W\kappa_1 \geq W \geq W\kappa \qquad (4.29)$$

Рівняння для другої частини другого періоду має вигляд:

$$\lg(W - Wp) = \lg(W\kappa_2 - Wp) - K_2\tau_2$$

$$W\kappa_2 \geq W \geq W\kappa_3 \qquad (4.30)$$

де: K_1, K_2 – коефіцієнти сушіння першої та другої частини другого періоду;

τ_1, τ_2 – час, який відраховується від початку 1-ої і 2-ої частини другого періоду.

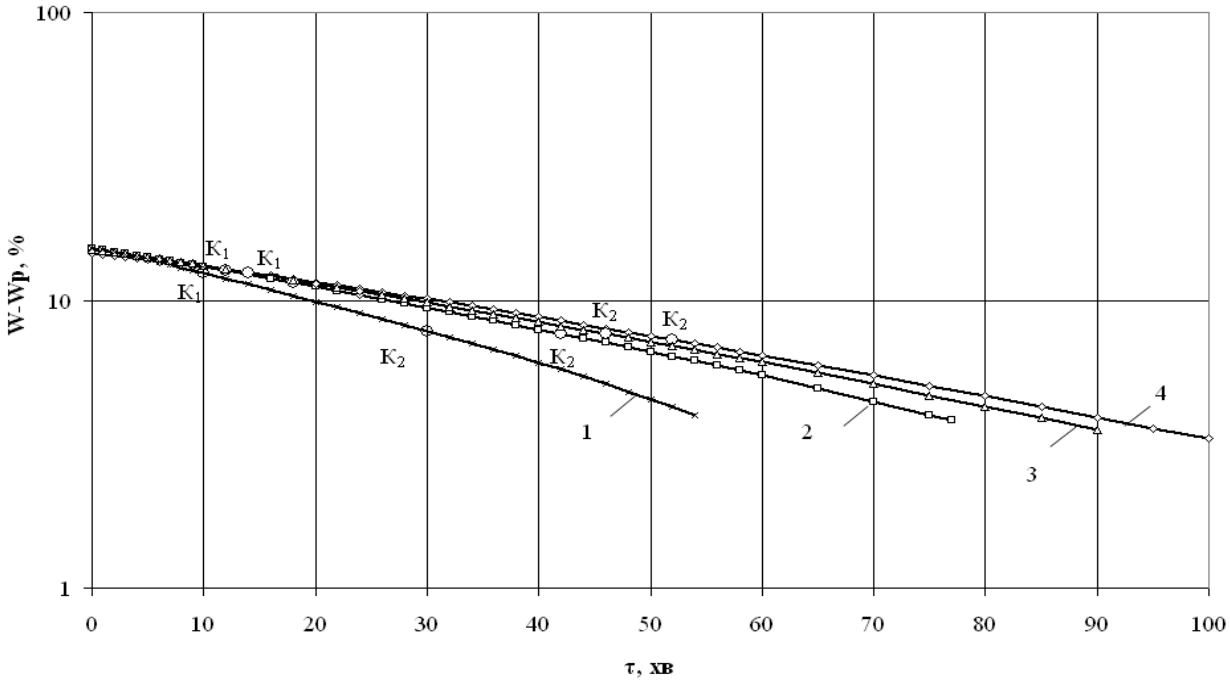


Рис. 4.1. Кінетика процесу сушіння ріпаку при наступних режимах:
1 – t = 50ºC , V = 1,2 м/с δ = 20 мм; 2 – t = 50 ºC, V=1,5 м/с, δ = 40 мм;
3 – t = 50 ºC, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм; 4 – t = 40 ºC, V = 1,2 м/с,δ = 40 мм.

При математичному описанні кінетики вологообміну при сушінні в другому періоді повинні враховуватись величини, вірніше, емпіричні коефіцієнти, які обумовлені властивостями даного матеріалу. Ці коефіцієнти повинні визначатися безпосередньо з досліду по сушінню ріпаку. Відносний коефіцієнт сушіння χ визначається лише формулою зв'язку вологи з матеріалом, його структурою, щільністю і не залежить від режиму обробки.

Величини відносних коефіцієнтів сушіння ріпаку в другому періоді рівні і визначаємо з рис. 4.1 на прикладі режиму 4, які рівні:

$$\chi_1 = \frac{\lg W\kappa_1 - \lg W\kappa_2}{N\tau_1} = \frac{\lg 16{,}58 - \lg 11{,}75}{0{,}15 \cdot 36} \approx 0{,}026 \qquad (4.31)$$

$$\chi_2 = \frac{\lg W\kappa_2 - \lg W\kappa}{N\tau_2} = \frac{\lg 11{,}75 - \lg 8}{0{,}15 \cdot 46} \approx 0{,}025 \qquad (4.32)$$

Коефіцієнти сушіння в другому періоді сушіння рівні:

1. t = 50ºC, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм $K_1 = \chi_1 \cdot N = 0{,}026 \cdot 0{,}28 \approx 0{,}0073 хв^{-1}$
$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0{,}025 \cdot 0{,}28 \approx 0{,}007 хв^{-1}$.

2. t = 50ºC, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм $K_1 = \chi_1 \cdot N = 0{,}026 \cdot 0{,}21 \approx 0{,}0055 хв^{-1}$
$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0{,}025 \cdot 0{,}21 \approx 0{,}0052 хв^{-1}$

3. t = 50ºC, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм $K_1 = \chi_1 \cdot N = 0{,}026 \cdot 0{,}181 \approx 0{,}0047 хв^{-1}$
. $K_2 = \chi_2 \cdot N = 0{,}025 \cdot 0{,}181 \approx 0{,}0045 хв^{-1}$

4. t = 40ºC, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм $K_1 = \chi_1 \cdot N = 0{,}026 \cdot 0{,}15 \approx 0{,}0039 хв^{-1}$
$K_2 = \chi_2 \cdot N = 0{,}025 \cdot 0{,}15 \approx 0{,}0037 хв^{-1}$.

Розрахунок тривалості процесу сушіння за В.В. Красниковим базується на застосуванні рівнянь кінетики, попередньо описуючи процес.

Рівняння кінетики сушіння насіння ріпаку для двох частин другого періоду записується у вигляді:

$$W = Wk_1 \exp(-2{,}3\chi_1 N\tau_1) \qquad (4.33)$$

$$W = Wk_2 \exp(-2{,}3\chi_2 N\tau_2) \qquad (4.34)$$

Загальна тривалість процесу сушіння $\tau_т$ (без врахування періоду прогріву) складається з тривалості сушіння в першому періоді τ_1, та в другому періоді τ_2:

$$\tau_T = \tau_1 + \tau_2 + \tau_3$$

Загальна тривалість процесу:

$$\tau_T = \frac{1}{N}(Wn - W\kappa_1 + \frac{1}{\chi_1}\lg\frac{W\kappa_1}{W\kappa_2} + \frac{1}{\chi_2}\lg\frac{W\kappa_2}{W\kappa}) \qquad (4.35)$$

Узагальнена крива кінетики сушіння насіння ріпаку при різних режимах розрахована за методом В. В. Красникова представлена в координатах W – ($N_{мах}$ τ) на рис. 4.2. Суміщення кривих сушіння в одну криву підтверджує,

що рівняння (5.29, 5.30) правильно описує процес і що коефіцієнт χ_1, χ_2 не залежить від режиму сушіння.

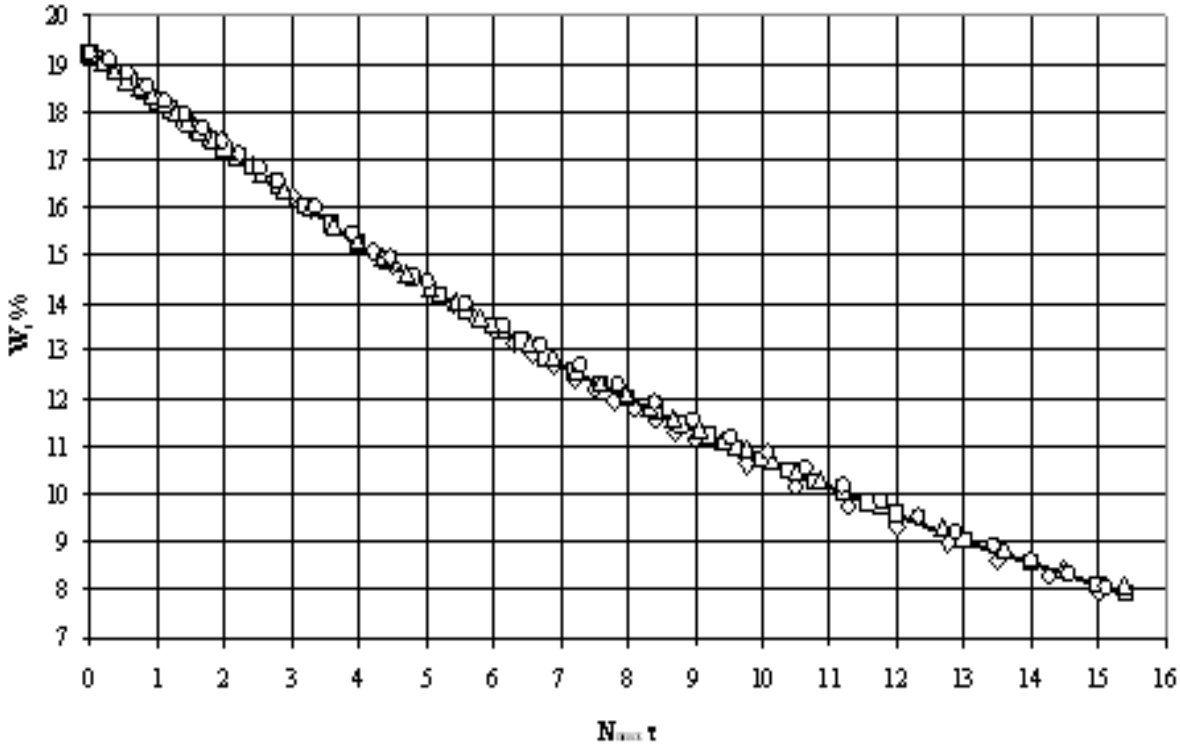


Рис. 4.2. Узагальнена крива кінетики сушіння насіннєвого ріпаку в координатах W – ($N_{мах}$ τ)
○– t = 50ºC, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм; □– t = 50ºC, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм;
△ – t=50ºC, V=1,2 м/с, δ = 40 мм; ◇ – t=40ºC, V=1,2 м/с, δ = 40 мм.

Середнє арифметичне відхилення результатів за методом В. В. Красникова становить Δ = 3,2%, середня квадратична похибка $S_c = 0{,}52$, похибка теоретичних розрахунків від експериментальних даних відрізняється на ν = 2,65%.

В. А. Данилов [104] розробив інший метод узагальнення кривих сушіння. Він показує, що існує пропорційність між швидкістю сушіння в перший період N при будь-якому режимі і оберненою величиною тривалості процесу $\tau_т$ від початкового вологовмісту *Wп* до кінцевого *Wк*, причому ця пропорційність зберігається при всіх режимах.

$$N \approx \frac{1}{\tau_T} \tag{4.36}$$

Підставляємо рівняння (4.31) в рівняння (4.1) отримаємо:

$$\frac{\tau}{\tau_{T1}} = \frac{\tau}{\tau_{T2}} = ... = \left(\frac{\tau}{\tau_T}\right) = const \qquad (4.37)$$

Це означає, що для даного проміжного вологовмісту W при незмінних *Wп* та *Wк* величина $\frac{\tau}{\tau_T}$ зберігається постійною незалежно від режиму сушіння.

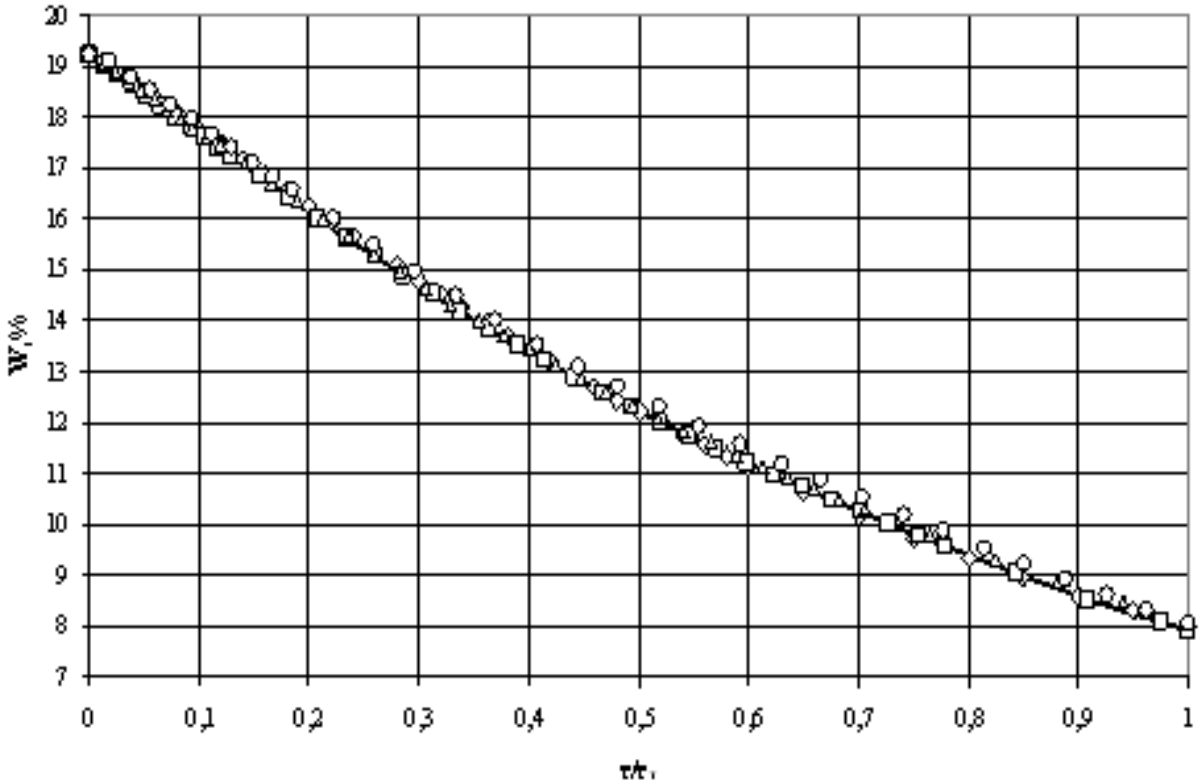


Рис. 4.3. Узагальнена крива кінетики сушіння насіннєвого ріпаку в координатах $W - (\tau/\tau_т)$
○ – t = 50ºC, V = 1,2 м/с, δ = 20 мм; □– t = 50ºC, V = 1,5 м/с, δ = 40 мм;
△ – t = 50ºC, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм; ◇ – t = 40ºC, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм.

На рис. 4.3. зображена крива сушіння насіння ріпаку (сімейство кривих показані на рис. 3.9, 3.11, 3.13), яка перенесена в систему координат $W - (\tau/\tau_т)$ та трансформувалась в єдину узагальнену криву сушіння.

Узагальнені криві кінетики сушіння насіннєвого ріпаку за методом Красникова В.В. та Данилова В.А. гарно співпадають з різними режимами сушіння (рис. 4.3). Узагальнена крива сушіння може бути побудована по одній дослідній кривій сушіння насіння ріпаку, отриманій при любому режимі сушіння, що значно спрощує проведення дослідження кінетики сушіння.

Проводячи графічне диференціювання узагальненої кривої кінетики сушіння, представлена на рис. 4.2 отримали узагальнену криву швидкості сушіння насіння ріпаку, яка представлена плавною зігнутою лінією (рис. 4.4).

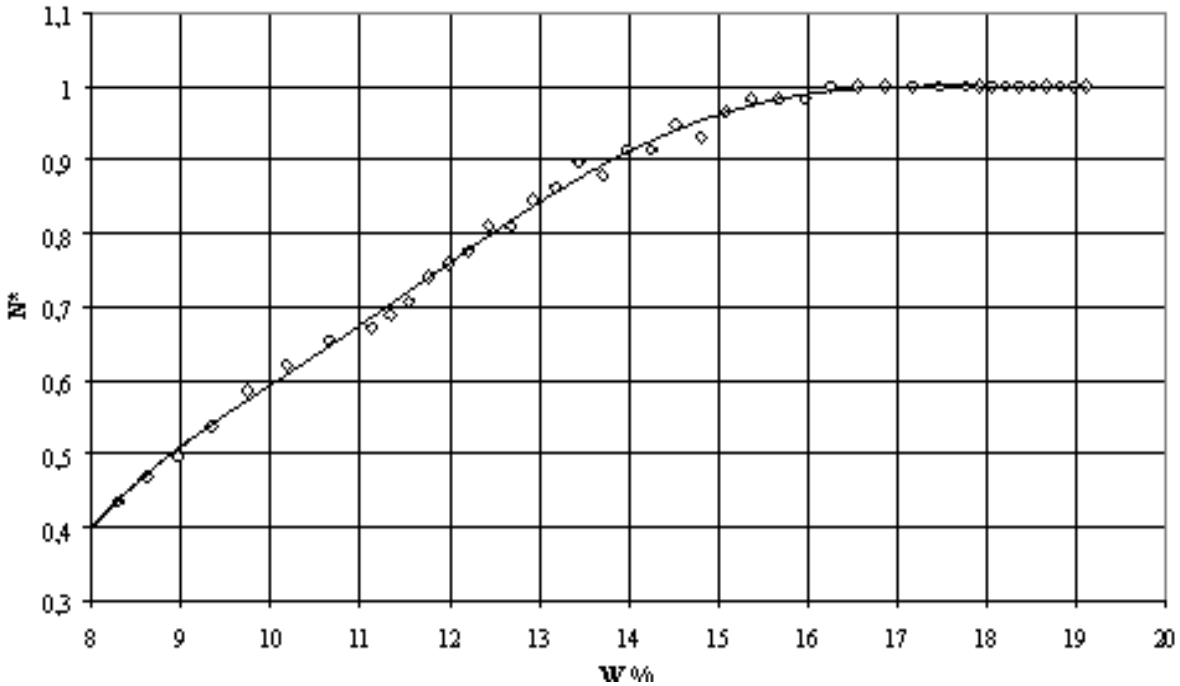


Рис. 4.4. Узагальнена крива швидкості сушіння насіннєвого ріпаку

Для математичного опису процесу швидкості сушіння насіння ріпаку криву кінетики сушіння необхідно у вигляді ломаної лінії. З цією метою її побудували в напівлогарифмічних координатах (рис. 4.5).

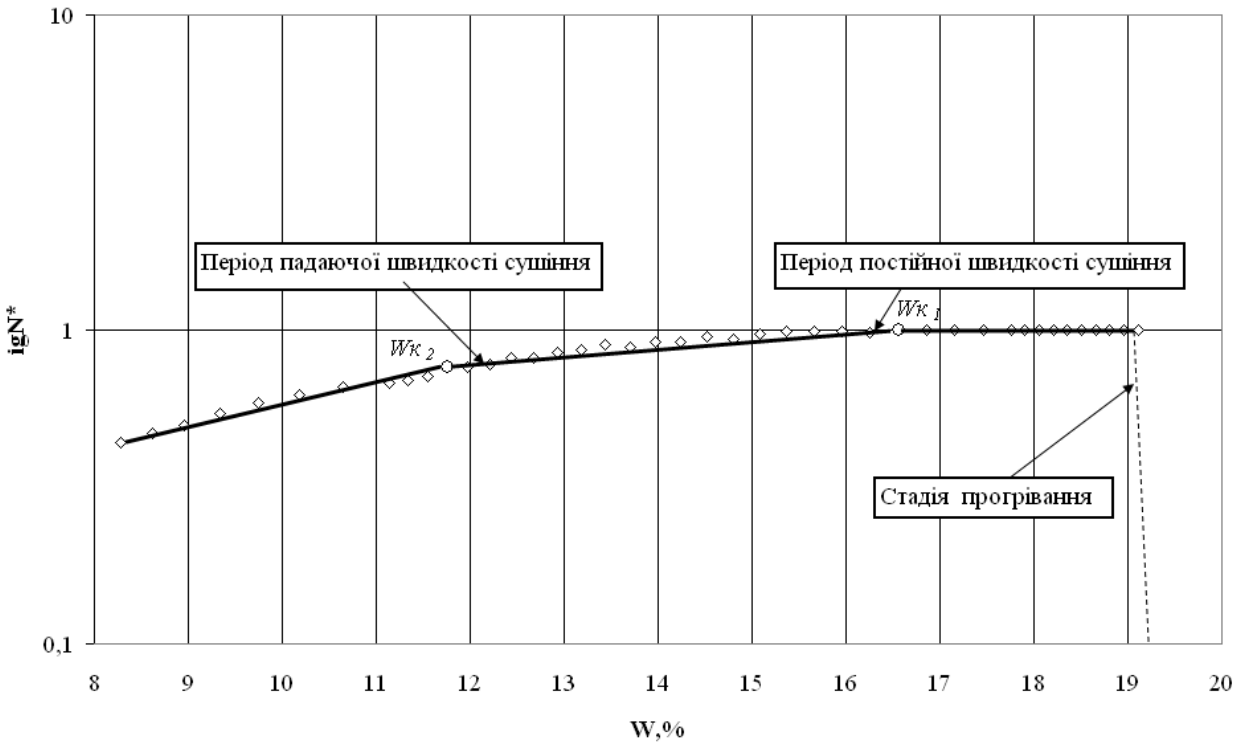


Рис. 4.5. Узагальнена крива швидкості сушіння насіння ріпаку в напівлогарифмічних координатах.

