



Дідух В.Ф.,
Федік Л.Ю.

ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ

В.Ф. ДІДУХ, Л.Ю. ФЕДІК

**ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ
РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ**

монографія

**Луцьк
ІВВ Луцького НТУ
2017**

УДК 631.536.2

*Рекомендовано до друку
Вченою радою Луцького національного технічного університету
(протокол № від вересня 2017 р.)*

Рецензенти:

Шевчук Р.С. .доктор сільськогосподарських наук Росії,
доцент Львівського національного аграрного університету,
Налобіна О.О. доктор технічних наук, професор Національного університету
водного господарства і природокористування
Дударєв І.М. доктор технічних наук, доцент Луцького національного
технічного університету

Д Дідух В.Ф.

Технологічного сушіння рулонів льонотрести: монографія / В. Ф. Дідух,
Л. Ю. Федік. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2017. – 110 с.

УДК 631.536.2

.....

© Дідух В.Ф., Федік Л.Ю.
Луцький національний
технічний університет,
2017

ЗМІСТ

Вступ.....	6
1. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ	7
1.1. Аналіз процесу сушіння льонотрести в рулоні.....	7
1.2. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести.....	11
1.3. Розрахунок витрати сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести.....	17
1.4. Визначення моменту інерції рулону льонотрести.....	22
1.5. Дослідження процесу кочення рулону по похилій площині.....	27
1.6. Висновки.....	34
2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	35
2.1. Програма і загальна методика експериментальних досліджень та обробка результатів.....	35
2.2. Лабораторне обладнання, прилади та апаратура для проведення досліджень.....	36
2.3. Дослідження фізико-механічних характеристик льонотрести.....	38
2.3.1. Дослідження вологості льонотрести.....	38
2.3.2. Дослідження щільності пресування льонотрести в рулоні.....	40
2.4. Дослідження параметрів сушильного агента та необхідної кількості повітря для сушіння рулонів льонотрести.....	41
2.5. Дослідження зміни висоти шарів льонотрести в рулоні та дослідження процесу кочення рулону по похилій площині.....	42
2.6. Дослідження сушіння рулонів льонотрести на експериментальній установці.....	43
3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	44
3.1. Порівняння методів сушіння рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення.....	44
3.1.1. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із застосуванням відлежування та принципу протитечії.....	44
3.1.2. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із	47

застосуванням принципу протитечії.....	
3.1.3. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести при попередній подачі сушильного агента і атмосферного повітря в нерухомому товстому шарі.....	48
3.1.4. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із попеременною подачею сушильного агента і атмосферного повітря та застосування принципу протитечії.....	49
3.2. Визначення кінцевої вологості рулонів льонотрести під час сушіння в трисекційній сушарці.....	52
3.3. Визначення коефіцієнта вологопоглинаючої здатності сушильного агента.....	57
3.4. Визначення витрати сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести.....	60
3.5. Визначення моменту інерції рулонів льонотрести.....	61
3.6. Дослідження процесу кочення рулонів по похилій площині.....	63
3.7. Інженерне обґрунтування конструкції секції сушильної камери.....	66
3.8. Висновки.....	67
4. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ СУШІННЯ РУЛОНІВ ЛЬНОТРЕСТИ З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ РОЗМІЩЕННЯ	68
4.1. Пропонує установка для технологічного процесу сушіння рулонів льонотрести.....	68
4.2. Аналіз установок для сушіння рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення.....	71
4.3. Висновки.....	98
Список використаних джерел.....	99
Додатки.....	105

ВСТУП

Однією з основних технічних культур, що культивується в Поліських районах України, є льон-довгунець. З нього отримують продукцію одночасно трьох видів: волокно, насіння і костру, кожна з яких – це цінна сировина для промисловості. Збільшення виробництва льоноволокна і продукції з нього – один з найбільш перспективних шляхів для виходу України на світовий ринок і забезпечення внутрішніх потреб населення у výroбах текстильної промисловості.

У період збирання льонотрести природно-кліматичні умови часто перешкоджають процесу доведення матеріалу до нормованої вологості шляхом природного сушіння. Тому льонотреста з підвищеною вологістю вимагає своєчасного її зниження, з метою зберігання матеріалу. Технологія збирання льонотрести передбачає формування її в паковки циліндричної форми. Така форма паковки дозволяє широко використовувати засоби механізації та забезпечити «перенесення» стрічки комбайнового розстелу з поля в технологічну лінію первинної переробки без збільшення розтягнутості стебел. У процесі переробки стебла льонотрести, розмотані в стрічку, піддають штучному сушінню, що потребує значних енерговитрат, зменшити які можна під час сушіння льонотрести не в стрічці, а в рулонах.

У зв'язку з цим актуальною проблемою є вдосконалення процесу та засобів сушіння льонотрести в рулонах у господарствах, які спеціалізуються на виробництві льону-довгунця із збереженням якості матеріалу.

Метою роботи є забезпечення максимального використання енергетичного потенціалу сушильного агента, а також зменшення затрат ручної праці на підготовку процесу сушіння рулонів.

У відповідності з поставленою метою визначені завдання дослідження: розробити модель технологічного процесу сушіння рулонів льонотрести; обґрунтувати витрату сушильного агента згідно із запропонованою моделлю сушіння рулонів; встановити закономірності переміщення рулонів по похилій площині, їх швидкість та інерційність; визначити і систематизувати фізико-механічні властивості льонотрести та рулонів; встановити оптимальний метод сушіння льонотрести в рулонах.

1. ТЕОРЕТИЧНЕ ОБГРУНТУВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ

1.1. Аналіз процесу сушіння льонотрести в рулоні

Для зменшення затрат ручної праці під час збирання врожаю льону в дощовому Поліссі та для його зберігання доцільно формувати матеріал у рулони діаметром 1,0 – 1,2 м, а мокрий – просушувати до 19% нормованої вологості за температури сушильного агента 70–90 °С. При цьому льонотреста просушуючих рулонів згідно з фізичними властивостями вологих матеріалів належить до капілярно-пористих колоїдних, а самі рулони – до пористих тіл [13; 14; 50].

Під час дозрівання тканин стебел льону відбувається нерівномірний розподіл розмірів пор, порожнин і капілярів у середині стебла, що приводить до акумуляції при намоканні більшої кількості води внутрішньою частиною стебла. Дане явище підтверджується рис. 1.1, на якому подані криві розподілу вологовмісту за товщиною стінки стебла δ . Тут крива 1 характеризує розподіл вологовмісту відповідно від зовнішньої поверхні $U_{зп}$ до внутрішньої $U_{вп}$ за радіусом стебла R у певний момент сушіння, а крива 2 – розподіл вологовмісту в стані термодинамічної рівноваги. Вологовміст стебла змінюється від $U_{зп}^T$ до $U_{вп}^T$, а криві мають форму парабол. Таким чином проходить висушування окремого стебла. Якщо стебла льону сформувати в рулон з певною щільністю, то в процесі його сушіння в першу чергу видаляється, згідно з класифікацією води в матеріалі з точки зору теорії сушіння, вільна вода матеріалу (найменш міцно зв'язана): це вода з макрокапілярів, великих пор і порожнин, осмотична вода стебел і вода змочування на зовнішніх поверхнях стебел. Після видалення вільної води, в період постійної і падаючої швидкості, видаляється зв'язана (чи гігроскопічна вода) і найбільш міцно зв'язана з матеріалом, вода з макрокапілярів (адсорбційна вода). Остання втримується молекулярним

силовим полем як на зовнішній поверхні стебел $U_{зп}$, так і внутрішній поверхні пор, порожнин, капілярів стебел $U_{вп}$.

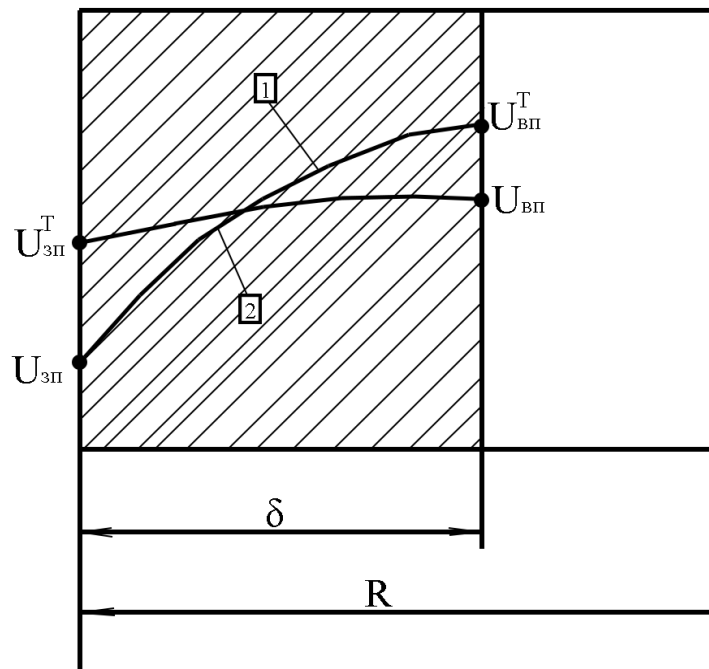


Рис. 1.1. Розподіл вологовмісту в стеблі під час сушіння: 1 – за радіусом стінки в певний момент сушіння; 2 – у стані термодинамічної рівноваги

Збільшення щільності шарів рулонів від центра до периферії, а також створення напрямку потоку сушильного агента вздовж стебел приводять до того, що сушильний агент потрапляє до шарів з меншою щільністю – центральних. Тому нагрівання останніх здійснюється швидше і є причиною нерівномірного просушування рулонів як за висотою, так і за діаметром. Крім цього, нерівномірність сушіння рулонів за висотою виникає у результаті неоднорідності будови стебла за січенням та довжиною. Більш щільний і менш гігроскопічний луб'яний шар під час намокання поглинає води менше, ніж решта шарів.