З узагальненої кривої швидкості сушіння насіння ріпаку, побудованою в напівлогарифмічних координатах видно, що вона представляє собою ломану лінію, злам яких відбувається при вологовмісту $Wк_1$= 16,6% та вологості $Wк_2$= 11,8%. Закон зміни N^* при переході постійної швидкості сушіння на 1 та 2 періоди падаючої швидкості сушіння змінюється, що вказує на відмінність в кінетики сушіння в різних частинах другого періоду.

Величина N* не враховуючи стадію прогрівання в періоді постійної швидкості сушіння має лінійну залежність:

$$N^* = 1,$$

$$16{,}6 \le W \le 19{,}2 \qquad (4.38)$$

в 1-й частині другого періоду визначається наступною емпіричною залежністю:

$$N^* = 0{,}2713e^{0{,}0852}W,$$

$$11{,}8 \le W \le 16{,}6 \qquad (4.39)$$

в другій частині другого періоду рівна:

$$N^* = 0{,}0927e^{0{,}1867}W,$$

$$8{,}0 \le W \le 11{,}8 \qquad (4.40)$$

Швидкість сушіння в любий момент другого періоду можна визначити за величиною N_{max} в перший період для любого режиму сушіння та величини N^* для даного вологовмісту (або часу сушіння) по формулі:

$$\left(\frac{dW}{d\tau}\right) = \mathrm{N}^* \cdot \mathrm{N}_{\max}, \qquad (4.41)$$

Метод узагальнення кривих кінетики та швидкості сушіння дозволяє визначити кількісну оцінку протікання процесу сушки при зміні режиму, що дає можливість значно скоротити кількість експериментів.

Отримана вологість $Wк_1$ та $Wк_2$ для двох частин другого періоду (рис. 4.1) та вирахувані при цьому величини відносних коефіцієнтів сушіння (4.31) – (4.32) дозволили розрахувати тривалість процесу сушіння насіння ріпаку при різних значеннях температури, швидкості теплоносія та товщини шару.

На рис. 4.6 приведено співставлення дослідної $\tau_{дос}$ і розрахункової $\tau_{роз}$ тривалості сушіння насіння ріпаку. Величина $\tau_{роз}$ вираховується за формулою

(4.35). Середнє арифметичне відхилення 0,3%, середня квадратична похибка 1,1% та похибка дослідної від розрахункової 1,98%.

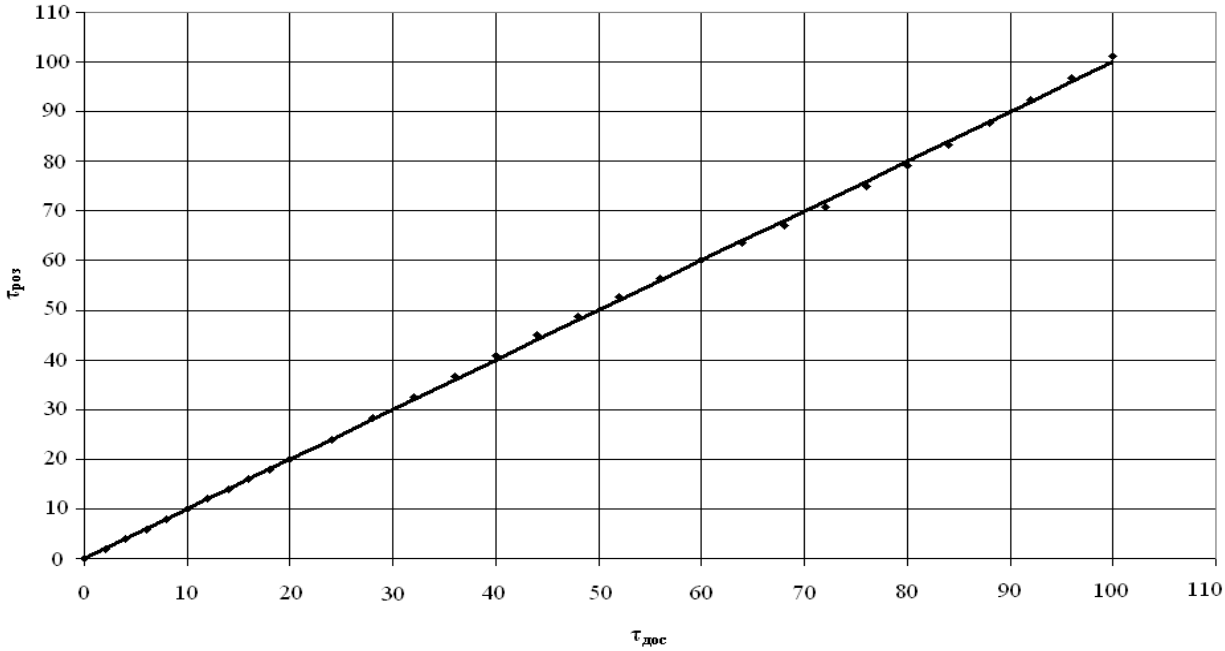


Рис. 4.6. Співставлення дослідної та розрахункової тривалості сушіння насіння ріпаку в теплонасосній зерносушарці

Тривалість процесу сушіння насіння ріпаку визначається з узагальненої кривої сушіння. Для цього, знайдемо з узагальненою кривої сушіння (рис. 4.2) по заданій величині W величину $N\tau$ і поділивши його на максимальну швидкість сушіння, яка відповідає необхідному режиму сушіння, знаходимо час сушіння:

$$\tau = \frac{\mathrm{N}\tau}{\mathrm{N}} = \frac{15{,}1}{N}. \qquad (4.42)$$

Використовуючи узагальнену криву кінетики сушіння насіння ріпаку в координатах $W - \tau / \tau_T$ (рис. 5.3) потрібно знайти тільки одне значення W і відповідний час τ. Тоді з узагальненої кривої сушіння для цього W знаходиться відношення $(\tau / \tau_T)_W$, з якого визначається τ_{T} за формулою:

$$\tau_{\mathrm{T}} = \frac{\tau}{(\tau / \tau_T)_W} \qquad (4.43)$$

Розрахунок тривалості сушіння насіння ріпаку за допомогою узагальнених кривих сушіння (рис. 4.2 і 4.3), показав гарне співпадання результатів, отриманих розрахунковим і експериментальним шляхом.

Дослідження кінетики сушіння насіння ріпаку дозволило математично описати криві сушіння та визначити їх кількісні характеристики. За основними параметрами процесу з узагальненої кривої кінетики сушіння знаходиться його

тривалість, а із узагальненої кривої швидкості сушіння – величину швидкості сушіння в любий момент процесу. Знаючи $\tau_{\text{Т}}$ і $\frac{dW}{d\tau}$, можна намітити такий режим сушіння, при якому тривалість сушіння і витрати енергії будуть мінімальними, а якість насіння – високим.

4.3. Кінетика теплообміну при сушінні насіннєвого зерна

В процесі сушіння насіння ріпаку відбувається взаємозв'язок процесу тепломасообміну між матеріалом і теплоносієм. Зовнішні процеси характеризуються зовнішнім масообміном – випаровуванням вологи і зовнішнім теплообміном між підігрітим повітрям та поверхнею матеріалу.

При випаровуванні вологи з поверхні насіння руйнується рівновага між її поверхнею та внутрішніми шарами, центральні шари більш насичені вологою і мають меншу температуру, чим поверхня, що приводить до внутрішнього тепломасообміну.

Визначення залежностей $b = f(\overline{W})$ та $Rb = f(\overline{W})$ є необхідним для розрахунку основних характеристик кінетики теплообміну при сушінні (температури матеріалу та інтенсивність теплообміну).

Як відомо, явище тепло – та вологоперенесення в середині матеріалу в процесі сушіння взаємопов'язані та взаємообумовлені. Взагалі зв'язок між цими явищами виражають у вигляді залежностей між температурою і вологовмістом або у вигляді співвідношення між витратою теплоти на підігрівання матеріалу і витратою теплоти на випаровування вологи з нього за нескінченно малий проміжок часу в процесі сушіння (число Ребіндера). Цей комплекс за фізичним змістом є визначальним.

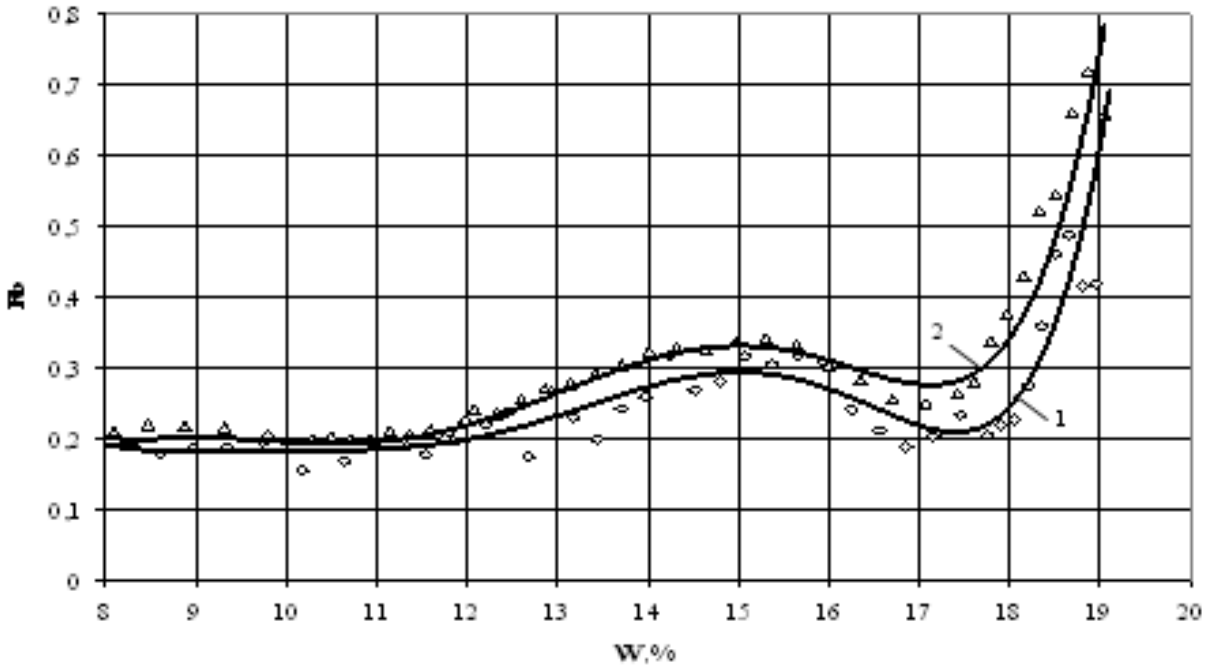


Рис. 4.7. Вплив числа Ребіндера в залежності від вологості насіння
1 – t = 40ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм; 2 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм;

На рис. 4.7 зображені залежність числа Ребіндера від вологості W при сушінні насіннєвого ріпаку при різних температурах теплоносія. Описуючи процес сушіння за критерієм Ребіндера, спостерігаємо прогрівання та випаровуванням вологи на поверхні матеріалу з наступним прогріванням та проникненням тепла у внутрішні шари зерна. Зі збільшенням температури сушіння насіннєвого матеріалу число Ребіндера збільшується, тобто підвищується інтенсивність процесу.

Характер зміни величини Rb від вологості матеріалу W аналогічний зміні температурного коефіцієнта сушіння b. З зміною вологості матеріалу величина Rb зменшується, тобто теплота сушильної установки більше витрачається на випаровування вологи з матеріалу, чим на його нагрівання.

Отримані дослідні залежності $Rb = f(W)$ разом з рівнянням (4.24) дозволили визначити густину теплового потоку $q(W)$, підведеного до матеріалу в процесі конвективного сушіння. На рис. 4.8 приведені залежності зміни густини теплового потоку від вологості насіння ріпаку при різних режимах сушіння. Так, зі збільшенням температури теплоносія величина теплового потоку теплоти, підведеного до матеріалу, збільшується. Характер кривих на всіх режимах аналогічний і говорить про те, що зі зменшенням вологості матеріалу густина теплового потоку теплоти безперервно зменшується.

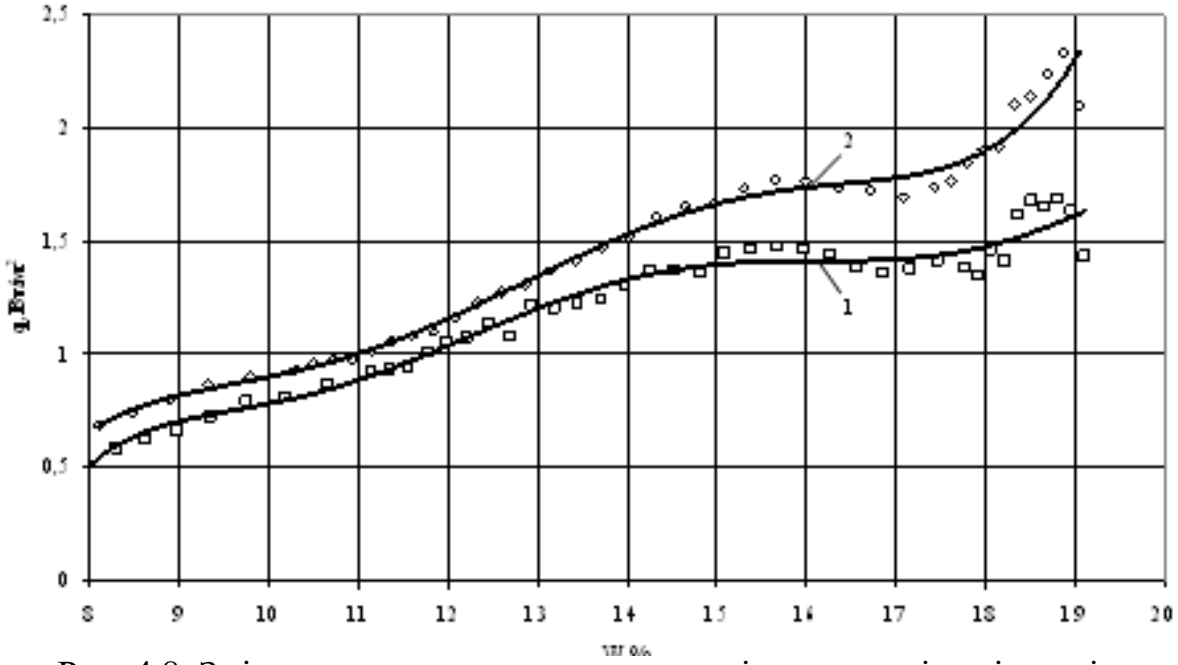


Рис. 4.8. Зміна густини теплового потоку від вологості насіння ріпаку
1 – t = 40ºС, V = 1,2 м/с, δ = 40 мм; 2 – t = 50ºС, V = 1,2 м/с; δ = 40 мм.

Досліджена кінетика сушіння насіння ріпаку розрахована за методом Красникова В.В., дозволила визначити дві критичні точки в другому періоді сушіння, побудувати узагальнені криві кінетики та швидкості сушіння. Розраховані коефіцієнти сушіння в залежності від режиму сушіння в теплонасосній зерносушарці.

РОЗДІЛ 5
СТВОРЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ДЛЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА

5.1. Теплові насоси як напрямок підвищення енергоефективності зерносушарок

Занадто великі енергетичні витрати на процес сушіння насіннєвого зерна стало передумовою до розроблення заходів з підвищення їх ефективності через розробку енергозберігаючого обладнання [53,105 – 120].

Зменшення витрат на сушку насіннєвого зерна можливо через заходи направлені на рециркуляцію та утилізацію відпрацьованого теплоносія, створення нових енергоефективних технологій низкопотенційної сушки насіння та використання альтернативних джерел енергії та палива (рис. 5.1).

Рис. 5.1. Основні напрямки енергозбереження в процесах сушіння зерна

Рециркуляція теплоносія. В зерносушарках шахтного і колонкового типу використовуються дві основні схеми рециркуляції теплоносія [53].

В схемі на рис. 5.2,а теплоносій – повітря, нагрітий в топці подається в дві зони сушильної камери: верхню I і нижню II. А в схемі 5.2,б зовнішнє повітря, підігріте в топці Т, подається в нижню зону, при цьому підігрівають в топці Т′ до режимної температури. Можливо повторне використання теплоносія в декількох зонах. В залежності від частини рециркуляційного повітря в топку Т (схема 5.2,а) або в топку Т′ (схема 5.2,б)) подається визначена кількість зовнішнього повітря.

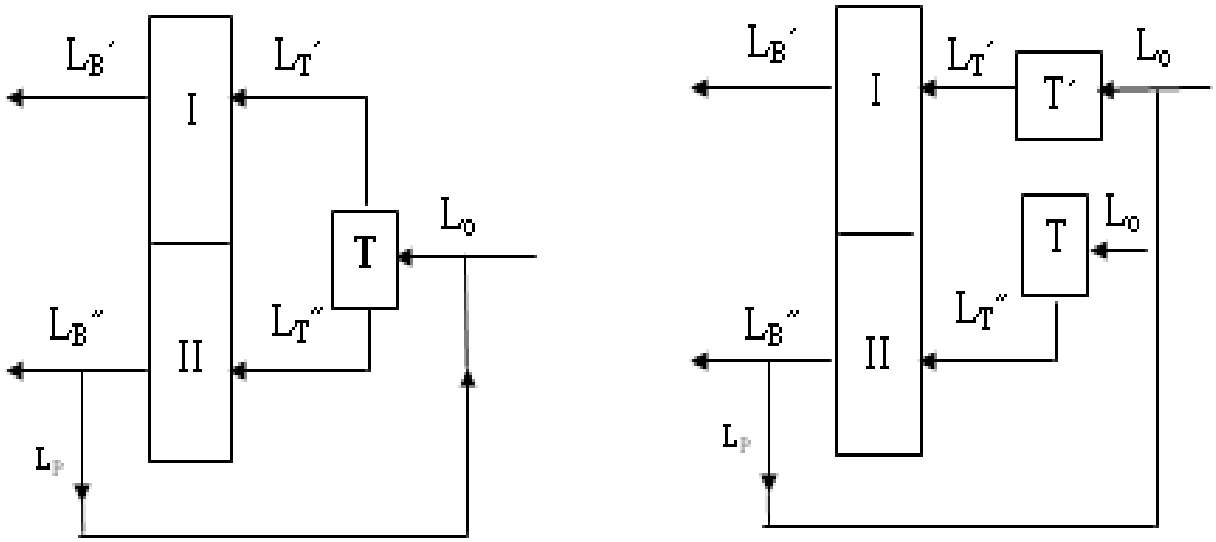


Рис. 5.2. Схема рециркуляції теплоносія в шахтних та колонкових зерносушарках

L_T', L_T'' – витрати нагрітого повітря в I та II зоні;

L_B', L_B'' – вихід відпрацьованого повітря з зон сушарки;

L_0, L_P – кількість зовнішнього повітря та рециркуляційного.

На швидкість та енергоємність процесу сушіння в схемі рециркуляції теплоносія впливають два протилежні фактори: при збільшенні рециркуляційного теплоносія зменшується витрати палива, а з іншого боку – підвищується ступінь зволоження теплоносія, що впливає на швидкість сушіння.

Утилізація теплоти відпрацьованого теплоносія. Відомі способи утилізації теплоти: за допомогою встановлення теплообмінника або теплового насосу в схемі рециркуляції відпрацьованого теплоносія.

Підвищення енергоефективності сушіння зерна при утилізації теплоти відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках з шахтної прямоточної зерносушарки представлено на рис. 5.3 [110,111,112].

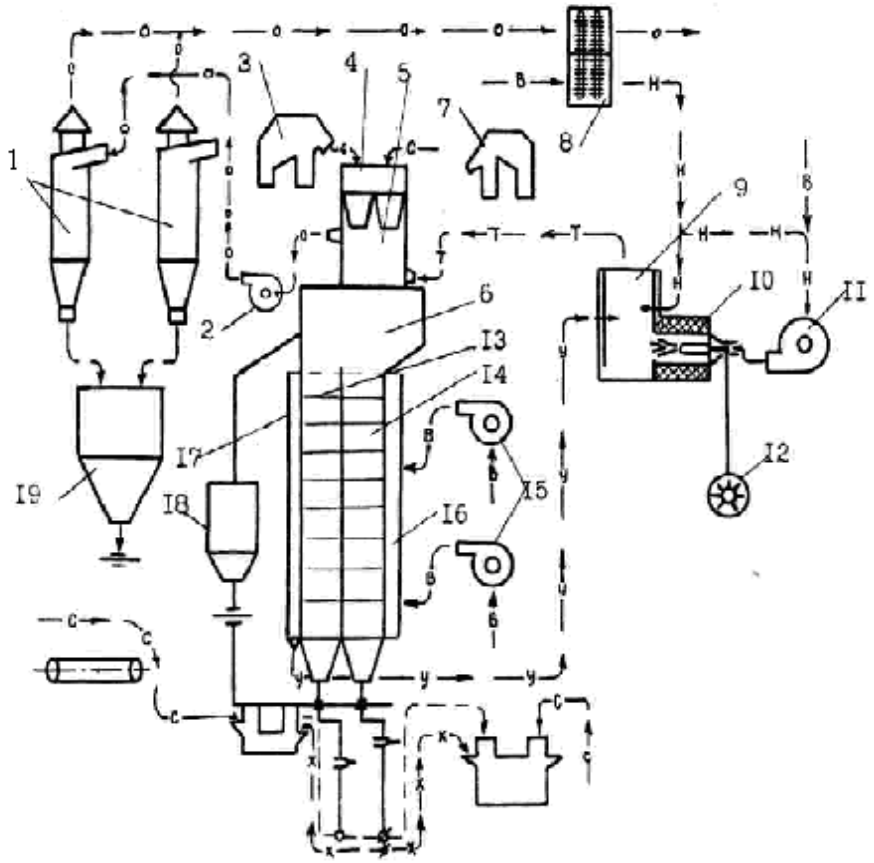


Рис. 5.3. Технологічна схема утилізації теплоти в теплообмінниках:
1 – циклон; 2,11,15 – вентилятори; 3,7 – норії; 4 – бункер; 5 – камери нагріву; 6 – тепловологообмінник; 8 – утилізатор тепла на теплових трубах; 9 – топка; 10 – форсунка; 12 – насос; 13 – шахта часткового охолодження; 16 – напірна камера; 17 – усадочна камера; 18 – зливний бункер; 19 – бункер для відходів.
т – теплоносій; **о** – відпрацьований теплоносій з зони нагрівання; **у** – відпрацьований теплоносій з зони охолодження; **н** – нагріте повітря в утилізаторі; **в** – зовнішнє повітря; **с** – сире зерно; **х** – сухе зерно.

В даній схемі передбачено підігрівання в топці 9 відпрацьованого теплоносія та введення в схему рециркуляції свіжого зовнішнього повітря. При температурі відпрацьованого теплоносія на виході з зони нагрівання t = 120ºС, теплообмінник 8 дозволяє нагріти зовнішнє повітря до температури 80...90ºС перед надходженням його в топку 9.

Теплообмінники повинні бути корозійностійкими, надійно очищуватись від пилу та легких домішок. Вони дозволяють економити 10 – 15% палива на процес сушіння, але необхідні витрати на придбання теплообмінної апаратури.

Комплексна схема утилізації відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках, економайзері та тепловому насосі представлена на рис. 5.4 [113].

Після конвективної сушарки 1 відпрацьований теплоносій надходить в трубчатий теплообмінник 2, де відбувається відбирання високотемпературної теплоти з подальшим змішуванням її в конденсаторі теплового насосу 6. В економайзері 3 відбувається остаточний відбір низькотемпературної теплоти і

через контур циркуляції підігрітої води 19,20,21 подачу його на випарник теплового насосу 5.

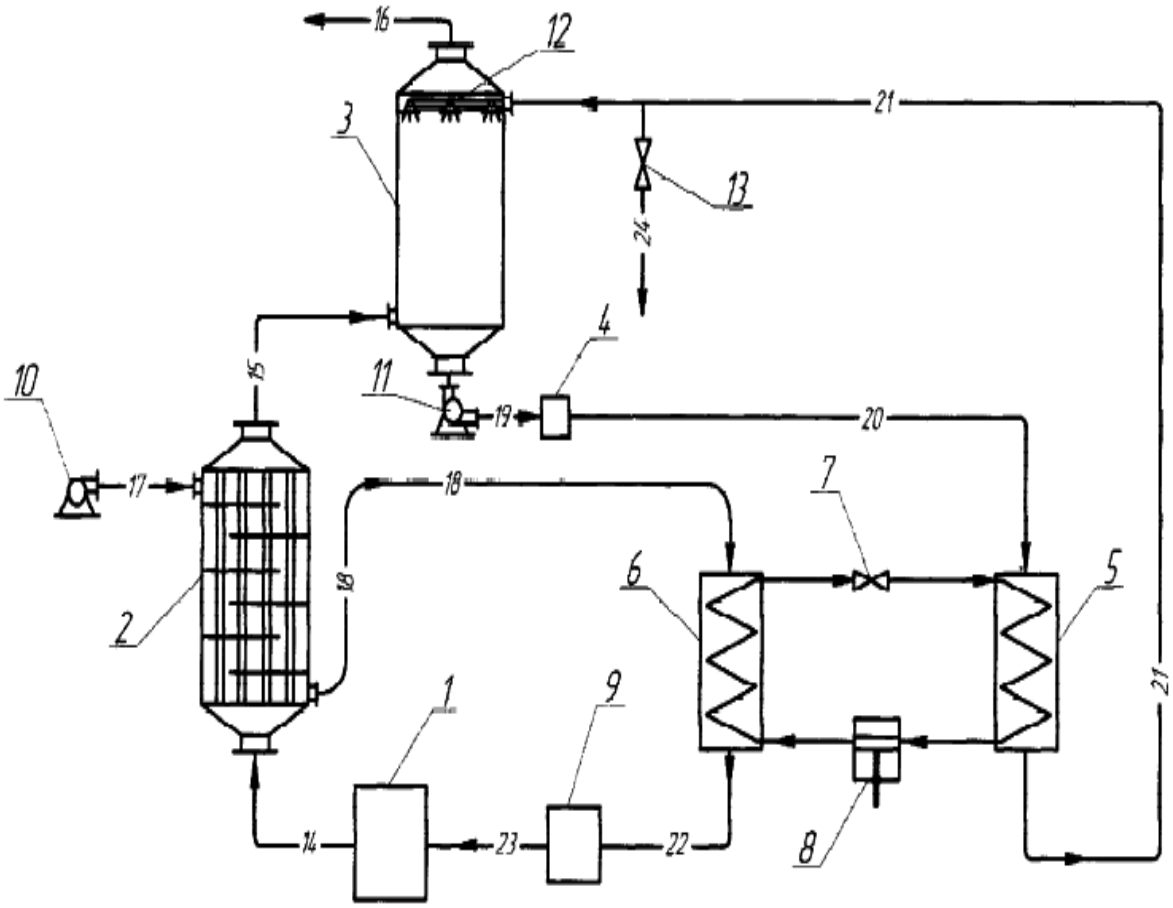


Рис. 5.4. Комплексна схема утилізації відпрацьованого теплоносія в теплообмінниках, економайзері та тепловому насосі:

1 – конвективна сушарка; 2 – трубчатий теплообмінник; 3 – контактний економайзер; 4 – пристрій для очищення теплоносія; 5 – випарник; 6 – конденсатор; 7 – дросель; 8 – компресор; 9 – калорифер; 10 – вентилятор; 11 – насос; 12 – розпилювальний пристрій; 13 – вентиль; 14,15,16,18,22,23 – повітропровід; 19,20,21,24 – трубопровід.

Тепловий насос в схемі працює як охолоджувач, так і нагрівач. При охолодженні випарник 5 відбирає тепло від підігрітої води і охолоджує воду через контур циркуляції 21, подає його в економайзер для охолодження і відбирання теплоти від відпрацьованого теплоносія з теплообмінника 2.

З другого боку тепловий насос з випарника 5 відібране тепло через компресор 8 надходить на конденсатор 6, де робоча речовина конденсуючись виділяє тепло. Змішаний тепловий потік з теплообмінника 3 та конденсатора 6 надходить на паровий калорифер 9, де він підігрівається до необхідної температури перед надходженням в сушарку 1.

Автоматизація процесу сушіння зерна в теплових насосах забезпечує високу продуктивність зерносушарок і зберігання якісних показників зерна.

Завдяки автоматизації підвищується надійність їх роботи, зменшуються витрати палива, електроенергії, чисельність обслуговуючого персоналу.

В розробці систем автоматичного регулювання процесу сушки зерна можна відмітити три етапи [33]:

- створення приборів і систем автоматичного регулювання агенту сушіння (як правило, це системи стабілізації температури агенту по зонам);
- створення приборів і систем автоматичного регулювання параметрів висушеного матеріалу: температури, вологості та рівня зерна;
- дослідження і створення систем комплексної автоматизації процесу сушіння з тепловими насосами.

Система автоматизації шахтної зерносушарки на основі теплових насосів (рис. 5.5) передбачає автоматичне регулювання роботи зерносушарки таким чином [116]:

- за алгоритмом керування за інформацією датчиків про поточні значення витрат, температури та вологості продукту, після його попереднього підігрівання в камері підігріву, мікропроцесор по закладеному в ньому алгоритму встановлюють заданий режим сушіння по трьом зонам сушіння.
- за поточними значенням температур продукту в I і III зонах сушарки, мікропроцесор встановлює температуру теплоносія на лінії 1.4 шляхом впливу на потужність приводу компресорів, двоступеневої теплонасосної установки.
- за поточним значенням температури продукту у II зоні сушіння, вимірюваної датчиком, мікропроцесор встановлює задану витрату теплоносія, який надходить в I і III зони сушіння, за допомогою виконавчого механізму, який працює синхронно. При цьому температура, яка подається в I зону, нижче за температуру теплоносія при подачі в III зону сушіння.
- у відповідності з технологічними умовами проведення процесу і технічними можливостями випарників і теплонасосної установки, за поточними значенням витрати і вологовмісту відпрацьованого теплоносія, мікропроцесор визначає максимально можливий потік вологи з відпрацьованим теплоносієм при подачі в випарники. При цьому кількість надлишкової вологи з відпрацьованим сушильним агентом виводиться за лінією викиду відпрацьованого теплоносія 1.1. з одночасною подачею свіжим за лінією 1.0, зберігаючи при цьому необхідну кількість теплоносія в лінії рециркуляції продукту 1.2.

В процесі сушіння мікропроцесор безперервно проводить слідкування за вологістю висушеного продукту і при відхиленні поточного значення вологості висушеного продукту і при відхилені проміжного значення вологості висушеного продукту від заданого в бік збільшення або зменшення змінює час перебування зерна в сушарці дією на потужність регульованого приводу пристрою для вивантаження висушеного продукту 2.

Якщо зміна часу перебування зерна в зерносушарці в межах заданого значення не забезпечує стабілізації вологості висушеного продукту, то мікропроцесор збільшує або зменшує витрату вологого продукту на лінії 3.0 за допомогою виконавчого механізму.

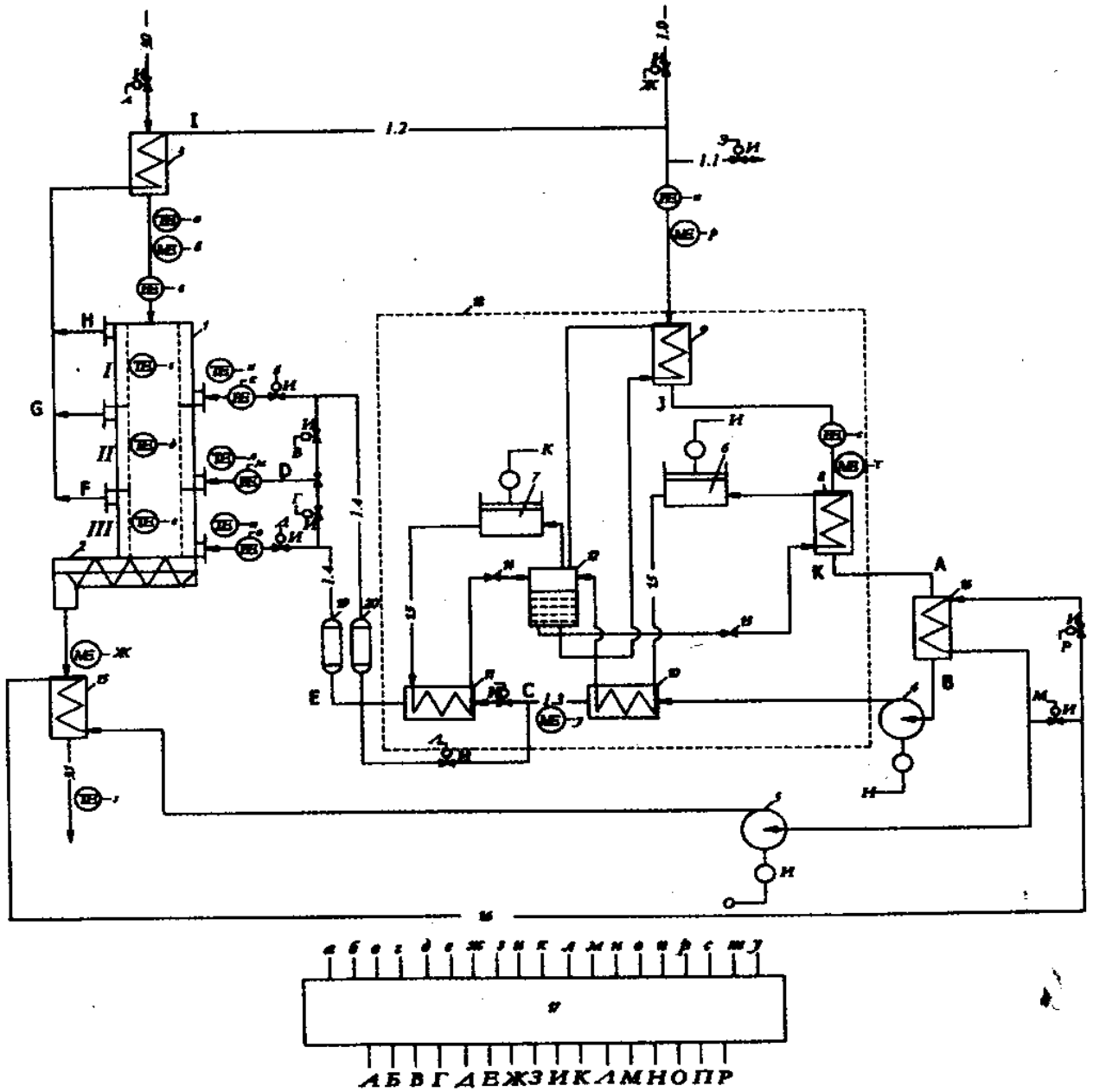


Рис. 5.5. Схема керування двоступеневої теплонасосної сушильної установки:
I, II, III – 1-а, 2–а, 3–а зони сушіння відповідно; 1 – сушарка; 2 – пристрій для вивантаження висушеного продукту; 3 – камера підігрівання; 4, 5 – вентилятори; 6,7 – компресори 1-ого і 2–ого ступеню теплонасосної установки; 8,9 – випарник 1-ого та 2-ого ступеню теплонасосної установки; 10,11 – конденсатор 1-ого та 2-ого ступеню теплонасосної установки; 12 – проміжна ємність; 13, 14 – регулюючі вентилі; 15 – теплообмінник; 16 – теплообмінник – рекуператор; 17 – мікропроцесор; 18 – двоступенева теплонасосна установка; 19, 20 – ресивер.
1.0 – додавання до відпрацьованого теплоносія свіжого; 1.1 – викид відпрацьованого теплоносія; 1.2 – рециркуляція теплоносія; 1.3 – подача зневодненого теплоносія в конденсатор 2-го ступеню; 1.4 – подача теплоносія в зони сушіння; 1.5 – рециркуляція холодоагенту в 1-ій та 2-ій ступенях; 1.6 – рециркуляція охолоджуючого повітря; 3.0 – подача вологого продукту в сушарку; 3.1 – відвід висушеного продукту.

Процес сушіння зерна в III зонній шахтній зерносушарці з двоступеневим тепловим насосом показаний на I-d діаграмі (рис. 5.6)

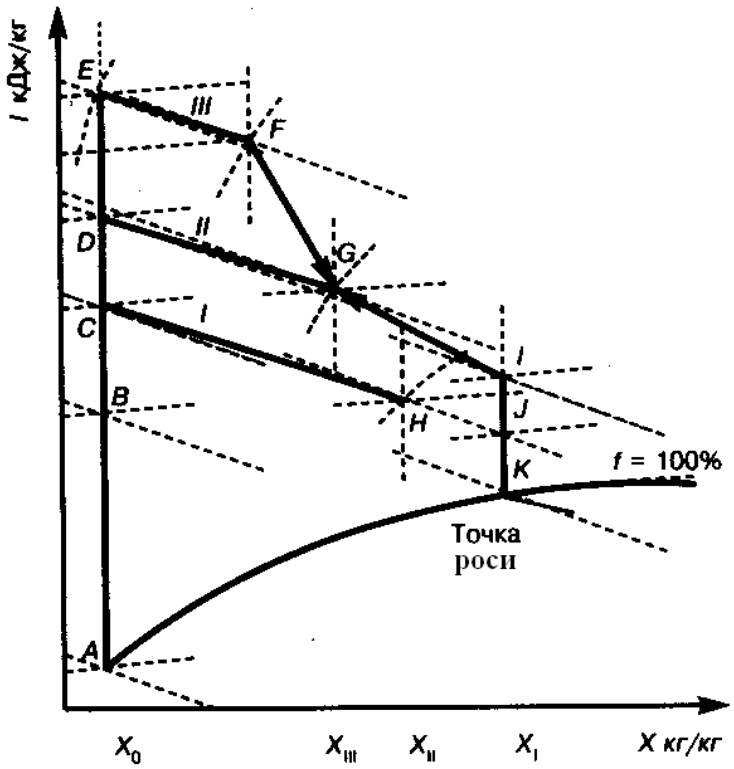


Рис. 5.6. Процес сушіння зерна двоступеневій теплонасосній сушильній установці в I-d діаграмі:

AB – нагрів сушильного агенту в теплообміннику 15; BC – підігрів теплоносія в конденсаторі (1 ступень ТНУ); CD – підготовка теплоносія при подачі у 2 секцію; CE – підігрів теплоносія в конденсаторі 2 ступеню ТНУ; CH,DG,EF – сушіння в 1,2,3 секціях; FG – охолодження відпрацьованого теплоносія з 3 –й секції шляхом змішування з відпрацьованим сушильним агентом з 1-й і 2–й секцій; HG – підігрів відпрацьованого теплоносія з 1-й секції шляхом змішування з відпрацьованим теплоносія з 3-й і 2-й секцій; GL – охолодження теплоносія в камері підігріву3; IJ – охолодження теплоносія в випарнику 9 2-ого ступеню;
JK – охолодження теплоносія в випарнику 8 1-й ступені; KA – конденсація вологи з теплоносія на охолоджуючу поверхню випарника 8 1-ого ступеню.