Для того, щоб уникнути нерівномірності сушіння нагрітому капілярно пористому тілу, необхідно дати час на охолодження відлежуванням або активним охолодженням атмосферним повітрям. У такому випадку пройде

перерозподіл вологи як в окремих стеблах за товщиною δ , так і в рулоні за діаметром і висотою.

Крім цього проведені дослідження свідчать, що під час охолодження чи відлежування проходить зниження загальної вологості в рулоні на деяке значення ΔW (рис. 1.2).

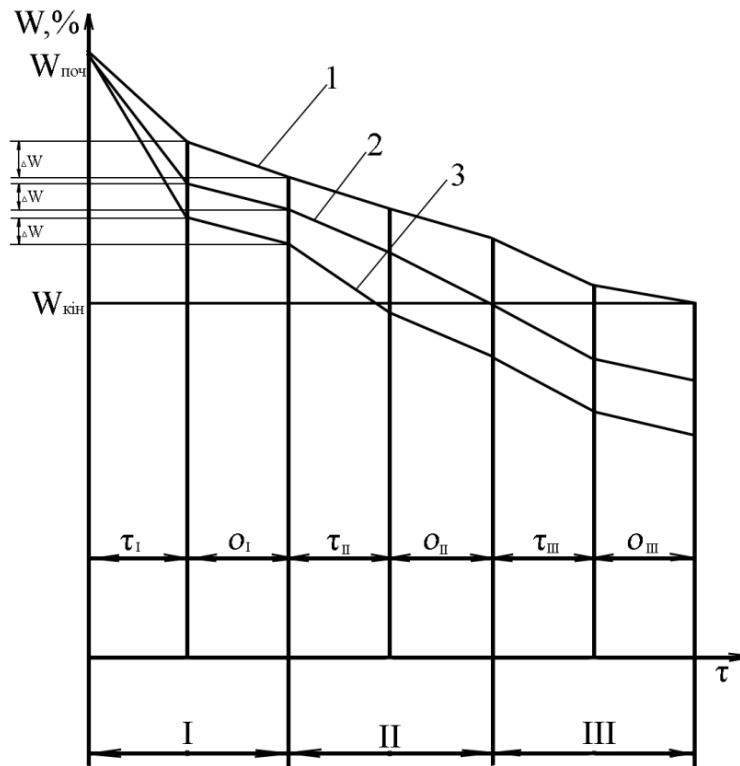


Рис. 1.2. Зміна вологості рулону льонотрести під час періодичного сушіння сушильним агентом і атмосферним повітрям у трисекційній сушарці: 1 – рулон нерухомий; 2 – рулон нерухомий циклічно; 3 – рулон з використанням принципу протитечії

Встановлення оптимальних значень періоду нагріву τ_I , τ_{II} , τ_{III} і відповідно їм періодів охолодження O_I , O_{II} , O_{III} зменшує витрати сушильного агента на сушіння нерухомих рулонів, але збільшує час на їх сушіння.

1.2. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести

Максимальне використання потенціалу сушильного агента можна досягти шляхом його повного насичення вологою в процесі сушіння матеріалу. Таке можливе і у випадку збільшення загального шару, через який проходить сушильний агент.

Модель технологічного процесу сушіння льонотрести в рулонах за встановленого режиму роботи трисекційної сушарки (рис. 1.3), коли усі секції сушарки завантажені, з однаковими технологічними та геометричними початковими параметрами рулонів у секціях сушильної камери, позначені відповідно ступенем 1; 2; 3. Протягом періоду сушіння параметри сушильного агента, а саме: швидкість, температура і вологість (V , t , ϕ), змінюються, а відповідно і змінюється вологість рулонів на ΔW . Після продування рулонів льонотрести сушильним агентом паковки підлягають сушінню атмосферним повітрям або процесу відлежування, позначені на рис. 1.3 W_0 . Даний технологічний процес дає можливість поєднати два методи сушіння сільськогосподарських матеріалів: сушіння рулонів у нерухомому шарі та протитечії у випадку періодичного переміщення рулонів у напрямку джерела підготовки сушильного агента. Для забезпечення виконання даного процесу необхідно застосувати циклічне сушіння причому періоди нагрівання рулонів проходять паралельно з періодами охолодження ($\tau_n = \tau_o$).

У тих рулонах, які знаходяться в сушильних секціях 1, 2, 3, вектор швидкості сушильного агента \vec{V}_{ca} направлений протилежно відносному переміщенню рулонів V_p і паралельний розміщенню стебел у рулоні. А його параметри швидкості V_{ca} , вологовміст d , температура t у кожному з рулонів будуть різними.

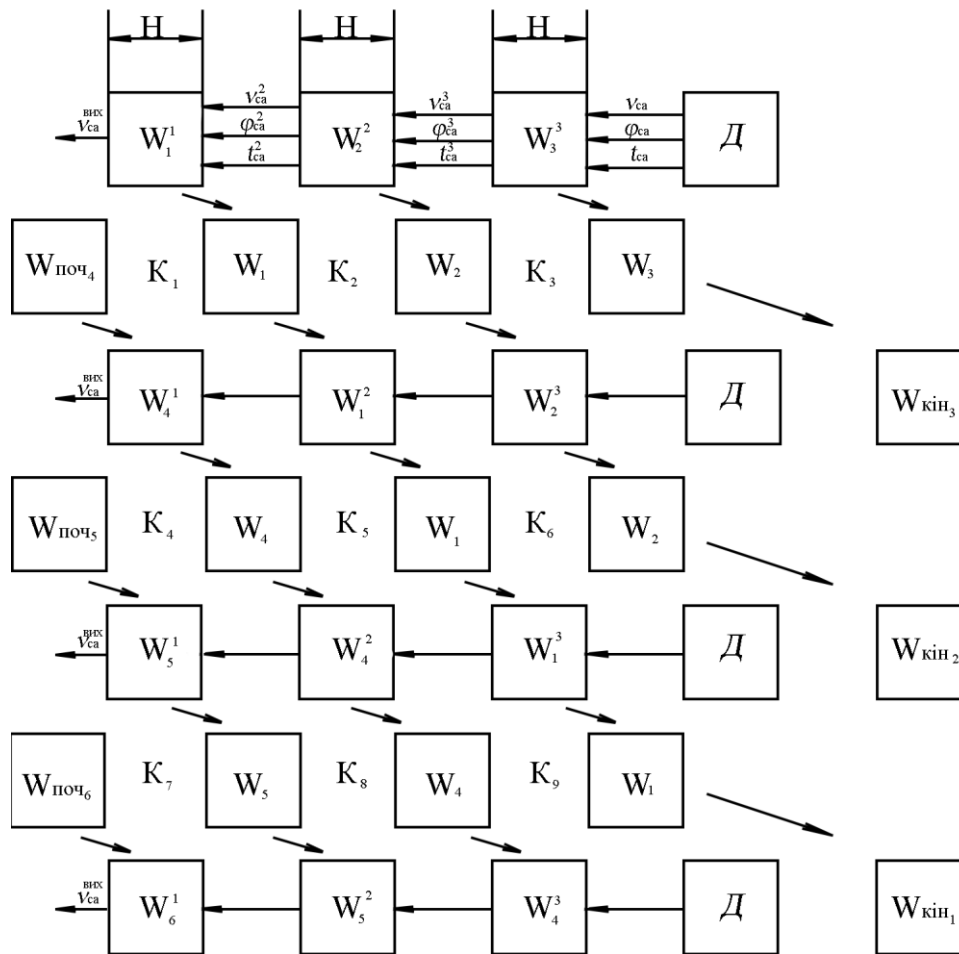


Рис. 1.3. Модель технологічного процесу сушіння при встановленому режимі роботи трисекційної сушарки

Застосування періодичного сушіння дозволяє значно підвищити температуру сушильного агента, бо короткочасна його дія не впливає на якісні параметри льонотрести [21; 24]. У такому випадку можна стверджувати, що всі процеси, що відбуваються, відповідають періодові постійної та падаючої швидкості сушіння.

Для подальших досліджень робимо припущення, що всі рулони, які підлягають сушінню, мають однакові технологічні та геометричні початкові параметри.

У зв'язку з тим, що висота рулонів значно більша постійної фронту для капілярно-пористих тіл рослинного походження [1; 15; 42] під час їх сушіння технологічні параметри матеріалу, вологість W_M і його температура

нагріву t_m , будуть різними як за довжиною L , так і за діаметром D . Тому для вирівнювання величин W_m і t_m передбачено період охолодження. У подальшому робимо припущення, що за період τ_0 дані величини зміняться на деякі значення ΔW_m , Δt_m і набувають нових значень, які можна вважати як середні значення W_{cp} і t_{cp} для кожного рулону, визначених експериментальним шляхом.

Для цього умовно розбиваємо кожен із рулонів на три рівномірно віддалені ексцентричні шари: периферійний 1, середній 2, центральний 3 (рис. 1.4). Температура льонотрести кожного з цих шарів у будь-якій точці протягом періоду постійної швидкості сушіння (максимальне видалення вологи) буде постійною. Хоча в то же час температура на поверхні будь-якого стебла t_n та в середині t_c будуть різними, внаслідок виникнення температурного градієнту (рис. 1.5), який для періоду постійної швидкості сушіння є постійним і в подальших розрахунках ним нехтуємо.

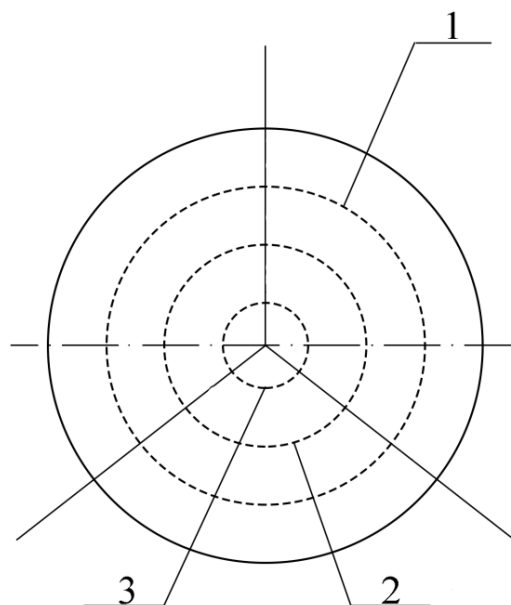


Рис. 1.4. Поділ рулону льонотрести на шари

Вологість за довжиною окремих стебел і рулону в цілому буде змінюватись у залежності від форм стебла, випаровування різних типів вологи та ступеня насичення сушильного агента вологою у напрямі \vec{V}_{ca} .

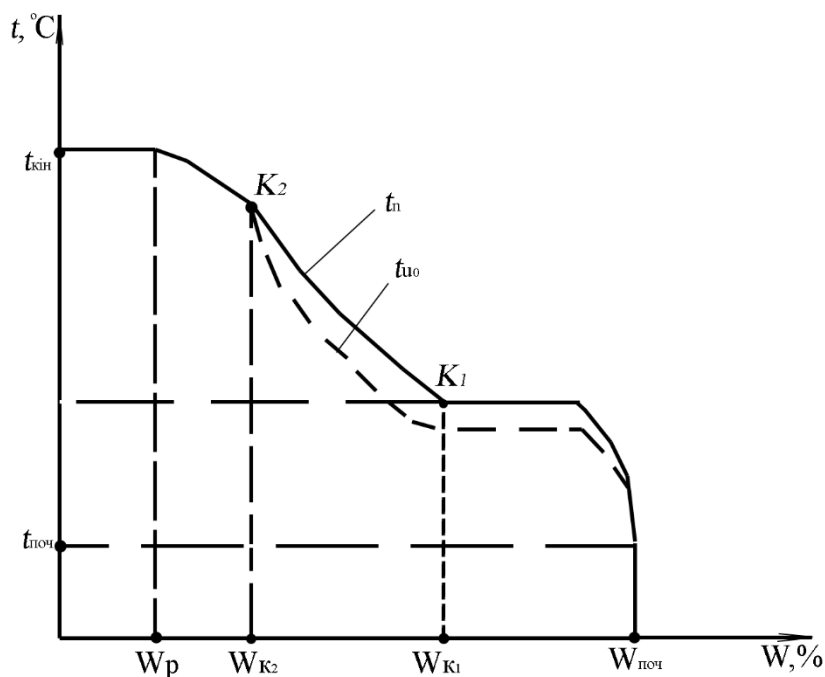


Рис. 1.5. Температурні криві вологого стебла льонотрести для поверхневих (t_n) і центральних (t_u) шарів

Розглянемо окремо періоди нагрівання рулонів та охолодження в процесі сушіння n -ої кількості рулонів під дією сушильного агента загальною висотою товстого шару $3H$, де H – висота тоншого шару (одного рулону), розбитого на площини h (рис. 1.3). Для даного періоду значення швидкості сушіння будь-якого рулону на висоті H можна визначити згідно [49]:

$$N_{кін(H)} = N_h \cdot e^{-\frac{\alpha S}{FV\gamma C_p}} \quad (1.1)$$

де N_h – швидкість сушіння стебел льонотрести в площині контакту з сушильним агентом на вході у матеріал, %/год;

α – коефіцієнт тепловіддачі сушильного агента, ккал/м²·год·°C;

S – сумарна площа поверхні усіх стебел, що продуваються сушильним агентом, м^2 ;

F – січення рулону через яке проходить теплообмін, м^2 ;

V – швидкість сушильного агента, м/год ;

γ – питома вага сушильного агента на виході з сушильної секції, кг/м^3 ;

C_p – теплоємність матеріалу за постійного тиску, $\text{ккал/кг} \cdot ^\circ\text{C}$.

Отже, для визначення швидкості сушіння в кожному з рулонів за один період нагрівання скористаємося формулою (1.1), яка має вигляд:

$$N_{\text{кін}(H_1)} = N_{h(1)} \cdot \frac{\alpha_1 S}{FV_1 \gamma_1 C_{p(1)}}, \quad (1.2)$$

$$N_{\text{кін}(H_2)} = N_{h(2)} \cdot \frac{\alpha_2 S}{FV_2 \gamma_2 C_{p(2)}}, \quad (1.3)$$

$$N_{\text{кін}(H_3)} = N_{h(3)} \cdot \frac{\alpha_3 S}{FV_3 \gamma_3 C_{p(3)}}. \quad (1.4)$$

Вологість матеріалу в будь-якій сушильній секції згідно з рівнянням матеріального балансу визначається за формулою:

$$dSN_{\text{кін}} = m dW_{\text{кін}}, \quad (1.5)$$

де m – зміна маси матеріалу, в якому проходить видалення вологи за відповідний проміжок часу, кг/год .

Або з врахуванням швидкості в кінці періоду сушіння рулону можна записати:

$$W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}} = \frac{1}{m} \int_0^S N_{\text{кін}} dS, \quad (1.6)$$

де $W_{\text{поч}}$ – початкова вологість льонотрести в рулонах, %;

$W_{\text{кін}}$ – значення вологості в площині h даної висоти матеріалу після закінчення періоду сушіння, %.

Короткочасна дія підвищеної температури на льонотресту в рулонах приводить до виникнення градієнтів температур у кожному стеблі окремо, а неоднорідність будови стебел сприяє нерівномірному нагріву стебел за висотою H . Для усунення даного недоліку передбачено період охолодження та відлежування (рис. 1.3), який дорівнює періоду нагріву рулонів $\tau_0 = \tau_n$; $\tau_0 + \tau_n = \tau_v$, де τ_v – період відлежування. Проте в процесі продування атмосферним повітрям (процес охолодження) відбувається перерозподіл вологи і температури як у самих стеблах, так і в рулоні, що приводить до зниження середньої вологості $W_{\text{ср}}$ на деяке значення ΔW , яке можна виразити через коефіцієнт зниження вологості під час охолодження та відлежування, що визначається експериментально. Тому можна записати:

$$K_n = \frac{W_{\text{ср}}^n}{W_{\text{ср}}} \cdot B_i \cdot E, \quad (1.7)$$

де $W_{\text{ср}}$ – середня вологість рулону після охолодження та відлежування, %;

n – порядковий номер секції сушарки, в якій (чи після якої) відбувається даний процес;

B_i – критерій Біо, коефіцієнт внутрішнього вологопереносу в стеблах льонотрести під час періоду охолодження;

E – коефіцієнт, який враховує зміну вологості в рулоні під час відлежування.

Отже, з врахуванням (1.6) і (1.7), будемо мати:

$$(W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}(n)}) \cdot K_n = \frac{1}{m_n} \int_0^S N_{\text{кін}} dS. \quad (1.8)$$

Для трьох рулонів після охолодження та відлежування можна записати:

$$(W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}(1)}) \cdot K_1 = \frac{1}{m_1} \int_0^S N_{\text{кін}(1)} dS, \quad (1.9)$$

$$(W_{\text{кін}(1)} - W_{\text{кін}(2)}) \cdot K_2 = \frac{1}{m_2} \int_0^S N_{\text{кін}(2)} dS, \quad (1.10)$$

$$(W_{\text{кін}(2)} - W_{\text{кін}(3)}) \cdot K_3 = \frac{1}{m_3} \int_0^S N_{\text{кін}(3)} dS. \quad (1.11)$$

Якщо врахувати, що $FV\gamma$ являють собою вагу повітря, в якому знаходиться волога $G_{\text{са}}(1 + d_1)$, то зниження вологості матеріалу за цикл сушіння для трьох секцій сушарки становить:

$$(W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = \frac{G_{\text{са}(1)}(1 + d_{1(1)})}{m_1} \cdot \frac{C_{\text{р}(1)}}{\alpha_1} (N_{\text{поч}(1)} - N_{\text{кін}(1)}) + \frac{G_{\text{са}(2)}(1 + d_{1(2)})}{m_2} \cdot \frac{C_{\text{р}(2)}}{\alpha_2} (N_{\text{поч}(2)} - N_{\text{кін}(2)}) + \frac{G_{\text{са}(3)}(1 + d_{1(3)})}{m_3} \cdot \frac{C_{\text{р}(3)}}{\alpha_3} (N_{\text{поч}(3)} - N_{\text{кін}(3)}) \quad (1.12)$$

де $W_{\text{кін}}$ – кінцева (нормована) вологість льонотрести в рулонах, %.

Для врахування коефіцієнта вологовіддачі матеріалу $(t_{\text{поч(са)}} - t_{\text{поч(м)}}) \cdot r$, де $t_{\text{поч(са)}}$, $t_{\text{поч(м)}}$ – відповідно початкові температури сушильного агента на вході в сушильні секції та на поверхні матеріалу, °C; r – теплота пароутворення, ккал/кг, необхідно значення кожного з складових помножити і розділити на даний коефіцієнт.

Отже, вираз (1.12) запишемо як:

$$(W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = \frac{G_{\text{са}(1)}(1 + d_{1(1)})}{m_1} \cdot \frac{C_{\text{р}(1)}}{\alpha_1} (N_{\text{поч}(1)} - N_{\text{кін}(1)}) + \frac{G_{\text{са}(2)}(1 + d_{1(2)}) \cdot C_{\text{р}(2)} \cdot (t_{\text{поч(са)}(2)} - t_{\text{поч(м)}(2)})}{m_2 \cdot r_2 \cdot \frac{\alpha_2}{r_2} \cdot (t_{\text{поч(са)}(2)} - t_{\text{поч(м)}(2)})} + \frac{G_{\text{са}(3)}(1 + d_{1(3)}) \cdot C_{\text{р}(3)} \cdot (t_{\text{поч(са)}(3)} - t_{\text{поч(м)}(3)})}{m_3 \cdot r_3 \cdot \frac{\alpha_3}{r_3} \cdot (t_{\text{поч(са)}(3)} - t_{\text{поч(м)}(3)})}, \quad (1.13)$$

$$\text{де } G_{\text{са}}(1 + d_1) \cdot C_p \cdot (t_{\text{поч(са)}} - t_{\text{поч(м)}}) = m_{\text{в}}(i''_{\text{п}} - 4,19 \cdot t_{\text{м}}) =$$

$G_{\text{поч(са)}}$ – максимальна кількість тепла, що передається сушильним агентом.