Запропонований спосіб сушіння та алгоритм керування має наступні переваги:

- використання двоступеневої теплонасосної установки дозволяє вести сушіння в змінних режимах при якому температура і швидкість змінюється в часі, що створює умови для плавного регулювання температури матеріалу по зонах у відповідності з ферментативними процесами, обумовленими технологічними вимогами;
- створюються умови для підготовки теплоносія з більш високими енергетичним потенціалом з метою реалізації високотемпературного сушіння;

- знижуються навантаження на компресор, і відповідно зменшуються енерговитрати на його привод, так як передбачена рекуперація теплоти теплоносія на стадії між випарником та конденсатором;

- виключена можливість відхилення температури теплоносія, який подається на сушку, від заданого внаслідок корекції потужності привода компресора не по вологовмісту теплоносія, а за його температурою.

Серед *енергоефективних методів* сушіння можна виділити наступні: двостадійне сушіння, сушіння з використанням сонячної енергії та теплонасосний спосіб сушіння з використання та без використанням сонячної енергії.

У Всесоюзному науково – дослідному інституті зерна були проведені дослідження технології двостадійного сушіння зерна з використанням активного вентилювання на стендових установках (рис. 5.7). Технологія двостадійного сушіння зерна полягає в тому, що зерно після сушіння та відлежування в нагрітому стані охолоджують у вентиляційній ємності. Технологія двостадійного сушіння дозволяє покращити якість зерна, збільшити продуктивність зерносушарок на 21,6 – 23,5%, знизити витрати на паливо на 36,6% і електроенергію на 18,4% [114,115].

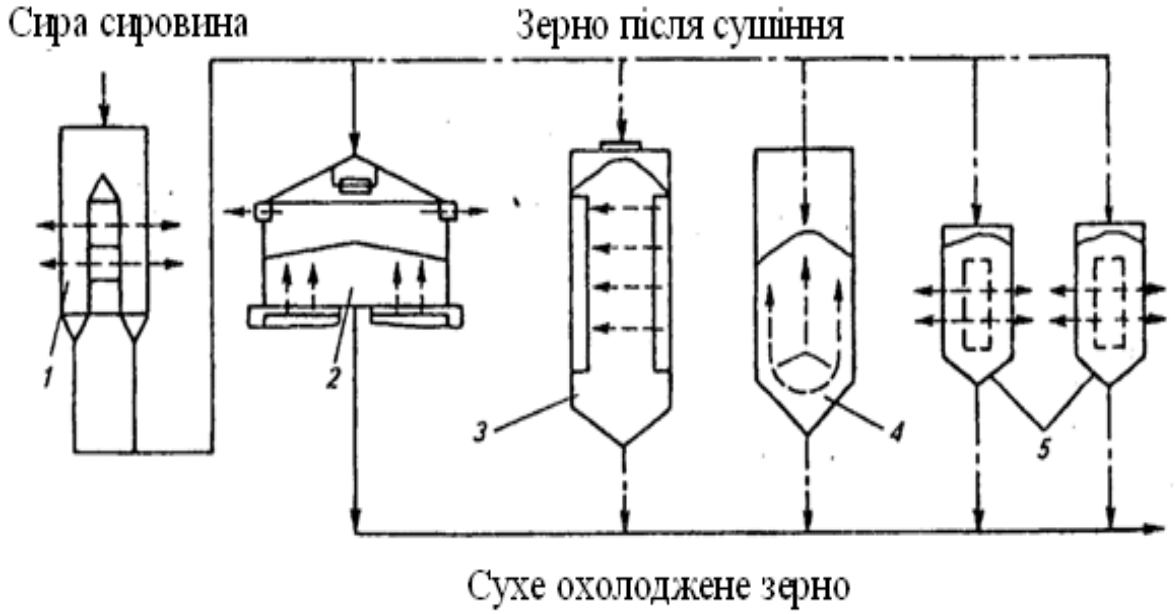


Рис. 5.7. Схема двостадійного сушіння зерна:

1 – зерносушарка; 2 – склад; 3,4 – силос елеватора з горизонтальним та вертикальним розподіленням повітря; 5 – бункери активного вентилювання.

Потенціал використання альтернативних видів палива та енергії в Україні наведений на рис. 5.8.

Потенціал використання альтернативних видів палива та енергії в Україні

Вид палива	Енергетичний потенціал млн. т у. т/рік
Солома зернових культур та ріпаку	5,37
Стебла і качани кукурудзи	4,31
Стебла і лушпиння соняшнику	4,48
Вторинні відходи с/г	0,63
Біогаз з перегною, з полігонів твердих побутових відходів та стічних вод	0,7
Деревинне паливо та відходи	1,63
Рідке пальне (біодизель, біоетанол)	1,91
Енергетичні плантації (верба, тополя, акація, вільха, міскантус)	10,28
Торф	0,4
Разом	29,71

Альтернативні джерела енергії	Енергетичний потенціал МВт ч/рік
Геотермальна енергія	$438 \cdot 10^9$
Стічні води	$3,4 \cdot 10^7$
Тепло ґрунту и ґрунтових вод	$15,7 \cdot 10^4$
Вентиляційні викиди	$0,8 \cdot 10^3$
Сонячна енергія	необмежено

Рис. 5.8. Потенціал використання альтернативних палив та енергії в Україні та теплогенератор польської компанії AG – Project, який працює на відходах зернових культур

Останнім часом можливо створюються теплогенератори з спалюванням відходів деревини, пресованих брикетів, соломі, лушпиння соняшнику та ін. Проведений аналіз різних видів палива, та кількість тепла, яке можна придбати на 1 коп (кКал/коп) (табл. 5.1).

Таблиця 5.1. Вартість теплової енергії в залежності від виду палива

№ п/п	Вид палива	Кількість тепла, ККал	Вартість, грн	Кількість тепла за 1 коп, Ккал/коп
1.	Електроенергія	1 кВт. год =864	1,02	8,5
2.	Дизельне пальне	1л = 8960	9,7	9,2
3.	Газ	1м^3 = 8400	3,12	27
4.	Відходи біомаси	1 кг = 2000	0,05	400

При достатній кількості відходів біомаси, цей вид палива найбільш економічно доцільний. Але відходи носять сезонний характер, в ціну не враховано вартість доставки та зберігання сировини. Не можливо проводити сушіння зерна при спалюванні відходів димовими газами, тому вимагає встановлення додаткового обладнання.

Так як ціна на дизельне пальне і газ прив'язана до вартості до іноземної валюти, то підвищення курсу миттєво впливає на підвищення ціни. Тому економічно доцільний метод проведення сушіння ріпаку за допомогою електричної енергії і таким методом на теперішній час є конденсаційний метод. Він дозволяє споживати електроенергії в межах 0,3 – 0,7 кВт.год/т. зерна. А також дозволяє виробити в 3 рази більше тепла за електроенергію, тобто 3*17 = 51 кКал/коп. Таким чином за своїми тепловими характеристиками майже дорівнює кількості тепла при згорянні газу.

Необмежений енергетичний потенціал сонячної енергії спонукає до розробки нових сушильних технологій. Використання сонячної енергії можна привести на прикладах застосування в США в бункерах для вентилювання зерна та в Угорщині в сушарках напільного типу.

Сонячну енергію можна перетворювати в теплову, її використання обмежено великою розсіяністю по поверхні та нерівномірності надходження за часом. Для збирання (вловлювання) та перетворення сонячної енергії в теплову використовують спеціальні пристрої – сонячні колектори. Основною деталлю плоского колектора є поглинаюча (адсорбуюча) пластина. Пластина чорного кольору поглинає сонячну енергію, підігрівається, а потім віддає теплоту повітрю, який обдуває її з обох боків. Інтенсивність передачі теплоти поглинаючої пластини повітрю залежить від швидкості (2,54 – 5,08 м/с) та форми поверхні пластини (плоска, перфорована). ККД = 15 – 65% [53].

Для сушіння, вентилювання та зберігання зерна в США для встановлення колекторів використовують стіни та дахи бункерів. З цією метою $^2/_3$ поверхні бункерів, які обернені на південь, фарбують чорним кольором і накривають листами прозорого рифленого пластика. Повітря нагнітається та відсмоктується через простір між стінкою та прозорим покриттям, підігрівається та подається в

зернову масу. Площа сонячних колекторів складає 0,35 – 2,65 м^2/т зерна. Нагрівання повітря в середині дня становить 2,8 – 16,7ºС (в середньому за добу на 0,55 – 3,3ºС). Кожні 9,3 м^2 поверхні колекторів забезпечують цілодобове надходження енергії, еквівалентне 18,6 кВт/год електроенергії або рівну кількість теплоти при спалюванні 2,5 л рідкого палива [53].

В Угорщині розроблена сушарка напільного типу з перфорованим днищем для сушіння зерна в контейнерах та насипом [117]. Нагріте повітря в колекторі подається в зерно через перфороване днище. В сушарці встановлений допоміжний підігрівач (N = 93 кВт). Поверхня колектора – 191 м^2. Нагрівання повітря від колекторів – 2,9 – 9,86ºС. Ефективність колектора – 0,3.

Схеми теплових насосів для сушіння різних матеріалів з використанням сонячної енергії, представлено на рис. 5.6.

В даній схемі передбачено підігрівання повітря в підігрівачі 6 від контуру рециркуляції підігрітого теплоносія в сонячному підігрівачі 12 (рис.5.9) [118]. Теплоносій охолоджується та зневоднення в випарнику 1 теплового насосу і направляється в рекуперативний теплообмінник 7, де підігрівається за рахунок рекуперації теплоти викидної частини теплоносія з сушарки 8. В конденсаторі теплоносій підігрівається 2 і направляється вентилятором 11 в сушарку 8.

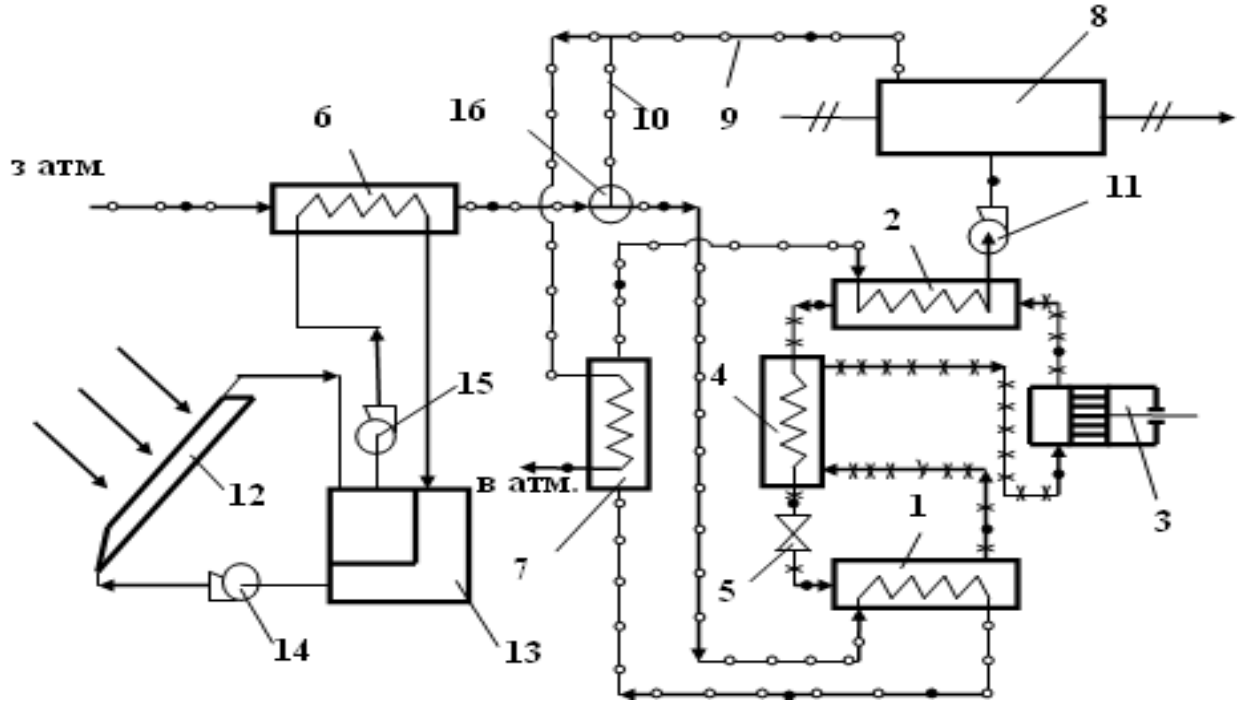


Рис. 5.9. Схема теплонасосної сушильної установки з сонячним підігрівачем: 1 – випарник; 2 – конденсатор; 3 – компресор; 4 – регенеративний теплообмінник; 5 – регулюючий вентиль; 6 – підігрівач; 7 – рекуперативний теплообмінник; 8 – сушарка; 9 – лінія відведення відпрацьованого сушильного агента; 10 – лінія відведення рециркуляційного потоку сушильного агенту; 11 – вентилятор; 12 – сонячний підігрівач; 13 – бак – акумулятор; 14, 15 – насоси; 16 – вузол змішування.

—o—o—o— сушильний агент; —x—x—x— робоча речовина;
——— проміжний теплоносій; ////// продукт, що сушиться.

Можливість використання теплових насосів в процесах сушіння для утилізації відпрацьованого теплоносія та для підігрівання теплоносія, дало поштовх для проведення системного аналізу і розроблення заходів по підвищенню ефективності сушіння зерна на основі теплових насосів (рис.5.10).

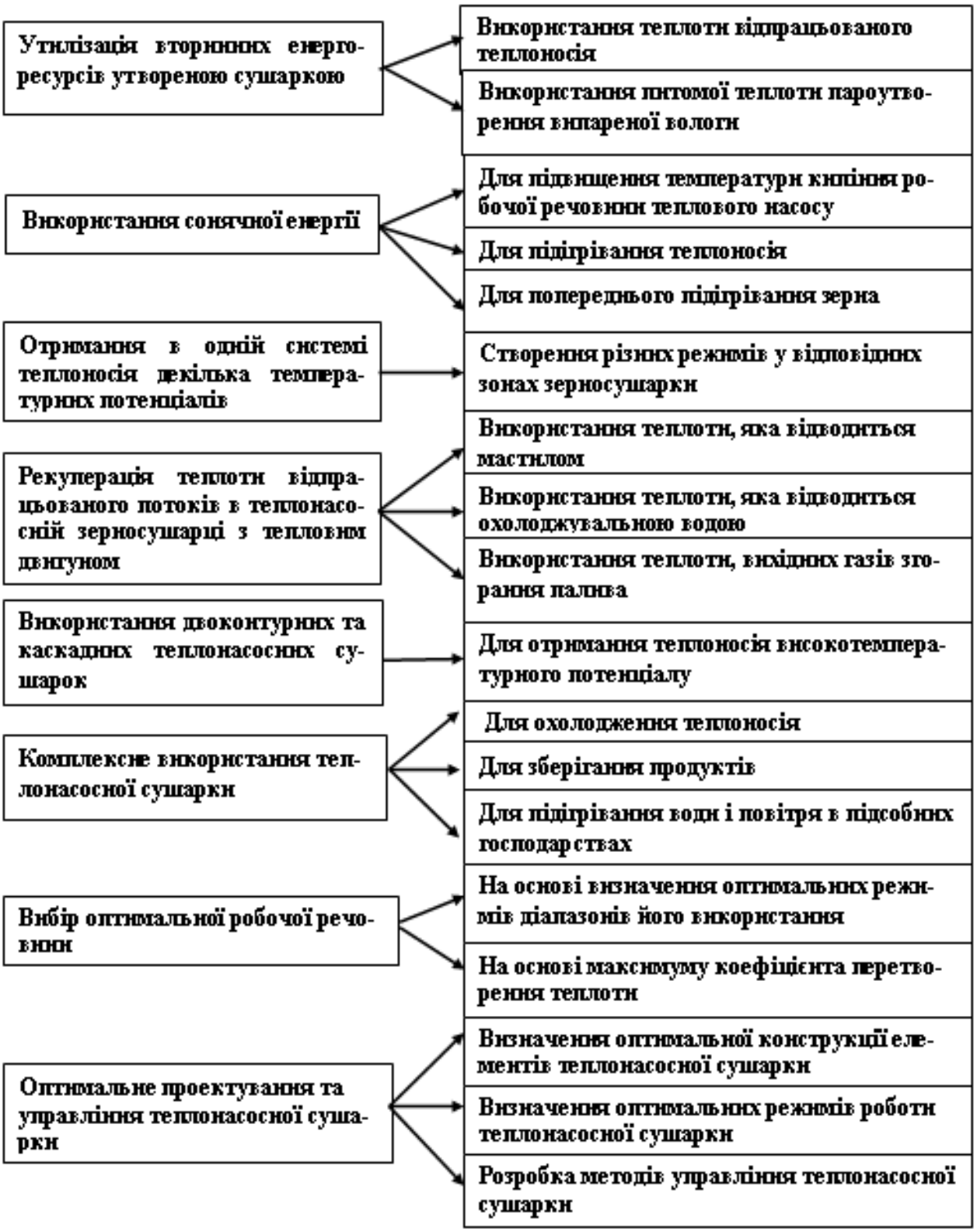


Рис 5.10. Заходи по підвищенню енергоефективності теплонасосної сушарки

Отримання в одній системі теплоносія декілька температурних потенціалів. Для зневоднення продуктів, сушіння яких у відповідності з технологічним регламентом повинен проводитись в декількох секціях сушарок при різних температурах теплоносія, розроблена схема теплонасосної сушарки з двосекційним конденсатором (рис. 5.11) [118].

Теплоносій більш високого температурного потенціалу (для сушарки 11) підігрівається послідовно в секціях 2 і 3 конденсатора і направляється на сушарку 11, де зволожується і охолоджується. Відпрацьований сушильний агент, змішується з свіжою порцією повітря, осушується. Сушильний агент більш низького температурного потенціалу вентилятором 8 направляється в сушарку 10, а потім в випарник 7 для рекуперації теплоти, що дозволяє проводити процес кипіння робочої речовини при більш високій температурі.

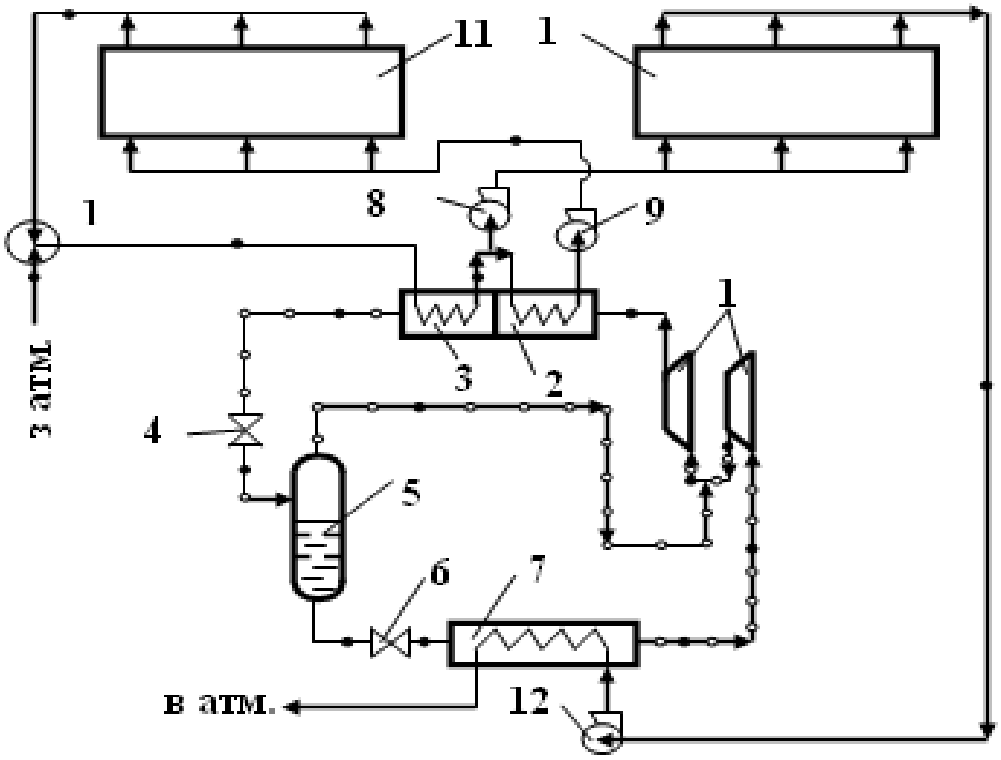


Рис. 5.11. Схема теплонасосної сушарка з двома температурними рівнями теплоносія: 1 – двоступеневий компресор; 2, 3 – двосекційний конденсатор; 4, 6 – регулюючий вентиль; 5 – проміжна ємність; 7 – випарник; 8, 9, 12 – вентилятор; 10, 11 – сушарка; 13 – вузол змішування.
———— сушильний агент; —o—o—o— робоча речовина.