У свою чергу $m_{\text{в}}$ – кількість випареної вологи під час сушіння в сушильних секціях, кг/год;

$i''_{\text{п}}$ – тепловміст пари в повітрі на виході з секції, кДж/кг;

4,19 – теплоємність води, кДж/кг·°С.

Тепловміст пари в повітрі $i''_{\text{п}}$ дорівнює $2500 + 1,97t$ [44, С. 146], де 2500 – тепловміст насиченої пари при 0 °С, кДж/кг; t – температура пари та повітря на виході з секції, °С.

Враховуючи, що $\alpha \cdot \frac{(t_{\text{поч(са)}} - t_{\text{поч(м)}})}{r}$ – швидкість сушіння в сушильній камері, то зниження вологості послідовно розміщених рулонів льонотрести в трисекційній сушарці за цикл сушіння можна визначити згідно формули:

$$\begin{aligned} & (W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 = \\ & \frac{G_{\text{са}(1)}(1 + d_{1(1)}) \cdot C_{p(1)} \cdot (t_{\text{поч(са)}(1)} - t_{\text{поч(м)}(1)})}{m_{\text{в}} \cdot r_1 \cdot \frac{\alpha_1}{r_1} \cdot (t_{\text{поч(са)}(1)} - t_{\text{поч(м)}(1)})} \quad (1.14) \\ & (W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}) \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \\ & = \frac{G_{\text{са}(1)}}{m_1 \cdot r_1} \left(1 - \frac{N_{\text{кін}(1)}}{N_{\text{поч}(1)}} \right) + \frac{G_{\text{са}(2)}}{m_2 \cdot r_2} \left(1 - \frac{N_{\text{кін}(2)}}{N_{\text{поч}(2)}} \right) \\ & + \frac{G_{\text{са}(3)}}{m_3 \cdot r_3} \left(1 - \frac{N_{\text{кін}(3)}}{N_{\text{поч}(3)}} \right). \end{aligned}$$

1.3. Розрахунок витрати сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести

Технологічний процес виробництва льону включає операцію сушіння льонотрести в паковках сформованої в полі, як правило, циліндричної форми у вигляді рулонів. Рулони розмотують на льонозаводах у стрічку товщиною

4–5 см, після чого продувають сушильним агентом. Такий метод сушіння веде до зниження ККД сушарки через неповне використання максимального потенціалу сушильного агента. Тому сушіння льонотрести з високою відносною початковою вологістю проводять у рулонах до їх розмотування з вертикальнорозміщеною центральною віссю. Таке сушіння найбільш поширене, проте операції встановлення рулонів вимагають додаткових механізмів, які ускладнюють конструкцію сушарки, що приводить до значних енерговитрат.

Зменшення витрат енергоносіїв і максимальне використання потенціалу сушильного агента можна реалізувати за послідовного розміщення n -ї кількості рулонів з горизонтальною центральною віссю у герметичній камері сушарки. Сушіння послідовно декількох рулонів можна розглядати як сушіння суцільної маси матеріалу в нерухомому товстому шарі, до початку процесу якого вологість усіх рулонів однакова $W_{\text{поч}}$. Діаграма зміни вологості за висотою товстого шару (рис. 1.6) має вигляд прямокутника ОВСД, а крива вологості вертикальної прямої СД.

Тоді масова витрата сушильного агента згідно [22] буде визначатися за формулою:

$$Q = \frac{1000 \cdot \rho_a \cdot m_p}{\tau \cdot \varepsilon} \cdot \frac{W_{\text{поч}} - W_{\text{кін}}}{100 - W_{\text{кін}}}, \quad (1.15)$$

де ρ_a – щільність сушильного агента, кг/м³; $\rho_a = 1,2$ кг/м³;

m_p – загальна маса рулонів, г;

τ – час сушіння, с;

ε – коефіцієнт, який характеризує вологопоглинаючу здатність сушильного агента та являє собою масу води в г, яка видаляється 1 м³ сушильного агента, г/м³;

$W_{\text{поч}}, W_{\text{кін}}$ – відповідно початкова та кінцева (нормована) вологість льонотрести в рулонах, %.

Графічно зниження вологості з часом у нерухомому товстому шарі буде відображатися кривою 1 (рис. 2.6). Форма кривої в певний момент часу, залежатиме від коефіцієнта ϵ та пористості рулонів.

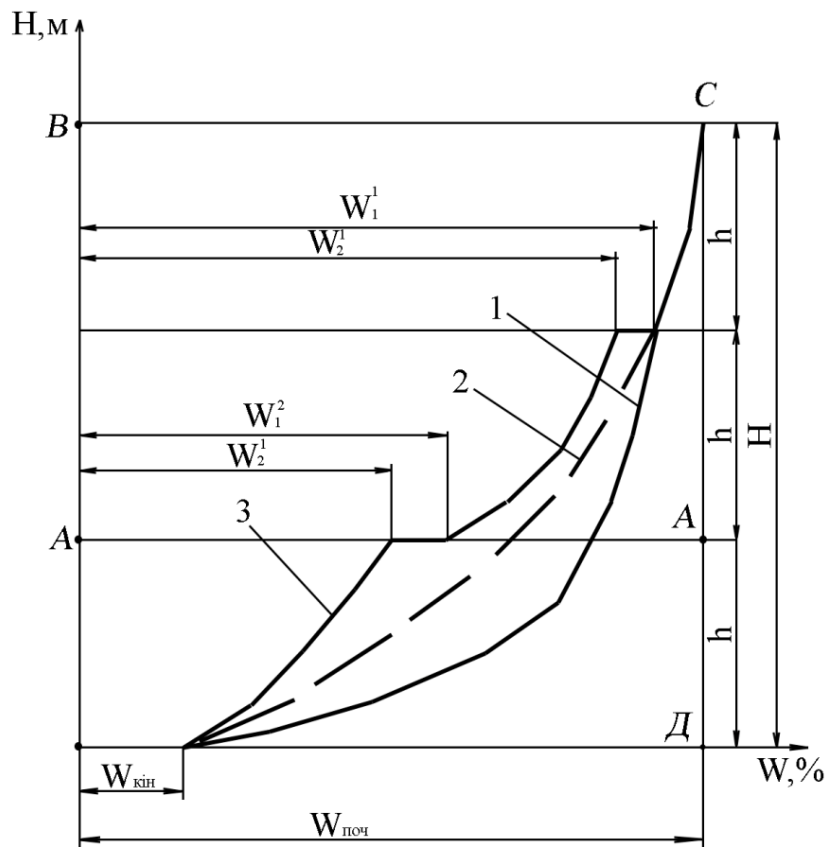


Рис. 1.6. Діаграма зміни вологості: 1 – зниження вологості у нерухомому товстому шарі; 2 – зниження вологості у рулоні під час застосування принципу протитечії; 3 – зниження вологості при попереми́нній подачі сушильного агента і атмосферного повітря чи із застосуванням процесу відлежування

Якщо в даній сушарці застосувати принцип протитечії, тобто після висушування рулону та його видалення з секції 1 провести переміщення рулонів з секцій 1, 2 у відповідні 2, 3, а в секцію 1 встановити рулон із вологістю $W_{\text{поч}}$, то в даному випадку масова витрата сушильного агента буде визначатися аналогічно [49]:

$$Q = \frac{1000 \cdot \rho_a \cdot m_p}{\tau \cdot \varepsilon} \cdot \left[\begin{array}{l} \xi \frac{100 - W_{\text{поч}}}{100 - W_h} \cdot \frac{2W_{\text{поч}} - W_0 - W_h}{200 - W_0 - W_h} + \\ (1 - \xi) \frac{W_{\text{поч}} - W_h}{200 - W_{\text{поч}} - W_h} \end{array} \right] \quad (1.16)$$

де W_h – відносна вологість матеріалу в площині AA на висоті h (рис. 2.6);

ξ – коефіцієнт який враховує відношення загальної висоти рулонів H до висоти одного рулону h ;

W_0 – кінцева відносна вологість матеріалу в площині зі сторони подачі сушильного агента.

Графічно зниження вологості рулонів після їх переміщення та завантаження вологого рулону в секцію 1 буде мати вигляд кривої 2 (рис. 1.6).

Згідно з теорією сушіння для зниження енерговитрат застосовують метод поперемінної подачі сушильного агента та атмосферного повітря чи відлежування рулонів між періодами його сушіння. При цьому в процесі відлежування рулонів спостерігатиметься зниження їх вологості в міру міграції вологи до зовнішньої поверхні стебел льонотрести, а також з середини рулону до периферії. Графічним відображенням вказаного процесу є крива 3 (рис. 1.6), де горизонтальні площадки відображають зниження вологості рулонів під час їх відлежування.

З іншого боку масову витрату сушильного агента під час сушіння з використанням відлежування послідовно n -ї кількості рулонів необхідно розглядати як масову витрату на сушіння кожного рулону окремо. При цьому загальна масова витрата буде дорівнювати:

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_n \quad (1.17)$$

А у випадку застосування трисекційної сушарки витрату сушильного агента визначаємо згідно формули:

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3, \quad (1.18)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 – відповідно витрата сушильного агента на видалення вологи з рулонів розміщених у сушильних секціях 1, 2, 3.

Тоді складові величини формули (1.18) будуть дорівнювати:

$$Q_1 = \frac{1000 \cdot \rho_a \cdot m_{p(1)}}{\tau \cdot \varepsilon_1} \cdot \frac{W_{\text{поч}} - W_1}{100 - W_1}, \quad (1.19)$$

$$Q_2 = \frac{1000 \cdot m_{p(2)}}{\tau \cdot \varepsilon_2} \cdot \frac{W_1 - W_2}{100 - W_2}, \quad (1.20)$$

$$Q_3 = \frac{1000 \cdot \rho_a \cdot m_{p(3)}}{\tau \cdot \varepsilon_3} \cdot \frac{W_2 - W_{\text{кін}}}{100 - W_{\text{кін}}}, \quad (1.21)$$

де $m_{p(1)}, m_{p(2)}, m_{p(3)}$ – маси рулонів після сушіння, г;

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – вологопоглинаюча здатність сушильного агента на вході в секції;

W_1, W_2 – проміжні середні значення відносної вологості рулонів у кінці та на початку періодів сушіння, які дорівнюють:

$$W_1 = \frac{W_{\text{поч}} + W_2^1}{2}, \quad W_2 = \frac{W_2^1 + W_2^2}{2},$$

де W_1^1, W_1^2 – вологість матеріалу вкінці періоду сушіння першої і другої секції;

W_2^1, W_2^2 – вологість матеріалу на початку періоду сушіння другої і третьої секції (у залежності від процесу сушіння може збільшуватись чи зменшуватись).

Тоді,

$$Q = \frac{1000 \cdot \rho_a \cdot}{\tau} \cdot \left[\frac{m_{p(1)}}{\varepsilon_1} \left(\frac{W_{\text{поч}} - W_1}{100 - W_1} \right) + \frac{m_{p(2)}}{\varepsilon_2} \left(\frac{W_1 - W_2}{100 - W_2} \right) + \frac{m_{p(3)}}{\varepsilon_3} \left(\frac{W_2 - W_{\text{кін}}}{100 - W_{\text{кін}}} \right) \right]. \quad (1.22)$$

Отримана формула дозволяє розрахувати масову витрату сушильного агента за цикл сушіння льонотрести в послідовно розміщених рулонах льонотрести трисекційної сушарки.

1.4. Визначення моменту інерції рулону льонотрести

Для визначення моменту інерції рулону льонотрести робимо припущення про його циліндричну форму.

Згідно [16; 51] момент інерції суцільного однорідного циліндра розраховують за формулою:

$$I'_c = \frac{m_p \cdot r_p^2}{2}, \quad (1.23)$$

де I'_c – момент інерції суцільного однорідного циліндра, кг · м²;

m_p, r_p – відповідно його маса та радіус, кг; м.

Маса підраховується згідно формули:

$$m_p = \rho_{\text{ср}} \cdot \pi \cdot r_p^2 \cdot H_p, \quad (1.24)$$

де $\rho_{\text{ср}}$ – середня щільність циліндра, кг/м³;

H_p – його висота, м.

Визначимо момент інерції рулону зі збільшенням щільності матеріалу від центра до периферії (рис. 1.7).

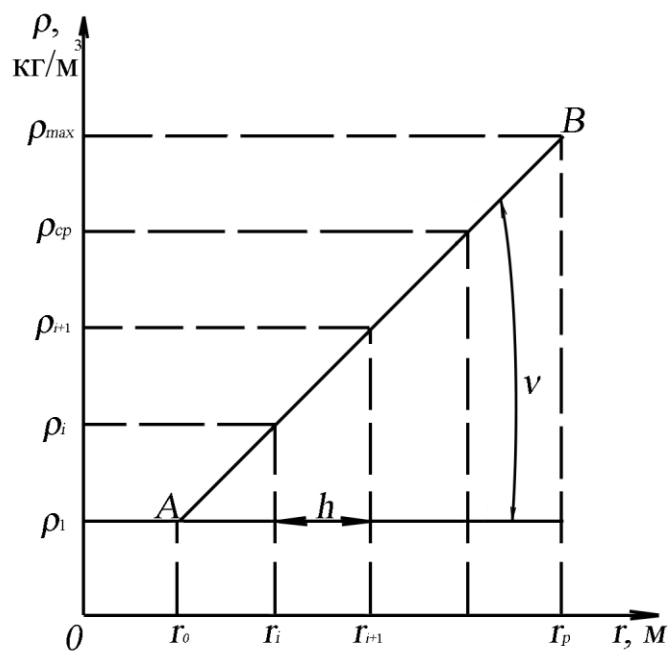


Рис. 1.7. Графік функції $\rho=f(r)$

Для цього, розглядатимемо шар стебел як трубу з циліндричною поверхнею, а переріз рулону – як кільця, що обмежують його шари.

Для цього знайдемо масу i -го шару рулону (рис. 1.8).

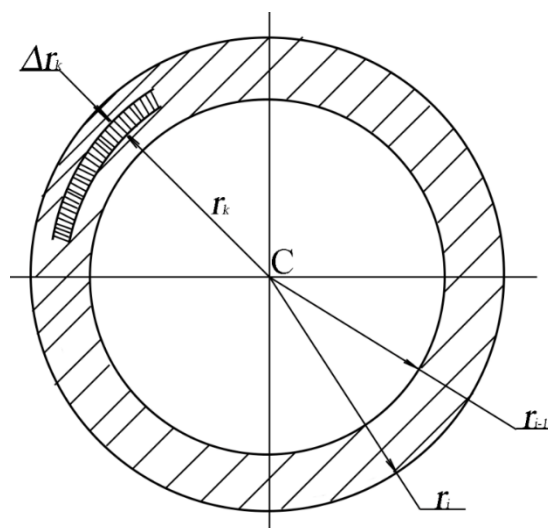


Рис. 1.8. Шар рулону обмежений радіусами r_i, r_{i-1}

$$m_i = \lim_{f \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^f 2\pi \cdot r_k \cdot \Delta r_k \cdot H_p \cdot \rho_k \quad (1.25)$$

$$= 2\pi H_p \cdot (\rho_{i-1} - v \cdot r_{i-1}) \cdot \int_{R_{i-1}}^{R_i} r dr + 2\pi H_p \cdot v \cdot \int_{R_{i-1}}^{R_i} r^2 dr = 2\pi H_p (\rho_{i-1} - v \cdot r_{i-1}) \cdot \frac{(r_i^2 - r_{i-1}^2)}{2} + 2\pi H_p \frac{(r_i^3 - r_{i-1}^3)}{3},$$

$$\text{де } \rho_k = \rho_{i-1} + v \cdot (r_k - r_{i-1}) = \rho_{i-1} - v \cdot r_{i-1} + v \cdot r_k, \quad (1.26)$$

$$r_i = r_1 + i \cdot h,$$

де r_i – радіус i -го шару рулону, м;

r_1 – радіус першого шару рулону, м;

v – коефіцієнт пропорційності, кг/м⁴;

h – висота шару рулону, м;

$$r_{i-1} = r_1 + (i - 1) \cdot h$$

$$v = \frac{\rho_{max} - \rho_1}{r_p - r_1} \quad (1.27)$$

де ρ_1 – щільність першого шару рулону, кг/м³;

$$\rho_{max} = \frac{\rho_{cp}}{k}$$

де k – коефіцієнт нерівномірності, вибраний в залежності від діаметра рулону [8]

$$\rho_{i-1} = \rho_i + h \cdot v(i - 1) \quad (1.28)$$

Загальну масу рулону підраховуємо за формулою (2.29):

$$m_p = m_1 + \sum_{i=1}^n m_i$$

де m_1 – маса першого шару, кг;

$\sum_{i=1}^n m_i$ – маса усіх шарів, обмежених радіусом рулону (r_p) і радіусом першого шару (r_1), м;

$$m_1 = \pi \cdot r_1^2 \cdot H_p \cdot \rho_1, \quad (1.29)$$

$$m_p = \pi \cdot r_1^2 \cdot H_p \cdot \rho_1 + \pi \cdot H_p \cdot \sum_{i=1}^n \left[(\rho_1 - v \cdot r_1) \cdot (r_i^2 - r_{i-1}^2) + \frac{2}{3} \cdot v \cdot (r_i^3 - r_{i-1}^3) \right] \quad (1.30)$$

Після перетворень формули (1.30) отримаємо:

$$\rho_1 = \frac{m_p - \frac{\pi \cdot H_p \cdot \rho_{max}}{r_p - r_1} \sum_{i=1}^f \left[\frac{2}{3} (r_i^3 - r_{i-1}^3) - r_1 (r_i^2 - r_{i-1}^2) \right]}{\pi \cdot H_p \cdot r_1^2 + \frac{\pi \cdot H_p}{r_p - r_1} \cdot \sum_{i=1}^f \left[r_p (r_1^2 - r_{i-1}^2) - \frac{2}{3} (r_i^3 - r_{i-1}^3) \right]} \quad (1.31)$$

Визначимо спочатку момент інерції і-го шару за умови, що ролон містить n-шарів:

$$\begin{aligned}
I_{c(i)} &= \lim_{f \rightarrow \infty} \sum_{k=1}^f \Delta m_k \cdot r_k^2 = & (1.32) \\
&= 2\pi H_p (\rho_1 - v \cdot r_1) \cdot \\
&\cdot \int_{R_{i-1}}^{R_i} r^3 dr + 2\pi H_p \cdot v \cdot \int_{R_{i-1}}^{R_i} r^4 dr = \\
&= \pi H_p (\rho_1 - v \cdot r_1) \cdot \frac{(r_i^4 - r_{i-1}^4)}{2} + \frac{2}{5} \pi H_p \cdot v \cdot \\
&\cdot (r_i^5 - r_{i-1}^5),
\end{aligned}$$

де $\Delta m_k = \rho_k \cdot H_p \cdot 2\pi \cdot r_k \cdot \Delta r_k$, $\rho_k = \rho_{i-1} + v \cdot (r_k^{\square} - r_{i-1}^{\square})$.