Рекуперація теплоти відпрацьованих потоків в теплонасосній зерносушарці з тепловим двигуном показана на рис.5.12 [118].

Нагрітий за рахунок конденсації робочої речовини повітря в конденсаторі 4 вентилятором 5 направляється в сушарку 6, де зволожується. Відпрацьований теплоносій виводиться з сушарки 6 і частково викидається в атмосферу. Залишок теплоносія змішується з атмосферним повітрям, який вводиться через

патрубок 7, осушується при цьому і направляється для попереднього нагрівання в трьохсекційному теплообміннику.

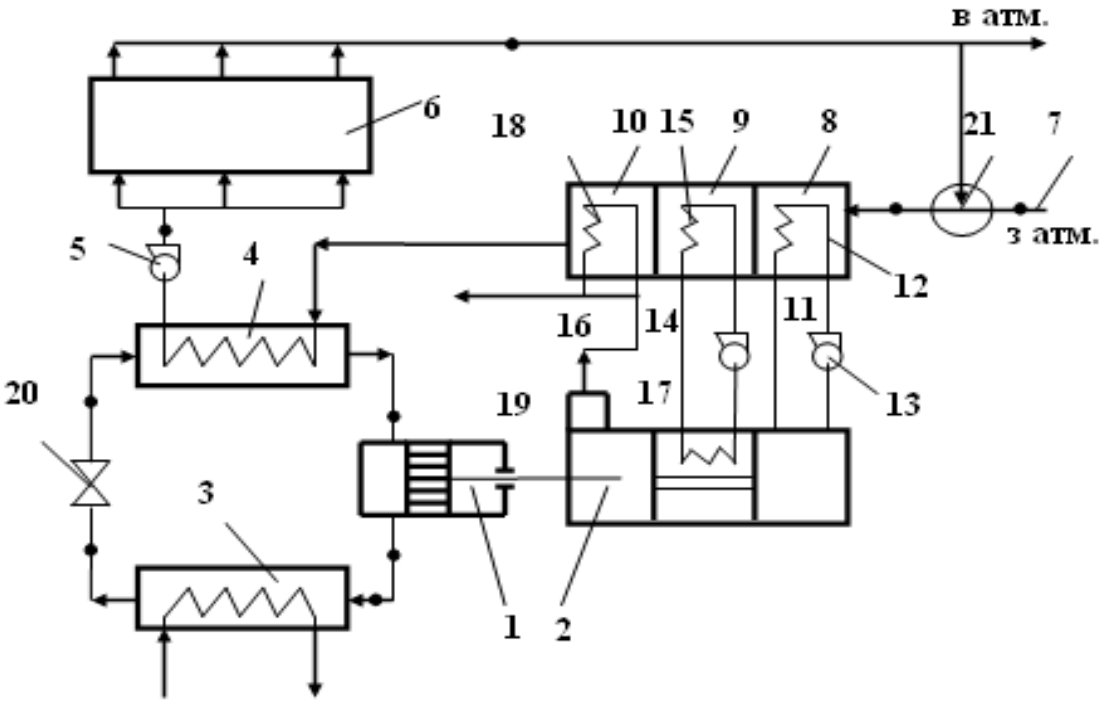


Рис. 5.12. Схема теплового насосу з тепловим двигуном:

1 – компресор; 2 – тепловий двигун; 3 – випарник; 4 – конденсатор; 5 – вентилятор; 6 – сушарка; 7 – патрубок введення атмосферного повітря; 8 – 10 – секції трьохсекційного теплообмінника; 11, 14 – система змазки та охолодження двигуна; 12, 15, 18 – теплообмінні поверхні; 13, 14 – масляний і водяний насоси; 17 – лінія відведення відпрацьованих газів теплового двигуна; 19 – вихлопна труба; 20 – регулюючий вентиль; 21 – вузол змішування;

Нагрівання теплоносія в секції 8 відбувається за рахунок рекуперації теплоти, яка знімається при охолодженні змащувального мастила теплового двигуна, в секції 9 теплообмінника – за рахунок рекуперації теплоти при охолодженні теплового двигуна водою, і в секції 10 – за рахунок рекуперації теплоти вихлопних газів, отриманому при спалюванні палива. Змащувальне мастило з системи змазки 11 за допомогою масляного насосу 13 направляється в секцію 8 трьохсекційного теплообмінника, де охолоджується, нагріваючи при цьому теплоносій (теплообмінною поверхнею 12) і повертається в систему змащування 11. Вода з системи 14 охолоджується тепловим двигуном 2 за допомогою водяного насосу 16 прямує в середню секцію 9 теплообмінника, де охолоджується, а теплоносій нагрівається через поверхню 15 і повертається в систему 16 охолодження двигуна 2. Відпрацьовані гази через вихлопну трубу 19 подаються в секцію 10 трьохсекційного теплообмінника, охолоджуються, віддаючи теплоту теплоносія через теплообмінну поверхню 18, і викидаються в атмосферу. Попередньо підігрітий в трьохсекційному теплообміннику теплоносій догрівається до необхідної температури в конденсаторі 4.

В даній схемі не передбачено використання теплоти викидних газів та системи охолодження теплового двигуна в процесі сушіння, що значно знижує ефективність впровадження теплонасосного способу.

Використання двохконтурних та каскадних теплонасосний сушильних установок (рис. 5.13) [118]. Розроблена каскадна теплонасосна сушильна установка, в якому сушильний агент підігрівається до високих температур у відповідному каскаді теплового насосу.

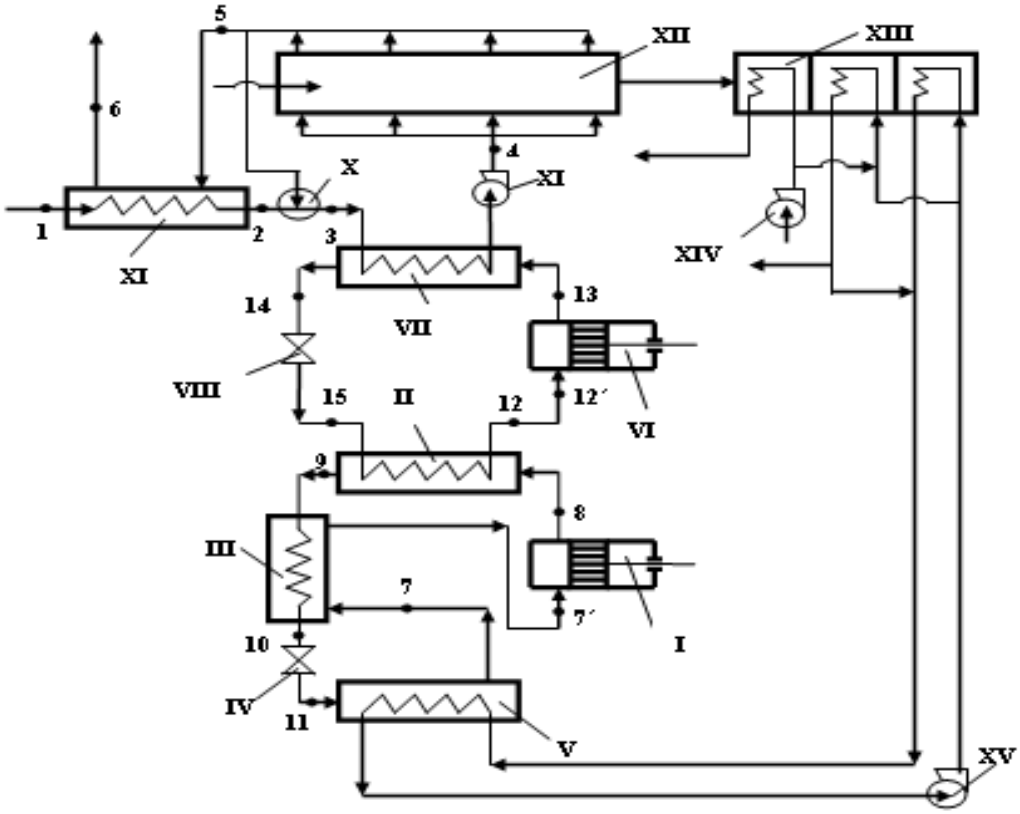


Рис. 5.13. Каскадна теплонасосна сушильна установка:

I, VI – компресори; II – конденсатор – випарник; III – регенеративний теплообмінник; IV, VIII – регулюючі вентилі; V – випарник; VIII – конденсатор; IX – теплообмінник; X – вузол змішування; XI, XIV, XV – вентилятори; XII – сушарка; XIII – охолоджувач.

1 –2 – нагрівання сушильного агенту в попередньому теплообміннику IX; 2 – 3 – зміна параметрів сушильного агенту при змішуванні його з відпрацьованим повітрям; 3 – 4 – нагрівання сушильного агенту в конденсаторі ТН;

4 – 5 – охолодження і зволоження повітря в сушарку; 5–3, 5–6 – зміна параметрів відпрацьованого сушильного агенту відповідно в вузлі змішування X і попередньому теплообміннику; 7 – 7' – перегрівання робочої речовини на всмоктуванні в компресор нижнього каскаду; 7' – 8, 12' – 13 – стискання робочої речовини відповідно в компресорі нижнього і верхнього каскадів; 8 – 9 – конденсація робочої речовини в конденсаторі – випарнику II; 13 – 14 – конденсація робочої речовини верхнього каскаду в конденсаторі VII; 10 – 11, 14

– 15 – дроселювання робочої речовини відповідно нижнього і верхнього каскадів.

Теплонасосна сушильна установка працює наступним чином. Атмосферне повітря надходить в попередній теплообмінник IX, підігрівається за рахунок рекуперації теплоти повітря на виході, після чого змішується з рециркулюючою частиною теплоносія в вузлі змішування X, підігрівається і направляється в конденсатор VII, де підігрівається і подається в сушарку XII вентилятором XI. Після сушарки XII повітря поділяється на 2 частини, одна направляється в вузол змішування X, а інша в попередній теплообмінник IX для підігрівання вхідного потоку теплоносія.

Вибір оптимальної робочої речовини в основному пов'язаний з використанням сучасних екологічно безпечних робочих речовин теплових насосів наведено в працях [119,120].

Оптимальне проектування та управління теплонасосної зерносушарки представлено на рис. 5.5.

5.2. Теплонасосна зерносушарка періодичної дії

Схему рекуперативної конденсаційної сушарки з тепловим насосом частково використовується при розробці теплонасосної зерносушарки періодичної дії ТН – 0,5 (рис. 5.14) .з викидом теплоносія в атмосферу з зернової шахти. Відмінність полягає в тому, що випарник встановлений на вході в теплонасосну зерносушарку і зневоднює теплоносій якій надходить.

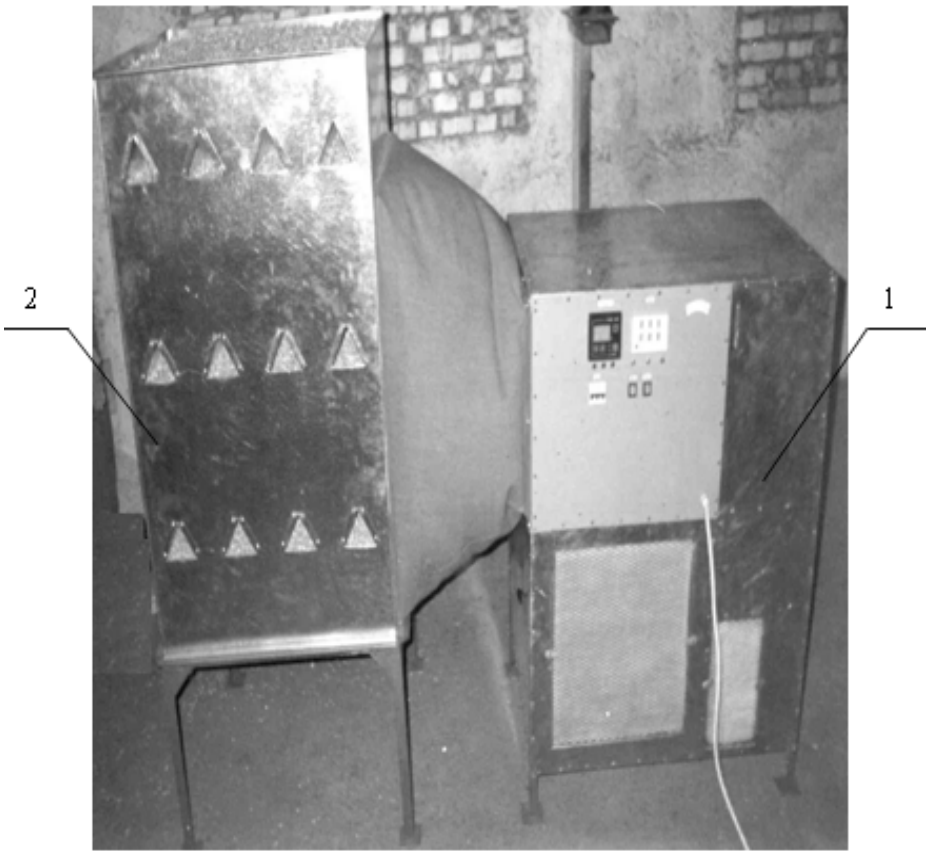


Рис. 5.14. Теплонасосна зерносушарка для сушіння насіннєвого зерна:
1 – теплонасосний агрегат; 2 – сушильна шахта.

Технічна характеристика теплонасосної зерносушарки ТН – 0,5

1. Продуктивність по вилученій волозі	7 кг/год.
2. Одноразове завантаження	500 кг
3. Холодоагент	R22
4. Температура випаровування холодоагенту	-20÷+10 °С
5. Коефіцієнт перетворення теплоти	3,2
6. Встановлена потужність	4,5 кВт
7. Витрати теплоносія	1500 кг/год.
8. Габаритні розміри сушильної камери:	$0{,}8 \times 0{,}8 \times 1{,}7\,м$
9. Габаритні розміри теплонасосного агрегату :	$0{,}7 \times 0{,}9 \times 1{,}3\,м$

Процес сушіння зерна в теплонасосній зерносушарці ТН – 0,5 показаний на *I* - *d* діаграмі (рис. 5.15). Він складається з 2 – х етапів підготовки теплоносія в теплонасосного агрегаті і охолодження та зволоження в сушильній камері.

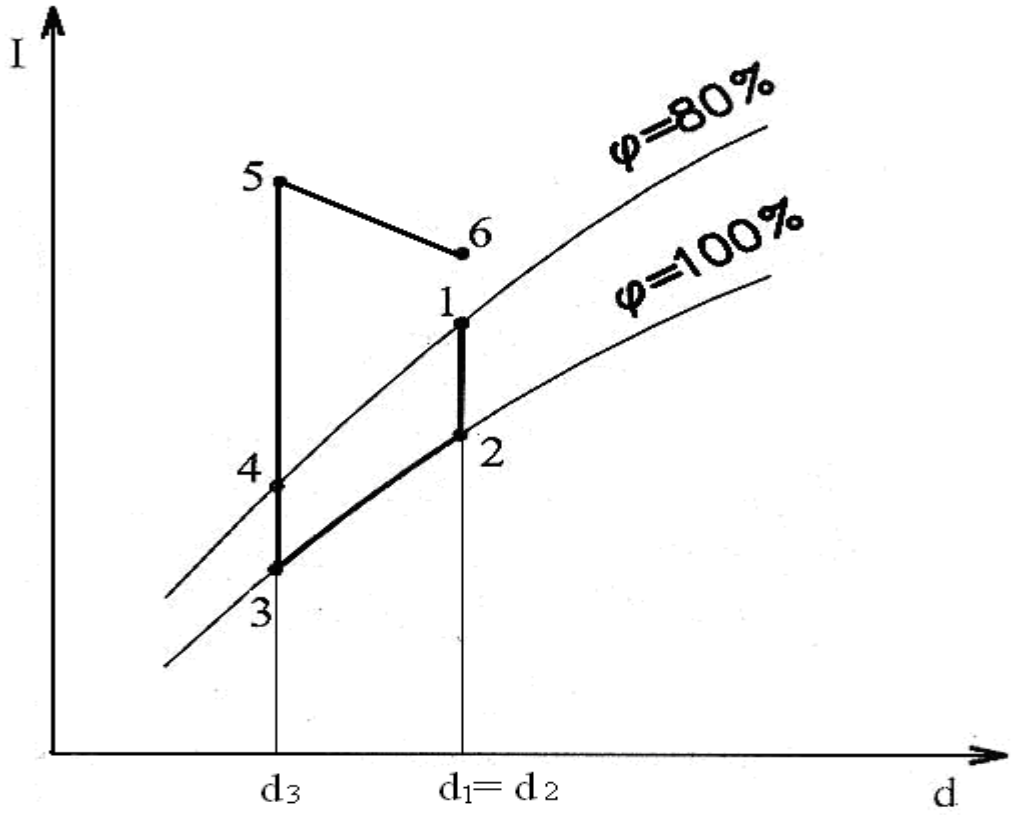


Рис. 5.15. Процес сушіння зерна в теплонасосній зерносушарці
в *I – d* діаграмі:
1 – 2 – охолодження в теплообміннику; 2 – 3 – охолодження в випарнику;
3 – 4 – нагрівання в теплообміннику; 4 – 5 – нагрівання в конденсаторі;

5 – 6 – охолодження і зволоження повітря в сушильній камері.

Зневоднене повітря охолоджується на теплообміннику (лінія 1 – 2) та на випарнику теплового насосу (лінія 2 – 3), зневоднюється і прямує до регенеративного теплообмінника. В регенеративному теплообміннику теплоносій частково підігрівається (лінія 3 – 4) та остаточно нагрівається до заданої температури на конденсаторі теплового насосу (лінія 4 – 5). Нагріте зневоднене повітря через повітропровід поступає до сушильної камери, де відбувається сушіння насіння ріпаку (лінія 5 – 6). Проходячи крізь шар вологого зерна, гаряче сухе повітря забирає з зерна зайву вологу і викидається в зовнішнє середовище.

Температура нагрітого теплоносія в теплонасосній зерносушарці досягає 50…55 °С, що гарантує якісне сушіння насіннєвого зерна різних сортів з низькими витратами теплоти на випаровування вологи.

Для теплотехнічного розрахунку [121] теплонасосної зерносушарки періодичної дії приймають наступні вихідні дані:

1. Параметри осушеного повітря, що подається в сушарку:

температура	55°С
вологовміст	10 г/кг

2. Розрахункові параметри навколишнього середовища:

температура	t_1= 25°С
відносна вологість	80 %
вологовміст	d_1= 16 г/кг
теплоємність	i_1 = 65,6 кДж/кг

3. Витрата повітря через сушарку L = 1500 кг/год.
4. Продуктивність сушарки по вилученій волозі 7 кг/год.
5. Об’єм одноразового завантаження 500 кг
7. Приймаємо до установки: відцентровий вентилятор ВР-300-45-2,5Ж

продуктивність	1500 кг/год.
напір	430-510 Па
потужність	P = 0,75 кВт

8. Розрахунок проводимо по *I-d* діаграмі вол. повітря при p=760 мм рт. ст.
9. Параметри вологого повітря після його осушення до d_3 = 10 г/кг

температура	t_3 = 14°С
теплоємність	i_3 = 38,9 кДж/кг

10. Ефективність рекуперативного теплообмінника приймаємо рівною 0,4.

Перейдемо до теплотехнічного розрахунку зерносушарки.

1. Параметри повітря на виході з охолоджуваної секції рекуперативного теплообмінника визначаються:

$$t_2 = t_1 - E\cdot(t_1 - t_3) = 25 - 0{,}4(25 - 14) = 20{,}6\ °C, \qquad (5.1)$$

$$i_2 = 58{,}9\ кДж/кг.$$

2. Питоме теплове навантаження на випарник:

$$g_o = i_2 - i_3 = 58{,}9 - 38{,}9 = 20 \text{ кДж/кг.} \qquad (5.2)$$

3. Витрата повітря через випарник:

$$L = 1500 \text{ кг/год.}$$

4. Холодопродуктивність теплонасосної установки:

$$Q_o = L \cdot g_o = 1500 \cdot 20 = 30\,000 \text{ кДж/год.} \qquad (5.3)$$

5. Температуру кипіння холодоагенту приймаємо $t_o = 5°C$, температуру конденсації $t_к = 60°C$.