Момент інерції усього рулону визначатимемо за формулою (2.33):

$$I_c = I_{c(1)} + \sum_{i=1}^n I_{c(i)}, \quad (1.33)$$

де $I_{c(1)}$ - момент інерції першого шару рулону, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$;

$\sum_{i=1}^n I_{c(i)}$ - момент інерції усіх шарів рулону, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

$$I_{c(1)} = \frac{1}{2} \pi H_p \rho_1 r_1^4. \quad (1.34)$$

Отже, після підстановки формул (2.30) і (2.32) у (2.31) формула для визначення моменту інерції усього рулону матиме вигляд:

$$\begin{aligned}
I_c &= \frac{1}{2} \pi H_p \rho_1 r_1^4 & (1.35) \\
&+ \sum_{i=1}^f \left[\frac{\pi H_p}{2} \cdot (\rho_1 - v \cdot r_1) \cdot (r_i^4 - r_{i-1}^4) + \frac{2}{5} \pi H_p \cdot v \cdot \right. \\
&\cdot \left. (r_i^5 - r_{i-1}^5) \right].
\end{aligned}$$

обертання навколо осей O_1 і O_2 при закритій напівсекції 4 і піднятій 5 ролон 6 під дією власної ваги котиться з секції 1 в секцію 2 переведенням у верхнє положення напівсекції 7 з опущеною 8. Після приймання рулону напівсекція 5 опускається та продовжується сушіння.

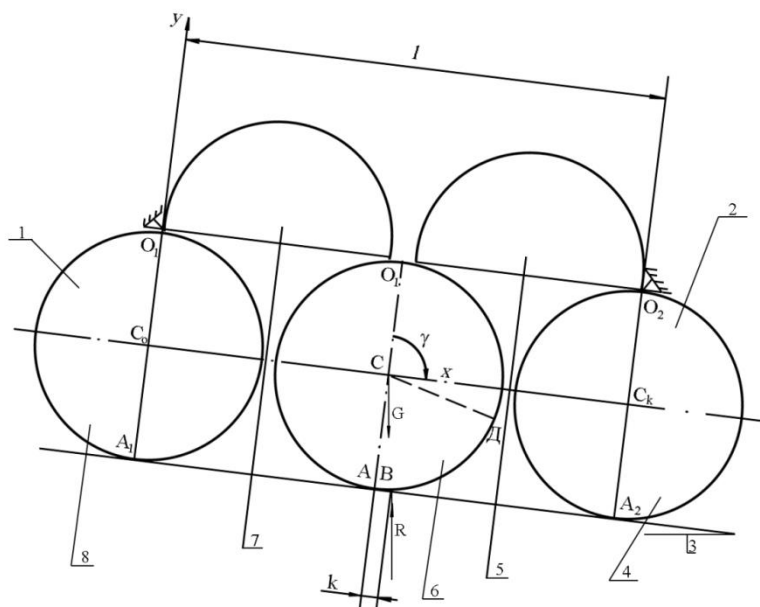


Рис. 1.10. Схема процесу кочення рулону по похилій площині: 1, 2 – сушильні секції; 3 – похила площина; 4, 5, 7, 8 – напівсекції; 6 – рулон

Під час проектування механізму та організації роботи по сушінню необхідно знаки закон кочення рулону, час переходу з однієї секції в іншу, кінетичну енергію рулону в кінці переходу, навантаження на півсекцію 4 під час зупинки рулону.

Розрахунок проводимо за таких припущень:

- 1) опір повітря рухові рулону незначний і ним нехтуємо;
- 2) рулон надійно обв'язаний, а його щільність висока, завдяки чому під час його кочення по похилій площині він не розв'язується і не змінює свого об'єму (тобто поводитьься як тверде тіло).

Позначимо через C центр рулону, тоді початкове положення C буде C_0 (положення рулону в секції 1), а кінцеве положення точки C буде C_k (положення рулону в секції 2). Проведемо через центр C_0 вісі координат X і

У таким чином, щоб вісь X була направлена, в напрямку руху центра C , а вісь Y – перпендикулярно ввєрх. Позначимо кут обертання рулону відносно вісі C_0O_1 через φ і будемо вважати його позитивним, коли він направлений за годинниковою стрілкою. Рулон здійснює плоскопаралельний рух, тому можна використати диференціальні рівняння плоскопаралельного руху твердого тіла.

На рулон діє сила тяжіння G і сила опору кочення R . Сила G дорівнює $m_p g$, де m_p – маса рулону, кг; g – прискорення вільного падіння, m/c^2 .

Сила R є рівнодіючою вертикальної та горизонтальної складових реакції похилої площини. Згідно [18; 19] під час кочення циліндра по основі сила R діє по дузі їх стикання в деякій точці B , віддаленій від точки A , перетину вісі циліндра з цією основою на відстані k , яка є коефіцієнтом тертя кочення та вимірюється в одиницях довжини. Згідно [16] кочення циліндра без ковзання по основі має місце при меншій діючій силі. Якщо виходити з цього тобто вважати, що рулон буде рухатись під дією меншої за величиною сили, то точка A буде миттєвим центром обертання під час кочення рулону.

З врахуванням викладено диференціальні рівняння плоскопаралельного руху рулону мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} m_p \ddot{x}_c &= G \cdot \sin \alpha - R_x ; \\ m_p \ddot{y}_c &= R_y - G \cdot \cos \alpha ; \\ I_c \cdot \ddot{\varphi} &= R_x \cdot r_p - R_y \cdot k, \end{aligned} \right\} \quad (1.36)$$

де x_c, y_c – координати центру C ;

\ddot{x}_c, \ddot{y}_c – проекції прискорення центру C на вісі X і Y ;

R_x, R_y – проекції сили реакції R на вісі X і Y ;

I_c – момент інерції рулону відносно вісі, перпендикулярної площині руху, яка проходить через центр C ;

$\ddot{\varphi}$ – кутові прискорення рулону; c^{-2} ;

r_p – радіус рулону, м.

До рівняння (1.36) слід додати відому з курсу теоретичної механіки залежність шляху x_c від кута φ обертання рулону, яка має місце під час кочення циліндра по площині без ковзання, тобто за умови, що точка А є миттєвим центром обертання (про що зазначалося):

$$x_c = r_p \cdot \varphi. \quad (1.37)$$

У напрямі вісі Y центр С не рухається, тоді $\ddot{\varphi}_c=0$. Підставляючи це в друге рівняння (1.35) і розв'язуючи одержану залежність, знаходимо $R_y = G \cdot \cos \alpha$. Диференціюючи двічі рівняння (1.37), одержимо: $\dot{x}_c = r_p \cdot \dot{\varphi}$ і $\ddot{x}_c = r_p \cdot \ddot{\varphi}$. Підставляючи в перше рівняння (1.36) замість \ddot{x}_c його значення $r_p \cdot \ddot{\varphi}$, і розв'язуючи одержане рівняння відносно R_x , знаходимо: $R_x = G \cdot \sin \alpha - m_p r_p \ddot{\varphi}$. Підставляючи одержані вирази для R_x і R_y у третє рівняння (1.36) замість R_x і R_y , і проводячи відповідні перетворення, приходимо до наступного диференціального рівняння, яке описує поворот рулону під час його кочення по похилій площині:

$$\ddot{\varphi} = \frac{G(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{I_c + m_p r_p^2}. \quad (1.38)$$

Якщо в залежності $\ddot{x}_c = r_p \cdot \ddot{\varphi}$ підставити замість $\ddot{\varphi}$ його значення по (1.38), то одержимо диференціальне рівняння, яке описує переміщення центру С під час кочення рулону по похилій площині:

$$x_c = G \cdot r_p \left(r_p \cdot \sin \alpha - k \cdot \cos \alpha \right) \quad (1.39) \\ I_c + m_p r_p^2$$

Враховуючи, що $G = m_p g$ і підставляючи це значення G в (1.38) і (1.39), отримаємо:

$$\ddot{\varphi} = \frac{g(r_p \cdot \sin \alpha - k \cdot \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \quad (1.40)$$

$$\ddot{x}_c = \frac{g \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \quad (1.41)$$

З цих рівнянь видно, що рух рулоне характеризується тим, що $\ddot{\varphi} > 0$ і $\ddot{x}_c > 0$, можливий лише за умови $r_p \cdot \sin \alpha > k \cdot \cos \alpha$, тобто при

$$\alpha > \arctg \frac{k}{r_p} \quad (1.42)$$

В іншому випадку, тобто при $\alpha < \arctg \frac{k}{r_p}$, рух рулоне неможливий.

При $\alpha = \arctg \frac{k}{r_p}$ рух можливий, проте він буде нестійким.

Рівняння (1.40) і (1.41) є диференціальними рівняннями другого порядку.

Проінтегрувавши один раз рівняння (1.40), отримаємо:

$$\dot{\varphi} = \frac{g(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} t + C_1,$$

де C_1 – постійна інтегрування.

Постійна C_1 знаходиться з початкових умов, які полягають в тому, що при $t = 0$ (t – час) $\dot{\varphi}$ також рівне нулю. Підставляючи це в одержане вище рівняння та розв'язавши його, отримаємо $C_1 = 0$.

Таким чином

$$\dot{\varphi} = \frac{g(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} t. \quad (1.43)$$

інтегруючи ще раз дане рівняння, знайдемо:

$$\varphi = \frac{g(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \cdot \frac{t^2}{2} + C_2,$$

де C_2 – постійна інтегрування.

Постійна C_2 також знаходиться з початкових умов: при $t = 0, \varphi = 0$.

Підставляючи ці дані в отримане рівняння, бачимо, що $C_2 = 0$. Тоді

$$\varphi = \frac{g(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (1.44)$$

Аналогічно інтегруючи рівняння (1.41), отримаємо, що швидкість точки С дорівнюватиме:

$$\dot{x}_c = \frac{g \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \cdot t, \quad (1.45)$$

а шлях x_c буде:

$$x_c = \frac{g \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \cdot \frac{t^2}{2}. \quad (1.46)$$

З отриманих рівнянь (1.44) і (1.46), які виражають закономірність кочення рулону, видно, що його рух буде рівноприскореним (за прийнятими припущеннями).