6. Параметри гарячого осушеного повітря на виході з рекуперативного теплообмінника визначаємо з теплового балансу апарата:

$$i_1 - i_2 = i_4 - i_3 ,$$

$$i_4 = i_1 - i_2 + i_3 = 65{,}6 - 58{,}9 + 38{,}9 = 45{,}6 \text{ кДж/кг,} \qquad (5.4)$$

$$t_4 = 18{,}5°C.$$

7. Кількість теплоти, необхідної для нагрівання повітря до 55°С:

$$Q_н = L_c \cdot (t_к - t_4) = 1500 \cdot (55 - 18{,}5) = 54750 \text{ кДж/год.} \qquad (5.5)$$

8. На підставі розрахункових даних приймаємо для установки холодильний компресор ZR49K3E – TFD фірми Copeland ZR.

9. Технічні характеристики компресора при $t_o = 5°C$ і $t_к = 60°C$:

холодопродуктивність	11,21 кВт
споживана потужність	4,02 кВт
коефіцієнт перетворення теплоти	3,2
холодоагент	R – 22

10. Теплове навантаження на конденсатор у комплексному режимі:

$$Q_к = Q_o + N = 11{,}31 + 4{,}02 = 15{,}21 \text{ кВт} = 54750 \text{ кДж/год.}$$

11. Максимальна температура гарячого повітря на вході в сушарку:

$$t = \frac{Q_k}{L_c \cdot c_П} = \frac{54750}{1500 \cdot 1} = 36{,}5 \text{ °C,} \qquad (5.6)$$

$$t_5 = t_п + t = 18{,}5 + 36{,}5 = 55°C \quad . \qquad (5.7)$$

12. Температурний напір в апаратах теплового насоса:

а) випарник: 20,6°С

14° С $\Delta t_{в} = \frac{15,6-9}{\ln 15,6:9} = 12°C$ (5.8)

$t_{о}$=5°С

б) конденсатор: $t_{г}$= 60°С

51,3°С $\Delta t_{k} = \frac{41,5-8.7}{\ln 41,5:8,7} = 21,02°C$ (5.9)

18,5°С

в) теплообмінник: 25°С

20,6°С $\Delta t_{т/о} = \frac{6,6-6,5}{\ln 6,6:6,5} = 6,7°C$ (5.10)

18,5°С

14°С

13. Коефіцієнт теплопередачі у випарнику, конденсаторі і теплообміннику визначається виходячи з масової швидкості повітря у вузькому перетині апарата рівною 3 кг/м^2 ·с:

$$К = 26 \cdot (W_{р}) = 45,03 \text{ Вт/м}^2\cdot\text{с} = 161,8 \text{ кДж/м}^2. \quad (5.11)$$

14. Поверхня теплообмінника:

а) випарник: $F_{и} = \frac{Q_{о}}{K \cdot \Delta t} = \frac{30000}{161,8 \cdot 12} = 15,5 м^2$; (5.12)

б) конденсатор: $F_{и} = \frac{Q_{о}}{K \cdot \Delta t} = \frac{30000}{161,8 \cdot 21,2} = 8,7 м^2$; (5.13)

в) теплообмінник: $F = \frac{L_{c}(t_1 - t_2)}{K \cdot \Delta t} = \frac{1500 \cdot (25-20,6)}{161,8 \cdot 6,7} = 6,1 м^2$. (5.14)

15. Приймаємо для виготовлення теплообмінних апаратів мідну трубу діаметром 10 мм. Крок труб 21 мм. Оребрення суцільне з товщиною ребра 0,15 м. Крок ребра 1,8 мм. Кількість секцій випарника і конденсатора - 3, теплообмінника -1. Ширина ребра 55 мм. Габаритні розміри:

конденсатор 640 х 560

випарник	640 х 560
теплообмінник	640 х 1200.

5.3. Розробка шахтної прямоточної теплонасосної зерносушарки безперервної дії

Створення зерносушильної техніки для зневоднення насіння ріпаку пов'язано з вирішенням комплексу задач направлених на зменшення енергетичних витрат на процес сушіння та збереження високої якості насіння. Вирішення проблеми зменшення енергетичних витрат на процес сушіння зерна головна задача сьогодення. Основним узагальнюючим критерієм ефективності є коефіцієнт використання первинної енергії палива. Він визначається як відношення корисної теплоти до теплотворної здатності витраченого палива [89] (табл. 5.2).

Таблиця 5.2. Коефіцієнт використання первинної енергії палива [93]

Вид палива	Коефіцієнт використання
Електропідігрівання	0,27 – 0,35
Спалювання палива в теплогенераторі	0,75 – 0,95
Парокомпресійний тепловий насос з електроприводом	0,6 – 1,35
Парокомпресійний тепловий насос з тепловим двигуном	1,37 – 2,3

Співставлення альтернативних варіантів нагріву теплоносія за ступенем використання первинної енергії показує, що найменш енергоефективним є прямий електричний нагрів ($K_{ЕЛ}$ = 0,27 – 0,35), тому що на тепловій електростанції при виробленні електричної енергії на транспортування мережами втрачається в середньому 70% первинної енергії.

Нагрів теплоносія в теплогенераторі шляхом прямого спалювання палива в котельні призводить до втрат в середньому біля 15% первинної енергії. Значне коливання коефіцієнту первинної енергії залежить від конструкції теплогенератора і виду палива.

Для парокомпресійних теплових насосів з електроприводом коефіцієнт використання первинної енергії ($K_{ТН}$) дорівнює добутку коефіцієнта перетворення теплового насосу μ і коефіцієнта використання первинної енергії при виробленні електроенергії ($K_{ЕЛ}$):

$$K_{ТН} = \mu \cdot K_{ЕЛ} \qquad (5.15)$$

Коефіцієнт перетворення теплового насосу μ залежить від різниці необхідної температури теплоносія і температури холодного джерела,

термодинамічних властивостей робочої речовини і особливостей термодинамічного циклу та технічної досконалості конструкції.

Тепловий насос з приводом від теплового двигуна, наприклад газової турбіни або дизельного двигуна, є найбільш економічним. Збільшення коефіцієнта використання первинної енергії теплового насосу на базі двигуна – генератора збільшується в 1,37…2,3 рази та дає можливість вироблення як теплової так і електричної енергії (рис. 5.16).

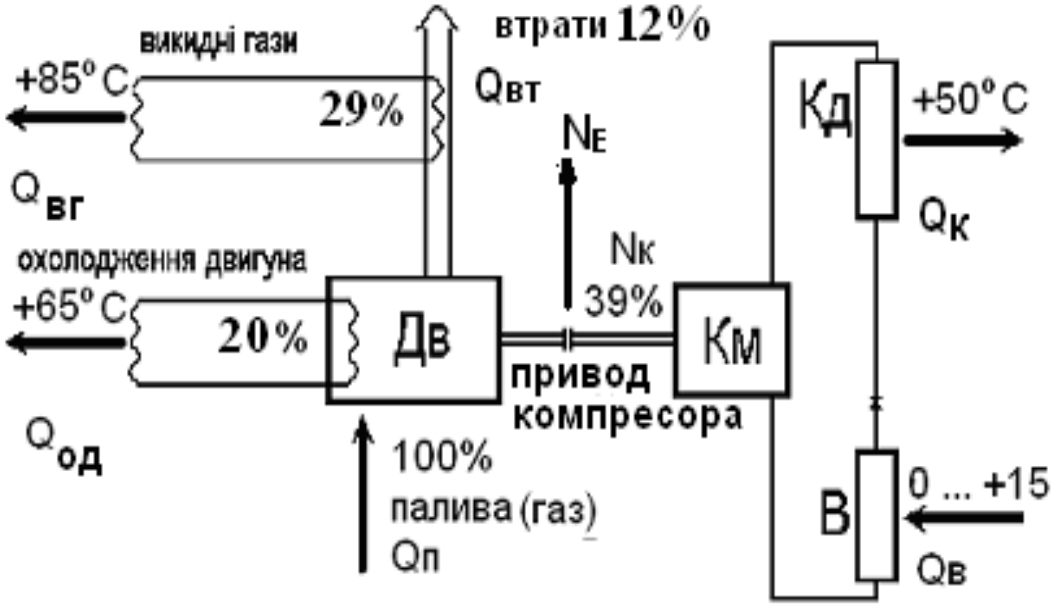


Рис. 5.16. Схема теплонасосної установки з газовим двигуном генератором і розподіленням потоків виробленої енергії:
Дв – газовий двигун генератор;
Км, Кд, В – компресор, конденсатор та випарник теплового насоса

Перерозподіл отриманої теплової енергії на базі двигуна генератора визначається за формулою:

$$Q_T = Q_{КД} + E \cdot Q_{В.Г} + Q_{ОД} = (2,1…4,5) \cdot 0,39 + 0,7 \cdot 0,41 + 0,20 =$$
$$= (2,1…4,5) \cdot 0,39 + 0,29 + 0,20 = (1,31…2,25) Q_П \qquad (5.16)$$

де: Q_T – загальна кількість отриманої теплової енергії;
E – ефективність рекуператора E = 0,7;
$Q_{КД}, Q_{ВГ}, Q_{ОД}$ - отримана теплова енергія від охолодження двигуна, утилізації вихідних газів і від роботи на конденсаторі теплового насосу.

Не дивлячись на невеликий к.к.д. дизель – генератора 39%, при роботі з тепловим насосом більша частина теплових втрат з системи охолодження двигуна 20% та викидними газами 29%, може бути утилізована і направлена в

загальний потік теплоносія. Втрати в навколишнє середовище залежать від ефек-тивності рекуператора і складають в середньому 12%.

Теплонасосна зерносушарка безперервної дії складається з шахти зерносушарки 1 (рис. 5.17), яка має чотири відокремлених по ходу сушильного агента 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 [122 – 125].

Теплонасосна зерносушарка працює наступним чином: вологе зерно надходить в I зону зерносушарки, де відбувається нагрівання зерна при температурі теплоносія 80 – 85°С від системи утилізації теплоти димових газів, яка складається з теплообмінника 5, теплоутилізатора 11 та циркуляційного насоса 12. Підігріте і частково зневоднене зерно надходить в II зону, де продовжується його тепловологістна обробка теплоносієм 60 – 65°С, нагрітим від відібраної теплоти з системи охолодження мастила газового двигуна генератора, яка складається з теплообмінника 6, теплоутилізатора 10 та циркуляційного насоса 13.

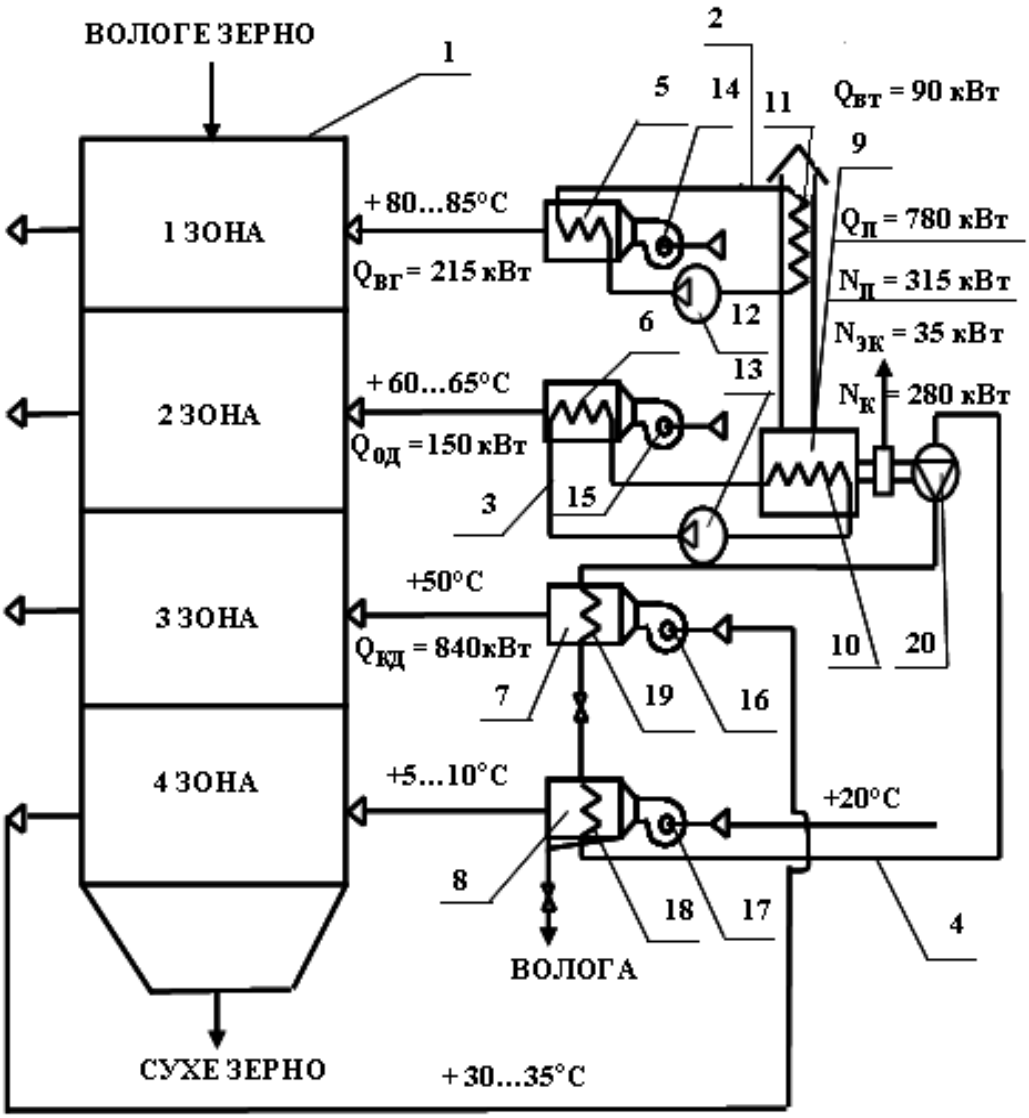


Рис. 5.17. Теплонасосна зерносушарка безперервної дії

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.

Використання теплового насосу в технологічній схемі дозволяє охолодити та зневоднити теплоносій в випарнику 18 на 10 – 15°С нижче навколишнього середовища, що інтенсифікує процес охолодження в IV зоні. Зневоднене та підігріте від зерна теплоносій до температури 30…35°С, додатково підігрівається до температури 50°С на конденсаторі 19 теплового насосу і направляється в III зону для досушування зерна.

Зневоднене та охолоджене зерно після IV зони зерносушарки направляється на зберігання.

Таким чином, проводячи теплонасосний спосіб сушіння насіннєвого ріпаку можна досягти поставленої задачі – інтенсифікації процесу сушіння зі

збереженням якості насіння та використання 95% первинної енергії газового двигуна генератора 9 в схемі теплового насоса.

Теплонасосна зерносушарка на базі газового двигуна генератора ДвГА – 315 забезпечує виробництво електричної енергії в кількості $N_П$ = 315 кВт і теплової $Q_П$ = 430 кВт. Вироблена електрична енергія перерозподіляється між електричною енергією на експлуатаційні потреби (робота вентиляторів, насосів системи охолодження, елеваторів та ін.) в кількості
$Ne_К$ = 35 кВт і електричної енергії на роботу компресора теплового насосу $N_К$ = 280 кВт.

Теплова енергія отримана від роботи газового дизель – генератора розподіляється на підігрівання зерна в першій зоні в кількості $Q_{ВГ}$ = 215 кВт та на сушіння насіння ріпаку в другій зоні в кількості $Q_{ОД}$ = 150 кВт. В третій зоні для продовження сушіння використовується теплота утворена в тепловому насосі, величина якої на конденсаторі складає $Q_{КД}$ = 840 кВт. Втрати теплової енергії в навколишнє середовище від роботи газового двигуна генератора ДвГА – 315 складають $Q_{ВТ}$ = 90 кВт.

Теплотехнічний розрахунок теплонасосної зерносушарки безперервної дії:

1. Теплопродуктивність агрегату:

$$Q_T = Q_{ВГ} + Q_{ОД} + Q_{КД} = 215 + 150 + 840 = 1205 кВт \quad (5.17)$$

2. Продуктивність по повітрю:

Для I зони: $L_1 = \dfrac{Q_{ВГ} \cdot 860}{c_П \cdot \Delta t} = \dfrac{215 \cdot 860}{0{,}24 \cdot (85 - 20)} = 11852 \quad кг/год$. (5.18)

Для II зони: $L_2 = \dfrac{Q_{ОД} \cdot 860}{c_П \cdot \Delta t} = \dfrac{150 \cdot 860}{0{,}24 \cdot (65 - 20)} = 11945 \quad кг/год$. (5.19)

Для III зони: $L_3 = \dfrac{Q_{КД} \cdot 860}{c_П \cdot \Delta t} = \dfrac{840 \cdot 860}{0{,}24 \cdot (50 - 20)} = 100333 \quad кг/год$. (5.20)

3. Кількість видаленої з зерна вологи:

$$W = \Sigma L \cdot \Delta d = 124130 \cdot 7 \cdot 10^{-3} = 869 кг/год. \quad (5.21)$$

4. Продуктивність по сухому зерну (при зниженні вологості з 15% до 8%):

$$G = \frac{W}{70} = \frac{870}{70} \approx 12{,}5 m / год. \quad (5.22)$$

5. Питомі витрати газу на сушіння:

$$L_{газу} = \frac{B}{G} = \frac{84}{12{,}4} = 6{,}77 м^3 / т. \quad (5.23)$$

де B - витрати газу в газовому дизель – генераторі ДвГа – 315, м^3/год.

6. Енерговитрати на видалення 1 кг видаленої вологи:

$$Q_{ВТ} = \frac{L_{газу} \cdot \Theta \cdot 4{,}18}{70} = \frac{6{,}77 \cdot 8000 \cdot 4{,}18}{70} \approx 3230 кДж / кг. \quad (5.24)$$

де: Θ – теплоспроможність газу, Θ = 8000 ккал/м ^{3}.

Теплонасосна зерносушарка з газовим двигуном генератором ДвГА – 315 дає можливість проводити процес сушіння насіння ріпаку та інших зернових культур, при цьому забезпечуючи себе повністю теплової та частково електричною енергією.

Очікувані питомі витрати теплоти на процес сушіння, при умові відведення електричної енергії на технологічні потреби в кількості 35 кВт, складають 3230 кДж/кг вип. вологи, а при повному виробленні теплової енергії становить 3000 кДж/кг вип. вологи, що в порівнянні з іншими зерносушарками дозволяє отримати економію в 1,5 – 1,7 рази (рис. 5.18).

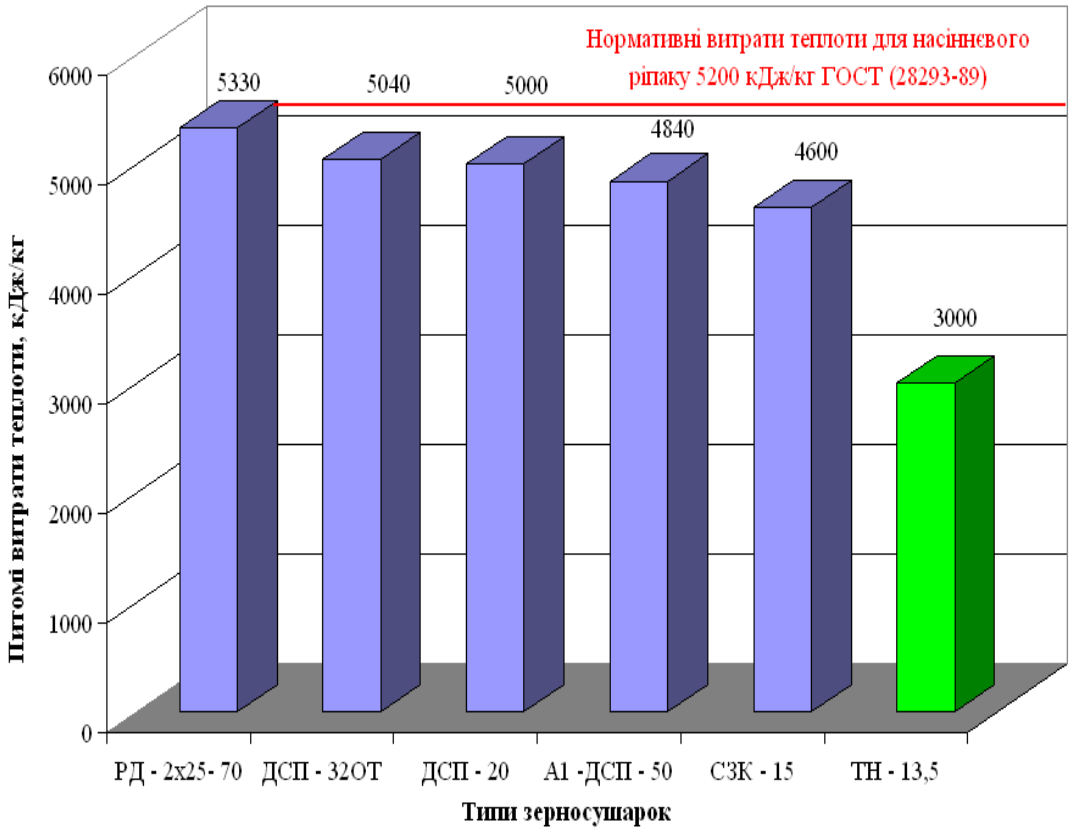


Рис. 5.18. Питомі витрати теплоти на сушіння насіннєвого ріпаку

5.4. Техніко-економічне обґрунтування теплонасосної зерносушарки

Розрахунок техніко-економічних показників проводиться в порівнянні між теплогенераторам на базі газового двигуна генератора ДвГА – 315 з тепловим насосом та теплогенератором з пальником RIELLO на природному газі. Орієнтовна вартість теплогенераторів представлена в табл.5.3 та табл. 5.5, їх технічні характеристики – в табл. 5.4 та табл. 5.6.