Позначимо відстань C_0C_k через l (рис. 2.10), час проходження центром рулону C шляху l через t_k . Підставивши ці дані в (1.46), отримаємо рівняння:

$$l = \frac{g \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha) \cdot t_k^2}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2} \cdot \frac{t_k^2}{2},$$

Звідси знаходимо час для переведення рулону з секції 1 в секцію 2:

$$t_k = \sqrt{\frac{2l \left[\frac{I_c}{m_p} + r_p^2 \right]}{g \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}}. \quad (1.47)$$

У момент попадання рулону в секцію 2 його швидкісні параметри $\dot{\varphi}_k$ і \dot{x}_{ck} розрахуємо методом підстановки в (1.43) і (1.45) замість $t - t_k$ за формулою (1.47):

$$\dot{\varphi}_k = \sqrt{\frac{2Lg(r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{r_p \cdot \left[\frac{I_c}{m_p} + r_p^2 \right]}} \quad (1.48)$$

$$\dot{x}_{ck} = \sqrt{\frac{2Lg \cdot r_p (r_p \sin \alpha - k \cos \alpha)}{\frac{I_c}{m_p} + r_p^2}}. \quad (1.49)$$

Визначимо кінетичну енергію рулону в момент його надходження в секцію 2. Оскільки ролон здійснює плоскопаралельний рух, за якого кінетична енергія T_k дорівнює $\frac{m_p \cdot \dot{x}_c^2}{2} + I_c \cdot \frac{\dot{\varphi}^2}{2}$, то до моменту надходження рулону в секцію 2 його кінетична енергія T_k дорівнюватиме:

$$T_k = \frac{m_p \cdot x_{ck}^2}{2} + I_c \cdot \frac{\dot{\varphi}_k^2}{2} = m_p \cdot g \cdot l \left[\sin \alpha - \frac{k}{r_p} \cos \alpha \right]. \quad (1.50)$$

Ця кінетична енергія поглинається напівсекцією 4 секції 2 та переходить у роботу на деформацію опорних пристроїв напівсекції.

1.6. Висновки

1. Згідно з проведеними теоретичними дослідженнями процесу сушіння рулонів з горизонтальною віссю розміщення при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря чи при відлежуванні між періодами нагріву за цикл сушіння відбувається зниження вологості льонотрести до кінцевої, яке визначається згідно з формулою (1.14).

2. Масова витрата сушильного агента за цикл сушіння рулонів льонотрести визначається за формулою (1.22) за умови, що це є сума витрат сушильного агента на сушіння послідовно розміщених рулонів. Витрата сушильного агента при цьому зменшується зі зменшенням коефіцієнта вологопоглинаючої здатності сушильного агента та зі зменшенням початкової вологості матеріалу, що забезпечується переміщенням рулонів у сторону джерела підготовки сушильного агента.

3. Момент інерції рулонів льонотрести зростає зі збільшенням щільності матеріалу від центра до периферії та визначається за формулою (1.35). Найбільш інтенсивно він зростає зі збільшенням щільності та висоти шару рулону.

4. Процес кочення рулонів по похилій площині характеризується зміною швидкості центрів кочення, а також накопиченням кінетичної енергії під час їх переміщення. Дані параметри встановлюються за формулами (1.45) і (1.50).

2. ПРОГРАМА І МЕТОДИКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Програма і загальна методика експериментальних досліджень та обробка результатів

Враховуючи основні завдання, викладені в першому розділі, програмою передбачено дослідження процесу сушіння льонотрести в товстому шарі, розміщеного нерухомо, із застосуванням принципу протитечії під час сушіння сушильним агентом і з попереминою подачею сушильного агента і атмосферного повітря чи із застосуванням процесу відлежування, з метою оптимізації процесу сушіння льонотрести з горизонтальною віссю розміщення.

А також:

- 1) визначення фізико-механічних характеристик льонотрести;
- 2) визначення витрати сушильного агента для встановленого ефективного методу сушіння;
- 3) визначення інерційності рулонів під час кочення;
- 4) встановлення закономірності зміни швидкості під час переміщення рулонів під кутом нахилу площини до горизонту;
- 5) визначення часу кочення та зміни величини кінетичної енергії рулонів від довжини та кута нахилу похилої площини до горизонту.

Лабораторні та господарсько-лабораторні дослідження проводились у Луцькому НТУ та с. «Рудня» Рожищенського району Волинської області.

Дослідження виконувались згідно зі стандартними методиками ОСТ 70.8.9-80, ГОСТ 20915-2011 [7; 9-12; 17; 40; 43; 48; 52], а також розробленими нами методиками.

За результатами дослідів підраховували:

- а) середнє арифметичне значення отриманих даних:

$$\bar{X} = \frac{X_i}{n}, \quad (2.1)$$

де X_i – результати дослідів; n – їх кількість;

б) середню квадратичну похибку за вибіркою (стандартне емпіричне відхилення за вибіркою):

$$S_c = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2)}{n - 1}}, \quad (2.2)$$

в) стандартне відхилення закону розподілу:

$$\sigma_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2)}{n}}, \quad (2.3)$$

г) середня квадратична похибка середнього арифметичного:

$$\sigma_{cp} = \frac{S_c}{\sqrt{n}}, \quad (2.4)$$

д) коефіцієнт варіації:

$$V_m = \frac{S_c}{\bar{X}} \cdot 100 \%, \quad (2.5)$$

е) похибка дослідів:

$$V = \pm \frac{S_c}{(\bar{X} \cdot \sqrt{n})} \cdot 100 \% \quad (2.6)$$

2.2. Лабораторне обладнання, прилади та апаратура для проведення досліджень

Для оптимізації процесу сушіння рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення під час встановлення необхідних

параметрів льонотрести і сушильного агента використовувалось лабораторне обладнання:

- сушильна шафа типу СНОЛ-3; 5,3; 5,3; 5/3 – з термометром із шкалою від 0 до 400 °С та ціною поділки 5 °С;
- ваги ВЛР-1 з похибкою вимірювання ± 1 г;
- ексикатор, бюкси;
- динамометр ДПУ-0,2-0.5030 УХЛ 4,2 ГОСТ 13837-79 №842 02.91 р. з ціною поділки 0,002 кН;
- ртутні термометри зі шкалою від 0 до 100 °С і ціною поділки 1 °С;
- психрометри аспіраційні МВ-4М і М-34;
- секундомір «Агат» 4282 з похибкою за 30 хв $\pm 1,0$ і ціною поділки 0,2 с;
- анемометр цифровий переносний АП-1;
- вентилятор Ц4-76 №8 з електродвигуном ОАЛ2-11-4 потужністю 0,6 кВт і електрокалорифер потужністю 14,2 кВт;
- лабораторна установка для сушіння льонотрести в рулонах, рис. 2.1.

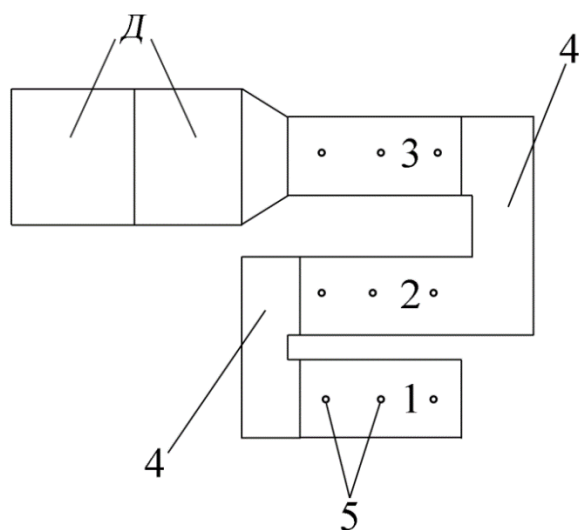


Рис. 2.1. Загальний вигляд лабораторної установки для сушіння льонотрести в рулонах: Д – джерело підготовки сушильного агента; 1, 2, 3 – секції сушильної камери; 4 – повітропроводи; 5 – місце контролю температури

2.3. Дослідження фізико-механічних характеристик льонотрести

2.3.1. Дослідження вологості льонотрести

Під час розробки методики визначення вологості льонотрести використовувалася методика згідно ГОСТ 20915-2011.

Для визначення вологості рулонів формували наважки стебел однакової довжини, масою 5 г кожна, просушуючи за температури 40 °С у термостаті протягом 30 хв за 130 °С до постійної маси, попередньо поділивши довжину наважки на три рівні частини за довжиною стебел [17]. А останні довжиною 5–10 мм, які просушували в стаканчиках (бюксах), із занесенням даних у таблицю.

Відносну вологість підраховували згідно формули:

$$W = \frac{a'}{c'} \cdot 100 \%, \quad (2.7)$$

де a' - маса випареної вологи, г; c' - маса сирої наважки матеріалу, г.

Проби на вологість льонотрести в рулоні відбирали на початку, в кінці та протягом процесу сушіння сушильним агентом і атмосферним повітрям і під час відлежування матеріалу.

Під час визначення вологості матеріалу в умовно поділених шарах за висотою рулону: зі сторони гузирів 1, у середині 2 та зі сторони вершин 3 (рис. 2.2), наважки відбирали з кожного шару: периферійного 4, середнього 5 та центрального 6 через 120 °.

Кожну з відібраних наважок ділили на три рівні частини за довжиною стебел і визначали середню вологість у шарах за висотою рулонів методом зважування-висушування.

За даними вимірювань підраховували граничне відхилення від середньої вологості та нерівномірність сушіння, як середньоквадратичне відхилення в шарах за висотою та діаметром рулону і в товстому шарі сушарки.

Округлення отриманих результатів проводили згідно ГОСТ 12041-82 [12].