Таблиця 5.3. Вихідні дані для розрахунку техніко-економічних показників теплового насосу з газовим двигуном генератором ДвГА – 315 [126,127]

№	Найменування	Вартість з НДС (20%), грн.	Постачальник
1.	Двигун генератор ДвГА - 315	600000	АООТ „Перво-майскдизельмаш”
2.	Тепловий насос 280 кВт	1008000	ТОВ НВО „Екотепло”
Всього:1608000 грн			

Таблиця 5.4.Технічні характеристики двигуна генератора ДвГА – 315 [126]

Параметри	Значення
Електрична потужність на клемах генератора, кВт	315
Теплова потужність, Гкал/час (кВт)	0,38 (450)
Витрата газового палива, $м^3$/год	84
Кількість підігрітої води при використанні підвішених на двигун водяних насосів, $м^3$/год	24
Температура вихідних газов: – на виході з двигуна, ^oC – на виході з теплообмінника, ^oC	 550 120

Таблиця 5.5. Вихідні дані для розрахунку техніко – економічних показників теплогенератора з пальником RIELLO на природному газі [128]

Найменування	Вартість, грн	Мито (15%), грн	НДС (20%), грн	Постачальник
1	2	3	4	5
Теплогенератор PGA – 1300	301320	45198	60264	фірма „ARAJ” (Польща)
Всього: 406782 грн				

Таблиця 5.6.Технічна характеристика теплогенератора з пальником RIELLO на природному газі [128]

Параметри	Значення
Теплова потужність, кВт	1508
Витрата газу, $м^3$/год	175,6
Витрати електроенергії, кВт	45,5
Габаритні розміри: ширина довжина висота	 1300 4450 3100

Техніко – економічний розрахунок

1. Розрахунок капітальних витрат теплогенераторів.

До капітальних витрат відноситься вартість устаткування і монтажу. Відповідно до нормативних розцінок вартість монтажу складає 10 % вартості устаткування, у такий спосіб капітальні витрати складають:

$$K = 1{,}1\ C_{o,}, \qquad (5.25)$$

де C_o – вартість обладнання.

Для теплогенератора $K_{ТГ}$ = 1,1· 406782 = 447460 грн.
Для теплового насосу: $K_{ТН}$ = 1,1 ·1608000 = 1768800 грн.

2. Розрахунок експлуатаційних витрат.

Експлуатаційні витрати B і складаються з суми поточних витрат на енергоносії, амортизацію, техобслуговування, ремонт і заробітну плату:

$$B = B_п + B_{е.н} + B_а + B_{то} + B_р + B_{зп} . \quad (5.26)$$

де $B_п$ – витрати палива, грн.
$B_{е.н}$ – витрати електроенергії, грн.
$B_а$ – амортизаційні відрахування, грн.
$B_{то} + B_р$ – експлуатаційні витрати на ремонт і техобслуговування, грн.
$B_{зп}$ – витрати на заробітну плату робітникам, грн.

2.1. Витрати палива визначаються кількістю спожитого газу за годину, тарифом на газ та кількістю годин роботи в рік:

$$B_п = P_г \cdot T_{г.} \cdot \tau_р \quad (5.27)$$

де $P_г$ – споживання газу, м ^{3}/год.;
$T_{г.}$ = 3,12 – тариф на газ, грн./м ^{3} [129];
$\tau_р$ – кількість годин роботи в рік (3 місяці), год.
Для теплогенератора $B_{тг}$ = 175,6·3,12 ·1440 = 783878 грн.
Для теплового насосу: $B_{тн}$ = 84·3,12 ·1440 = 377395 грн.

2.2. Витрати електроенергії в теплогенераторі PGA 1300 фірми RIELA визначаються кількістю спожитої електроенергії за годину, діючими тарифами та кількістю годин роботи в рік віднесеної до продуктивності зерносушарки:

$$B_{е.н.} = P \cdot T_{ел.} \cdot \tau_р ,$$
(5.28)

де P – сумарна споживана потужність електроустаткування, кВт/год.;
$T_{ел}$ = 1,02 – тариф за електроенергію, грн./кВт [130];
$\tau_р$ – кількість годин роботи в рік, год.;

$$B_{е.н.} = 45,5 \cdot 1,02 \cdot 1440 = 65520 \text{ грн.}$$

Вартість електричної енергії від впровадження теплового насосу з газовим двигуном генератором ДвГА – 315:

$$B_{е.н.} = 35 \cdot 1,02 \cdot 1440 = 50400 \text{ грн.}$$

2.3. Амортизаційні відрахування визначаються як відношення капітальних витрат до терміну служби устаткування:

$$B_a = \frac{K}{\tau}, \qquad (5.29)$$

де τ – термін служби устаткування. τ = 15 років.

Для теплогенератора $B_a = \frac{447460}{15}$ = 29830 грн./т.

Для теплового насосу: $B_a = \frac{1768800}{15}$ = 117920 грн.

2.4. Поточні експлуатаційні витрати на ремонт і техобслуговування устаткування приймаємо рівними 1 % від вартості основного устаткування:

$$B_{то} + B_р = 0{,}01 \cdot C_{0,} \qquad (5.30)$$

Для теплогенератора: $B_{то} + B_р$ = 0,01· 406782 = 4068 грн.

Для теплового насосу: $B_{то} + B_р$ = 0,01·1608000 = 16080 грн.

2.5. Витрати на заробітну плату робітників.

Приймаємо обслуговуючий персонал у кількості – 4 чоловіка в зміну. Середній оклад – 1500 грн/міс., при сезонній роботі 1440 год./рік (3 міс):

2 зміни: $B_{зп}$ = 4·1500·3·2 = 36000 грн.

3 зміни: $B_{зп}$ = 4·1500·3·3 = 54000 грн.

Нарахування на заробітну плату у розмірі 38%, що складає – 13680 грн. (2 зміни) та 20520 грн. (3 зміни).

Всі річні експлуатаційні витрати зводимо в таблицю 5.7.

Таблиця 5.7. Експлуатаційні витрати на процес сушіння насіння ріпаку

Експлуатаційні витрати, грн.	теплогенератор з пальником RIELLO		тепловий насос з двигуном генератором ДвГА – 315	
	2 зміни	3 зміни	2 зміни	3 зміни
Витрати газу	+ 783878	+ 1183403	+ 377395	+ 550368
Витрати електроенергії	+ 65520	+ 97461	- 50400	- 74970
Амортизаційні відрахув.	+ 29830	+ 29830	+ 117920	+ 117920
Ремонт і тех. обслуговув.	+ 4068	+ 4068	+ 16080	+ 16080
Заробітна плата	+ 36000	+ 54000	+ 36000	+ 54000
Нарахування на з/п	+ 13680	+ 20520	+ 13680	+ 20520
Всього	932976	1389282	510675	683918

3. Очікуваний економічний ефект від використання теплонасосного устаткування відносно діючих тарифів:

$$E = (B_{ТГ} - B_{ТН}), \qquad (5.31)$$

де $B_{ТГ}$ – експлуатаційні витрати в теплогенераторі з пальником RIELLO, грн.

$B_{ТН}$ – експлуатаційні витрати в теплогенераторі з тепловим насосом на базі газового двигуном генератором ДвГА – 315, грн.

2 зміни: $E = (B_{ТГ} - B_{ТН}) = 932976 - 510675 \approx 422300$ грн.

3 зміни: $E = (B_{ТГ} - B_{ТН}) = 1389282 - 683918 \approx 705364$ грн.

4. Термін окупності капітальних вкладень від збереження енергоносіїв:

$$T = \frac{K_{ТН}}{E}, \qquad (5.32)$$

де $K_{ТН}$ – капітальні витрати теплогенератора з тепловим насосом на базі газового двигуном генератором ДвГА – 315, грн.

2 зміни: $T = \frac{K_{ТН}}{E} = \frac{1768800}{422300} = 4{,}2$ р.

3 зміни: $T = \frac{K_{ТН}}{E} = \frac{1768800}{705364} = 2{,}5$ р.

Економічний ефект шахтної зерносушарки безперервної дії на базі газового двигуна генератора ДвГА – 315 з тепловим насосом в порівнянні з теплогенератором фірми RIELLO отриманий за рахунок зменшення витрат газу та електроенергії.

Аналіз отриманих результатів вказує на доцільність використання теплонасосної зерносушарки на базі газового двигуна генератора ДвГа – 315 з тепловим насосом (табл. 5.8).

Таблиця 5.8. Показники економічної ефективності теплонасосної зерносушарки безперервної дії продуктивністю 12,5 т/год.

Показники	Шахтна зерносушарка з теплогенератором			
	RIELLO		з тепловим насосом на базі газового двигуна генератора ДвГа – 315	
	2 зміни	3 зміни	2 зміни	3 зміни
Вартість зерносушарки, грн.	406782		1608000	
Капітальні витрати, грн.	447460		1768800	
Експлуатаційні витрати, грн.	932976	1389282	510675	683918
Очікуваний економічний річний ефект від впровадження теплонасосної зерносушарки ТН – 12,5 т/год., грн. (за рахунок зменшення витрат енергоносіїв)	–		422300	705364
Термін окупності капітальних вкладень від збереження енергоносіїв, р.	–		4,2	2,5
Очікуваний економічний річний ефект від впровадження теплонасосної зерносушарки ТН – 12,5 т/год., грн. (за рахунок збереження 3% схожості насіння при орієнтовній вартості насіння 6000 грн./т).	–		3240000	4860000

Підрахований очікуваний економічний ефект від впровадження теплонасосної зерносушарки безперервної дії продуктивністю 12,5 т/год. складає 422300 грн. при 2-х змінній роботі та 705364 грн. при 3-х змінній. Термін окупності капітальних вкладень відповідно складає 4,2 року та 2,5 року.

Переваги даної схеми для сушіння насіннєвого зерна містяться не тільки в збереженні енергоносіїв, але в ній суттєво зменшений викид газів та забруднення зерна, а також досягається збереження схожості насіння на рівні 3% (отримано за даними літературних та експериментальних досліджень).

Економічний ефект залежить також від зменшення викидів газів та забруднення зерна, який може суттєво зменшитись при наявності штрафних санкцій від забруднення навколишнього середовища.

Зменшення викидів в навколишнє середовище, отримано за рахунок встановлення: теплового насосу, теплообмінників на вході в зони сушіння та проведених заходів з рециркуляції відпрацьованого теплоносія з зони охолодження в зону сушіння.

Очікуваний економічний річний ефект від впровадження теплонасосної зерносушарки ТН – 12,5 т/год., грн., за рахунок збереження 3% схожості насіння при орієнтовній вартості насіння 6000 грн./т., дозволить отримати економію коштів на рівні 3240000 грн./рік при 2-х змінній роботі та 4860000 грн./рік при 3-х змінній роботі однієї сушарки (робота зерносушарки 90 днів).

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов/ А.С. Гинзбург – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

2. Станкевич Г. М. Сушіння зерна: Підручник / Г. М. Станкевич, Т. В.Страхова, В.І. Атаназевич – К.: Либідь, 1997. – 352 с.

3. Руководство по технологии получения растительных масел и жиров./ Под ред. А. Г. Сергеева. т.1. Л.: ВНИИЖ, 1975 – 727с.

4. Кропп Л. И. Обработка и хранение семенного зерна. – М.: Колос, 1974. – 176с.

5. Зберігання і переробка продукції рослинництва: Навч. посібник/ Г. І. Подпрятов, Л. Ф. Скалецька, А. М. Сеньков, В. С. Хилевич. – К.: Мета, 2002. – 495 с.

6. Овсянникова Л. Для ефективного очищення насіння ріпаку й гірчиці від важковідокремлюваних домішок / Л. Овсянникова, С. Орлова, Г. Гончарук // Зерно і хліб. – 2007. – № 2. – С. 24 – 25.

7. Пилявская Л.С. Некоторые свойства семян рапса как объекта сушки / Л.С. Пилявская, Н.Я. Попов, М.И. Черников // Тр. ВНИИ зерна и продуктов его переработки. – 1984. – Вып.105. – С.47 –51.

8. Дослідження процесу сушіння насіння ріпаку / О. М. Берегова, Г. М. Станкевич // Вісник харківського державного університету сільського господарства. – 2001. – Вип. 5. – С. 282 – 287.

9. Mühibaure W., Scherer R. Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten. – Grundlagen der Landtechnik, 1977, v. 27, 2, s. 33...40.

10. Коровин Ф. Н. Зерно хлебных, бобовых и масличных культур. – М.: Пищевая промышленность, 1964 – 463 с.

11. Анискин В.И. Равновесная влажность зерна различных культур (по данным зарубежных исследований) / Под ред. А.С. Гинзбурга. – М.: Заготиздат, 1962. – 60 с.

12. Pichler H. J. Sorptionisothermen fur Getreide und Raps / H. J. Pichler // Landtechn. Forsch. – 1956. Bd. 6, № 2. – S. 47.

13. Берегова О.М. Вплив вологості і температури на теплофізичні характеристики насіння ріпаку / О.М. Берегова // Холодильна техніка і технологія. – 2001. – № 2 (71).– С. 49 – 51.

14. ДСТУ 4966:2008. Насіння ріпаку для промислового переробляння. Технічні умови [Текст]. - Заміна ГОСТ 10583-76 ; Введ. з 2010.07.01. - [Б. м. : б. и.]. - 10 с. - Б. ц.

15. Берегова О.М. Вплив вологості і температури на теплофізичні характеристики насіння ріпаку / О.М. Берегова // Холодильна техніка і технологія. – 2001. – № 2 (71).– С. 49 – 51.

16. Пабис С. Теплопроводность и коэффициент температуропроводности в слое зерна некоторых сельскохозяйственных продуктов / С. Пабис, Э. Биловицка, С.П. Гадай // Инж.-физич. журнал. – 1970. – Т. 19, № 3. – С. 501 – 507.

17. Moysey E.B. The effect of temperature and moisture on the thermal properties of rapeseed / E.B. Moysey, G.T. Shaw, W.P. Lampman // Trans. ASAE. – 1977. – Vol. 20, № 4. – P. 768 – 771.

18. Timbers G.E. Properties of rapeseed: Thermal conductivity and specific heat / G.E. Timbers // Canad. Agric. Eng. – 1975. – Vol. 17, № 2. – P. 81 – 84.

19. Гинзбург А.С. Теплофизические свойства зерна, муки и крупы / А.С. Гинзбург, М.А. Громов – М.: Колос. – 1984. – 304 с.

20. Mühibaure W. Die spezifische Wärme von Körnerfrüchten / W. Mühibaure, R. Scherer // Grundlagen der Landtechnik. – 1977. Vol. 27, № 2. – S. 33 – 40.

21. Sharma S. C. Simulation of heat and mass transfer during ventilation of Wheat and Rapeseed bulk / S. C. Sharma, W. E Muir // Canadian Agricultural Engineering. – 1974. – Vol. 16, № 1. – P. 41 – 44.

22. Scherer R. Die Wärme und Teuperatullit fahigket von Körnerfrüchten / R. Scherer, H. Kuizbach // Grundb Zand technik. – 1980. – Vol.30, № 1. – S. 55 – 60.

23. Bilanski W.K., Fisher D.R. Thermal conductivity of rapeseed / W.K. Bilanski, D.R. Fisher // Trans. ASAE. – 1976. – Vol. 19, № 4. P. 788 – 791.

24. Артемов И.В. Интенсификация процесса сушки семян рапса / И.В. Артемов, Г.А. Филатов, И.П. Мамонцев // Масличные культуры. – 1987. – № 2. – С. 25 – 26.

25. Попов Н.Я., Пилявская Л.С., Черников М.И. Исследование процесса нагрева и сушки семян рапса в кипящем слое / Н.Я. Попов, Л.С. Пилявская, М.И. Черников // Тр. ВНИИ зерна и продуктов его переработки. – 1989. –Вып.113. – С. 175 – 183.

26. Берегова О. М. , Станкевич Г.М. Дослідження процесу сушіння насіння ріпаку / О. М. Берегова, Г.М. Станкевич // Вісник харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: 2001. – Вип.5: Сучасні напрямки технології та механізації процесів переробних та харчових виробництв. – С. 282 – 288.

27. К заготовкам рапса // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая пром-сть. – 1984. – № 8. – С. 12 – 13.

28. Пилявская Л. Из опыта сушки масличных культур. Рапс / Л. Пилявская, М. Черников, Б. Гринберг // Мукомольно-элеваторная и комбикормовая пром-сть. – 1986. – № 4.– С. 24 – 25.

29. Атаназевич В.І. Сушіння ріпаку / В.І. Атаназевич, Т.В. Страхова // Наукові праці Одеської держ. академії харчових технологій. – Одеса: 1999. – Вип.19: Удосконалення існуючих та розробка нових технологій для харчової та зернопереробної промисловості. – С. 22 – 25.

30. Голик М.Г. Хранение и обработка початков и зерна кукурузы / М.Г. Голик – М.: Колос, 1967. – 335 с.

31. Зелинский Г.С., Сорочинский В.Ф. Шахтная рециркуляционная зерносушилка // Патент СССР на изобретение № 1150457, дата регистрации 15.04.1985.

32. Зелинский Г.С., Сорочинский В.Ф. Шахтная рециркуляционная зерносушилка // Патент РФ на изобретение №2142103, дата регистрации 27.11.1999.

33. Гержой А.П. Зерносушение и зерносушилки / А.П. Гержой, В.Ф. Самочетов – М.: Колос, 1967.– 255 с.

34. Баум А.Е. Сушка зерна / А.Е. Баум, В.А. Резчиков – М.: Колос, 1983 – 223 с.

35. Гинзбург А.С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов – / А.С. Гинзбург – М.: Пищевая промышленность, 1973. – 528 с.

36. Гришин М.А. Установки для сушки пищевых продуктов / М.А. Гришин, В.И. Атаназевич, Ю.Г. Семенов – М.: Агропромиздат, 1989. – 215 с.

37. Жидко В.И. Зерносушение и зерносушилки / В.И. Жидко, В.А. Резчиков, В.С. Уколов – М.: Колос, 1982. – 239 с.

38. Станкевич Г.М. Сушіння зерна. Лабораторні роботи: навчальний посібник / Г.М. Станкевич, Т.В. Страхова, С.Є. Шувалов, Л.М. Шмагін – К.: Либідь, 1997. – 136 с.

39. Лебедев П.Д. Теплообменные, сушильные и холодильные установки / П.Д. Лебедев – М.: Энергия, 1963. – 320 с.

40. Левин М.Д. Термодинамическая теория и расчет сушильных установок / М.Д. Левин – М.: Пищепромиздат, 1969. – 289 с.

41. Данилов О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 156 с.

42. Котов Б.І. Застосування імпульсно-періодичних режимів вентилювання при реалізації енергоощадної двостадійної технології сушіння зерна / Б.І. Котов, Р.А. Калінченко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. –2003. – № 2. – С. 69 – 74.

43. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин – М.: КолоСС, 2004. – 240 с.

44. Малин Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна / Н.И. Малин – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром – сть). – 1991. – 46 с.

45. Резчиков В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна / В.А. Резчиков – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром-сть). – 1991. – 56 с.

46. Станкевич Г. М. Модульних зерносушарок у нас ще немає, а шахтні і рециркуляційні досить енергоємні / Г. М. Станкевич // Зерно і хліб – 2006. – № 4. – С. 47.

47. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок/ П.Д. Лебедев – М.:Госэнергоиздат, 1963. – 320 с.

48. Гинзбург А.С. Современное состояние и пути развития зерносушильной техники / А.С. Гинзбург , В.А. Резчиков – М.: ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1967.

49. Календерьян В.А. Теплообмен и сушка в движущемся плотном слое / В.А. Календерьян, В.В. Корнараки – К.: Вища школа, 1982. – 160 с.

50. McLean K. A. Drying and storing combinable crops// Farming Press Ltd. London. 1980. P. 28.

51. http://zerno-ua.com/?p=5773 – офіційний сайт журналу «Зерно».

52.. http://www.agroimpuls.com/index.php. – каталог продукції фірми Araj (Польща).

53. Окунь Г. К. Тенденции развития технологии и технических средств сушки зерна / Г. К. Окунь, А. Г. Чижиков – М.: ВНШТЭИагропром, 1987.– 52 с.

54. Moridge Grain Dryers. Проспект фирмы Moridge Mfg., Inc. (США). (ЦОСИФ ВНИИТЭИ агропрома, И – 705).

55. http:// www.ukrbiznes.com/websiteview.php?id=59951. – каталог продукції фірми Riela (Німеччина).

56. www.stela-drying-technology.de – каталог продукції фірми Stela (Німеччина).

57. zbut@kmz.poltava.ua – каталог продукції Карловський МЗ (Україна).

58. Law. Sechoirs Continus Industriels. Проспект фирмы Law (Франция). (ЦОСИФ ВНИИТЭИагропром, И – 701).

59. www.fficorp.com/english/farmfans.html – каталог продукції фірми Farm Fans (США).

60. www.sukup.com/ – каталог продукції фірми Sukup MFG., Co. (США).

61. www.grainsystems.com/ – каталог продукції фірми Grain systems.Inc. (США).

62. www.mathewscompany.com/ – каталог продукції фірми Mathews Company (США).

63. Нагорский И. Повышение эффективности сушки зерна / И. Нагорский, С. Карташевич, А. Тимошек [и др.] // Комбикормовая промышленность. – 1998. – № 1.– С. 16.

64. Чижиков А. Г. Оборудование для сушки зерна / А. Г. Чижиков, Г. К. Окунь // Комбикормовая промышленность. – 1996. – № 2.– С. 12 – 14.

65. www agrobiznes.ru/agro/agroprod – каталог продукції заводу Брянсельмаш (Бєларусь).

66. www. mela.com.ua/ – каталог продукції фірми Mela (Німеччина).

67. www.agrex.com/ – каталог продукції фірми Agrex (Німеччина).

68. www.ag-projects.com/. – каталог продукції фірми Ag – Progect (Польща).

69. www. mepu.com.ua/ – каталог продукції фірми Mepu (Фінляндія).

70. www.volgograd.ru/catalog/zernomontazh.org – каталог продукції фірми АО ”Зерномонтаж" (Росія).

71. www.melinvest.ru/ – каталог продукції фірми QED – Мельинвест (Росія).

72. Сорочинський В. Зневоднення зерна за різних схем утилізації сушильного агента й охолоджуючого повітря може бути доволі ефективно // Зерно і хліб – 2011, №3 – С. 40 – 41.

73. Снежкин Ю.Ф. Исследование кинетики сушки семенного рапса в элементарном слое / Ю.Ф. Снежкин, В.М. Пазюк, Р.А. Шапарь, Т.А. Михайлик, Ж.А. Петрова // Вібрація в техніці та технологіях – 2008. – № 1. – С. 93 – 95.

74. Снежкин Ю.Ф. Исследование влияние параметров на кинетику и всхожесть семян рапса / Ю.Ф. Снежкин, В.М. Пазюк, Т.А. Михайлик, Ж.А. Петрова // Промышленная теплотехника. – 2010. – Том 32, № 3. – С. 37 – 42.

75. Реєстр сортів України на 2000 рік. Ч.1. Зернові, круп'яні, зернобобові, олійні, технічні, прядивні, кормові, овочеві, баштанні культури та картопля. – Київ, 1999. – 45 с.

76. ДСТУ 4138 – 2002 . Насіння сільськогосподарських культур. Методи аналізування вологості насіння. – К.: Держспоживстандарт. – 2003. – С. 16 – 17.

77. Снежкін Ю.Ф. Вплив режимів режиму сушіння на якісні показники зерна насіннєвого призначення / Ю.Ф. Снежкін, В.М. Пазюк, Ж.А. Петрова // Наукові праці ОДАХТ, Одеса. – 2011. – Вип. 40, Т.1. – С. 39 – 43.

78. Уколов В.С. Тепло- и температуропроводность слоя риса-зерна в зависимости от влажности / Уколов В.С., Сорочинский В.Ф. // Хранение и переработка зерна. Серия: Элеваторная промышленность. -М.:ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1980. Вып.3. – С. 3 – 5.

79. Снежкін Ю.Ф. Відстежимо закономірності зневоднення пшениці, ячменю та вівса в елементарному шарі в залежності від вологості теплоносія / Ю. Снежкін, Ж. Петрова, Т. Михайлик, В. Пазюк // Зерно і хліб – 2011, №2 – С. 46 – 47.

80. ДСТУ 4138 – 2002 . Насіння сільськогосподарських культур. Методи аналізування схожості насіння. – К.: Держспоживстандарт. – 2003. – С. 10 – 14.

81. ДСТУ 2240 – 1993. Насіння сільськогосподарських культур. Сортові та посівні якості. Технічні умови. – К.: Держстандарт України – 1993 – 74 с.

82. Снежкин Ю.Ф. Разработка оптимальных режимов и способов сушки семенного рапса / Ю.Ф. Снежкин, Д.М. Чалаев, Р.А. Шапарь, Ж.А. Петрова, Т.А. Михайлик, В.М. Пазюк // Зернові продукти і комбікорма. – 2006. – № 4. – С. 38 – 41.

83. Снєжкін Ю.Ф. Дослідження циклічних параметрів процесу сушіння насіннєвого ріпаку / Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк // Вібрація в техніці та технологіях. – 2007. – № 4. – С. 69 – 70.

84. Бондарь А.Г. Планирование эксперимента при оптимизации процессов химической технологии (алгоритмы и примеры): Учеб. пособие / А.Г. Бондарь, Г.А. Статюха, И.А. Потяженко – К.: Вища школа, 1980. – 264 с.

85. Федоров В.Г., Плесконос А.К. Планирование и реализация экспериментов в пищевой промышленности / В.Г. Федоров, А.К. Плесконос – М.: Пищевая промышленность, 1980. – 230 с.

86. Остапчук Н.В. Математическое моделирование процессов пищевых производств: Сб. задач: Учеб. пособие /Н.В. Остапчук, В.Д. Каминский, Г.Н. Станкевич, В.П. Чугуй – К.: Вища школа, 1992. – 175 с.

87. Янцевич А.А. Планирование эксперимента: Учеб. пособие для студ. экон. и техн. спец. вузов / А.А. Янцевич, Ю.А. Александров – Х.: Издательство НУА, 2004. – 208 с.

88. Пазюк В. М. Математична обробка експериментальних досліджень сушіння насіннєвого ріпаку методом багатофакторного експерименту / В.М Пазюк., Ю.Ф. Снєжкін, В.П. Янович // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету. – 2010. – № 4. – С. 30 – 33.

89. Снєжкін Ю.Ф. Теплові насоси в системі теплохолодопостачання / Ю.Ф. Снєжкін, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврин, Н.О. Дабіжа – К.: ТОВ «Поліграф – Сервіс», 2008 – 104 с.

90. Снежкин Ю.Ф. Интенсификация процесса сушки семенного зерна – рапса в теплонасосной сушильной установке / Ю.Ф. Снежкин, В.М. Пазюк, Т.А. Михайлик // Наукові праці ОДАХТ. – Одеса: 2009. – Том 2. Вип. 35. – С. 197 – 200.

91. Снєжкін Ю.Ф. Енергозберігаючий спосіб сушіння насіння ріпаку на теплонасосній зерносушарці / Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврін, В.Г. Олейниченко // Відновлювальна. енергетика. – 2010. – № 2. – С. 56 – 59.

92. Сычев В.В. Термодинамические свойства воздуха / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов, Г.А. Спиридонов, В.А. Цымарный – М.: Издательство стандартов, 1978. – 276 с.

93. www.copelandbuy.ru – каталог продукції фірми Copeland.

94. ГОСТ 28293 – 89. Зерносушилки шахтные. Показатели энергопотребления. – М.: Изд-во стандартов, 1990. – 4 с.

95. Інструкція по сушінню продовольчого, кормового зерна, насіння олійних культур та експлуатації зерносушарок – К.: АК „Хліб України”, 1997. – 72 с.

96. Пазюк В.М. Интенсивность и энергетическая целесообразность проведение процессов сушки семенного зерна рапса при использовании современного энергосберегающего оборудования // Современные энергосберегающие тепловые технологи (Сушка и термовлажностная обработка материалов) СЭТТ – 2011»: труды IV международной научно-практическая конференция, 20 – 23 сентября 2011 г. – Москва, 2011. – Т. 2. – С. 96 – 99.

97. Лыков А.В. Теория сушки / А.В. Лыков – М.: Энергия, 1968. – 471 с.

98. Филоненко Г. К. Сушильные установки / Г. К. Филоненко, П. Д. Лебедев – М.: Госэнергоиздат. – 1952. – 264 с.

99. Кротович В. Л. Техническая биохимия / В. Л. Кротович. – М.: Высшая школа. – 1973. – 456 с.

100. Красников В.В. Кондуктивная сушка / В.В. Красников – М.: Энергия, 1973. – 288 с.

101. Михайлов Ю.А. Сушка перегретым паром / Ю.А. Михайлов – М.: Энергия, 1967. – 200 с.

102. Гухман А. А. Введение в теорию подобия / А. А. Гурман – М.: Высшая школа, 1963. – 256 с.

103. Гухман А. А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло – массообмена / А. А. Гурман – М.: Высшая школа, 1967. – 303 с.

104. Данилов В.А. Высокоинтенсивная конвекционная сушка бумаги и картона /В.А. Данилов, В. В. Красников – М.: Колос, 1970. – 432 с.

105. Данилов О.Л. Экономия энергии при тепловой сушке / О.Л. Данилов, Б.И. Леончик – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 156 с.

106. Котов Б.І. Застосування імпульсно-періодичних режимів вентилювання при реалізації енергоощадної двостадійної технології сушіння зерна / Б.І. Котов, Р.А. Калінченко // Електрифікація та автоматизація сільського господарства. –2003. – № 2. – С. 69 – 74.

107. Малин Н.И. Справочник по сушке зерна / Н.И. Малин – М.: КолоСС, 2004. – 240 с.

108. Малин Н.И. Снижение энергозатрат на сушку зерна / Н.И. Малин – М.ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром – сть). – 1991. – 46 с.

109. Резчиков В.А. Теория и практика энергосбережения при сушке зерна / В.А. Резчиков – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром-сть). – 1991. – 56 с.

110. Бурдо О. Г. Новые принципы термообработки зерна / О. Г. Бурдо, А. В. Зыков, С. Гайда.// Наукові праці ОДАХТ, Одеса. – 1999. – Вип.20. – С. 223 – 229.

111. Гайда С. Утилизация тепла в сушильных установках. / С. Гайда, А. Зыков // Наукові праці ОДАХТ, Одеса. – 2001. – Вип.21. – С. 52 – 55.

112. Бурдо О. Г. Новые теплотехнологии зерносушения / О. Г. Бурдо, А. В. Зыков, С. И. Милинчук // Зернові продукти і комбікорма. – 2006. – №3. – С. 16 – 21.

113. А. с. № 2279615 (Россия), МПК F 26 B 21/04 F 25 B 29/00. Утилизатор теплоты отработавшего сушильного агента конвективных сушилок. Гавриленков А. М., Харченков К. В., Ширимов А.Н., Кулинченко В. А. – № 2005106771/06; заявл. 09.03.2005; опубл. 10.07.2006 Бюл. № 23.

114. Сорочинський В. Ф. Эффективный способ двухстадийной сушки зерна / В.Ф. Сорочинський // Комбикормовая промышленность. – 1996. – № 4. – С. 17 – 18.

115. Сорочинский В.Ф., Грязнов В.Л. Технология сушки и активного вентилирования зерна риса / В.Ф. Сорочинский, В.Л. Грязнов // Пищевая пром-сть. – 1997.– № 3. – С. 10 – 11.

116. Шевцов А. А., Дранников А. В., Крячко А.В. Алгоритм управления процессом сушки термолабильных материалов в двухступенчатой теплонасосной сушильной установке / А. А. Шевцов, А. В. Дранников, А.В. Крячко // Хранение и переработка сельхозсырья – 2006. – №10. – С. 79 – 80.

117. Imre L. Solar assisted dried for seeds / L. Imre, L. Fabry, L. Gemes, G. Hecker // Drying Technology. – 1990. – № 8. P. 343 – 349.

118. Чайченец Н.С. Теплонасосные сушильные установки для зерна / Н.С. Чайченец – М.: ЦНИИТЭИ хлебопродуктов, (Обзорная информация. Сер. Элев. пром-сть). – 1990. – 52 с.

119. Калнинь И.М. Условия эффективного применения диоксида углерода в качестве рабочего вещества тепловых насосов / И.М. Калнинь, В.А. Васютин, С.Б. Пустовалов // Холодильная техника. – 2003. – № 7. – С. 8 – 12.

120. Калнинь И. М. Тепловые насосы нового поколения. использующие экологически безопасные рабочие вещества / И.М. Калнинь, А. И. Савицкий, Пустовалов С. Б.// Холодильная техника – 2007. – №1. – С. 47 – 49.

121. Нестеренко А.В. Основы термодинамических расчётов вентиляции и кондиционирования воздуха / А.В. Нестеренко – М.: Высшая школа, 1965. – 395 с.

122. Патент України UA 49118 МПК F26B1/00 Теплонасосна зерносушарка / Снєжкін Ю.Ф., Пазюк В.М., Чалаєв Д.М., Шаврин В.С.; заявник та патентовласник Інститут технічної теплофізики Національної академії наук. – № 200912288/09; заявл. 30.11.2009; опубл. 12.04.2010. Бюл. № 7.

123. Снежкин Ю.Ф. Использование теплового насоса для сушки зерновых культур / Ю.Ф. Снежкин, В.М. Пазюк, Д.М. Чалаев, В.С. Шаврин // Наукові праці ОДАХТ. – Одеса: 2010. – Вип. 27. – С. 278 – 281.

124. Снєжкін Ю.Ф. Енергозберігаючі технології сушіння зерна. Техніко-економічні характеристики існуючих зерносушарок / Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування: 1 міжнародний конгрес, 28 – 29 травня 2009 р.: тези доп. – Л.: Національний університет «Львівська політехніка», 2009. – С. 92.

125. Снєжкін Ю. Ф. Енергоефективна теплонасосна схема сушіння насіння ріпаку та інших зернових культур на базі газового двигуна генератора ДвГА – 315 / Ю.Ф. Снєжкін, В.М. Пазюк, Д.М. Чалаєв, В.С. Шаврин // Збірник наукових праць Вінницького державного аграрного університету: матеріали науково-технічної конференції «Земля України – потенціал енергетичної та екологічної безпеки держави», 24 – 26 березня 2010 р. – Вінниця, ВНАУ, 2010. – № 42, т.2. – С. 129 – 132.

126. www.rtpp.com.ua/firms/4/55.html – каталог продукції фірми «Первомайскдизельмаш».

127. www. ekoteplo. com. – каталог продукції ТОВ „Науково – виробнича фірма „Екотепло”.

128. Хранение зерна. Современное оборудование для: транспортировки, хранения, сушения фирмы ARAJ (Польща) – К.: фирма ARAJ, 2003. – 36 с.

129. http://dozor.kharkov.ua/dengi/ceny/1083692.html

130. http://kyivenergo.ua/ua/for-consumers/price/16-price/1191-el – сайт Київенерго.

ЗМІСТ

ВСТУП 3
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА . . 4
1.1. Характеристика насіннєвого зерна як об’єкту сушіння 4
1.2. Огляд досліджень з сушіння насіннєвого зерна 14
1.3. Обладнання для сушіння насіннєвого зерна 20
РОЗДІЛ 2. ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА КОНВЕКТИВНИМ МЕТОДОМ 45
2.1. Конвективний сушильний стенд 45
2.2. Визначення режимів сушіння та їх вплив на кінетику процесу 47
2.3. Вплив режимів сушіння на якісні показники насіння 58
2.4. Математична обробка проведених експериментальних досліджень . 62
РОЗДІЛ 3. ЗНЕВОДНЕННЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА КОНДЕНСАЦІЙНИМ МЕТОДОМ 75
3.1. Теплонасосна дослідна зерносушарка 76
3.2. Вплив режимів сушіння на кінетику процесу 80
3.3. Вплив режимів сушіння на енергоефективність, інтенсивність процесу сушіння та якість насіннєвого зерна 93
. . .
РОЗДІЛ 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЛОГОБМІНУ ПРИ СУШІННІ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА 100
4.1. Дослідження кінетики тепловологообміну при сушінні насіннєвого зерна. 100
4.2. Кінетика вологообміну при сушінні насіннєвого зерна 106
4.3. Кінетика теплообміну при сушінні насіннєвого зерна 114
РОЗДІЛ 5. СТВОРЕННЯ ТЕПЛОНАСОСНОЇ ЗЕРНОСУШАРКИ ДЛЯ НАСІННЄВОГО ЗЕРНА 116
5.1. Теплові насоси як напрямок підвищення енергоефективності зерносушарок 116
5.2. Теплонасосна зерносушарка періодичної дії 131
5.3. Розробка шахтної прямоточної теплонасосної зерносушарки безперервної дії 135
. . . . .
5.4. Техніко-економічне обґрунтування теплонасосної зерносушарки . . 141
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ 148

Снєжкін Ю.Ф., 1947 року народження, в 1971 році закінчив Київський політехнічний інститут і з цього року працює в Інституті технічної теплофізики інженером, зав. науково-дослідною групою, завідувачем лабораторією, завідувачем відділом, керівником відділення, заступником директора Інституту з наукової роботи. Кандидат технічних наук з 1981 року. В1993 року захистив докторську дисертацію. В 1997 році обраний член-кореспондентом НАН України за спеціальністю теплоенергетика, а в 2006 році – академіком Міжнародної академії холоду. Ю.Ф. Снєжкін – професор кафедри машин і апаратів хімічних та нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «КПІ», почесний професор Казахського інженерно-технологічного університету.

Науковий напрямок – розробка теорії та методів розрахунку тепломасопереносу, фазових перетворень та деформування при сушінні колоїдних капілярно-пористих тіл, дослідження особливостей термодинамічного аналізу циклів термотрансформаторів і питання їхнього використання для удосконалення існуючих та розробки нових енерго- і ресурсозберігаючих теплотехнологій та обладнання.

Результати наукової діяльності Снєжкіна Ю.Ф. знайшли своє відображення в 510 працях у галузі теплоенергетики, з яких 105 авторських свідоцтв та патентів і 7 монографій. Він підготував 11 кандидатів технічних наук. Про високий рівень наукових результатів Снєжкіна Ю.Ф. свідчить присудження Державних премій СРСР та України в галузі науки і техніки(1984, 2006 р.р.). В 2000 році Ю.Ф. Снєжкін одержав звання лауреата премії заснованою Президентами академії наук України, Білорусії і Молдови, в 2007 році – звання лауреата премії НАН України ім.. В.І. Толубинського, нагороджений золотою та срібною медалями ВДНГ СРСР, «Почесною грамотою Президії Національної академії наук України», відзнакою НАН України «За професійні здобутки», йому присвоєне звання «Винахідник СРСР», «Кращий винахідник Національної академії наук України», в 2010 році нагороджений «Почесним знаком науково-технічної спілки енергетики та електротехніків України».