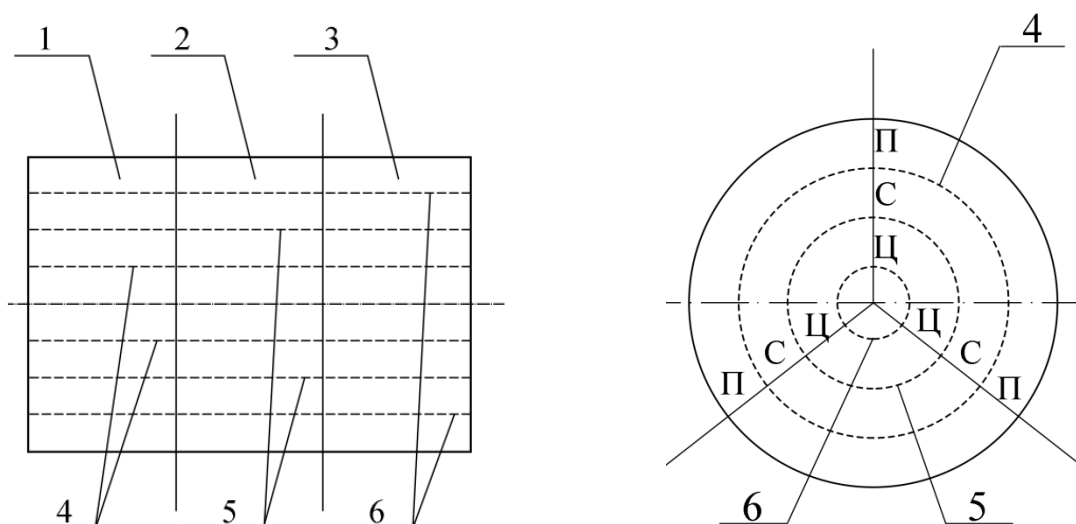


Рис. 2.2 Розміщення точок відбору наважок і вимірювання температури в рулоні: 1 – зі сторони гузирів; 2 – в середині; 3 – зі сторони вершин рулону; 4 – периферійний; 5 – середній; 6 – центральний шари рулону

Дослідження проводились на лабораторній установці (рис. 2.1), що містить джерело підготовки сушильного агента Д, складовими частинами якого є вентилятор і електрокалорифер, з'єднані з роз'ємними циліндрами секціями сушарки 1, 2, 3, за допомогою повітропроводів 4.

Секції виготовлені з розрізаних вздовж пластмасових труб, довжина яких була вибрана з розрахунку максимальної довжини стебел льонотрести та становила 1,5 м. Для вимірювання температури, за висотою та діаметром пластмасових труб рівномірно були розміщені дев'ять отворів 5, які після визначення температури матеріалу закривались клейкою стрічкою.

Роз'ємні трубки секцій сушарки, для зменшення втрат сушильного агента, були виготовлені із зазором, а під час просушування з'єднувалися в суцільний циліндр за допомогою гумових шнурів і скріплювалися клейкою стрічкою.

Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести на лабораторній установці проводили з періодичним продуванням рулонів, завантажених у сушильні секції, з однаковими початковими параметрами, сушильним агентом, атмосферним повітрям або із застосуванням періодичного відлежування, між сушінням. Період сушіння при цьому становив 30 хв. Процес сушіння досліджували як у нерухомому товстому шарі, так і з застосуванням принципу протитечії, тобто переміщення рулонів після періодичного сушіння в конкретній сушильній секції в наступну, розміщену ближче до джерела підготовки сушильного агента. Циклом сушіння при цьому вважали проходження рулоном, під час сушіння всіх секцій сушильної камери.

2.3.2. Дослідження щільності пресування льонотрести в рулоні

Визначення щільності пресування льонотрести в рулоні здійснювали для визначення моменту інерції і дослідження процесу сушіння рулону. Визначення щільності пресування проводили методом зважування та ділення середнього значення маси рулонів, внаслідок трьох повторностей, на об'єм:

$$\rho = \frac{m_p}{V}, \quad (2.8)$$

де m_p – маса рулону, кг; V – його об'єм, м³.

Об'єм приймали як середній після проведення трьох повторностей під час визначення параметрів рулону. Об'єм підраховували згідно формули:

$$V = \pi \cdot r_p^2 \cdot H_p, \quad (2.9)$$

є r_p – радіус рулону, м; H_p – його висота, м.

Визначення щільності пресування льонотрести в рулоні здійснювали за допомогою щільноміра [21] за формулою:

$$\rho_{\text{ср}} = K \cdot \rho_3, \quad (2.10)$$

де $\rho_{\text{ср}}$ – середня щільність рулону, кг/ м³; K – коефіцієнт, що враховує неоднорідність щільності матеріалу за діаметром рулону; K = 1,34; 1,48, відповідно для рулонів діаметром 1,0; 1,25 м [21]; ρ_3 – результат заміру щільності периферійного шару льонотрести в рулоні, кг/м³.

Кількість повторностей дорівнювала п'яти.

2.4. Дослідження параметрів сушильного агента та необхідної кількості повітря для сушіння рулонів льонотрести

Визначення температури, вологості та швидкості сушильного агента фіксували на вході в сушильні секції в кінці періодів сушіння, за допомогою ртутних термометрів, психрометрів і анемометрів. Кількість повторностей дорівнювала трьом.

Об'єм повітря, яке подавалося в сушильні секції, визначали за формулою:

$$V = L \cdot V_{\text{прив}}, \quad (2.11)$$

де L – кількість повітря по сухій масі матеріалу, ($W_{\text{кін}} = 19\%$) кг сух.пов./год; ($L = \text{const}$ [44, С.144]);

$V_{\text{прив}}$ – приведений об'єм вологого повітря на вході в сушильні секції, м³/кг сух. пов.

$$L = \frac{1000 \cdot m_{\text{в}}}{d_2 - d_1}, \quad (2.12)$$

де $m_{\text{в}}$ – кількість випареної вологи з матеріалу, г;

d_2, d_1 – відповідно вологовміст відпрацьованого і подаючого повітря, г/кг сух. пов.

$$V_{\text{прив}} = \frac{287 \cdot T_{\text{ср}}}{P_{\text{в}}}, \quad (2.13)$$

де $T_{\text{ср}}$ – середня абсолютна температура сушильного агента в сушильних секціях протягом періоду сушіння, К;

$P_{\text{в}}$ – парціальний тиск сухого повітря, Па.

$$P_{\text{в}} = \frac{622 \cdot P_{\text{б}}}{d_{\text{ср}} + 622}, \quad (2.14)$$

де $P_{\text{б}}$ – барометричний тиск сухого повітря, Па; ($P_{\text{б}} = 97325$ Па).

2.5. Дослідження зміни висоти шарів льонотрести в рулоні та дослідження процесу кочення рулону по похилій площині

Зміну висоти шарів льонотрести в рулоні визначали з метою подальшого розрахунку моменту інерції рулону. Висоту шарів визначали за допомогою мірної лінійки як середнє арифметичне значення трьох повторностей.

Дослідження процесу кочення рулону проводили під кутом 25° і 10° до горизонту, по металевій пофарбованій поверхні.

Процес кочення рулону проводили з метою визначення закономірності переміщення з однієї секції сушильної камери в іншу. Рулон 1 (рис. 2.3) при цьому встановлювали на похилій площині 2, на якій закріплювали сантиметрову стрічку 3, для встановлення шляху кочення рулону.

Час кочення рулону з однієї сушильної секції в іншу визначали за допомогою секундоміра як час від початку кочення до моменту удару рулону в жорстко закріплену вертикальну площину 4, виготовлену з металу.

Для подальших розрахунків приймали середнє арифметичне значення трьох повторностей.

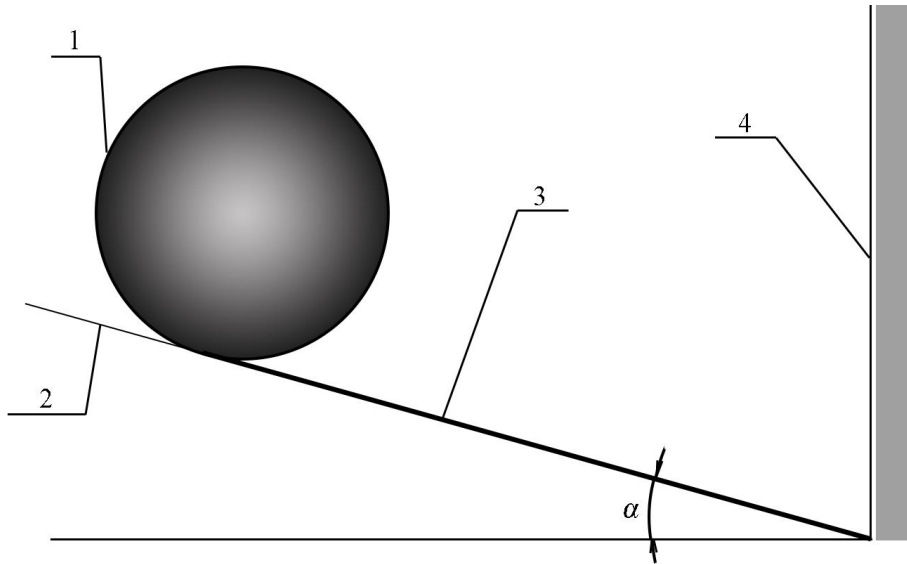


Рис. 2.3. Процес кочення рулону по похилій площині

2.6. Дослідження сушіння рулонів льонотрести на експериментальній установці

Дослідження сушіння рулонів льонотрести на експериментальній установці, рис. 2.1 проводили з періодичним (30 хв) продуванням рулонів сушильним агентом і атмосферним повітрям із застосуванням принципу протитечії.

Складовими частинами експериментальної установки були: джерело підготовки сушильного агента, засувка, для регулювання швидкості сушильного агента в сушильній камері, яка створюється обмотуванням поліетиленовою плівкою та обв'язуванням їх гумовими шнурами.

Кількість повторностей дорівнювала трьом.

3. РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1. Порівняння методів сушіння рулоні льонотрести з горизонтальною віссю розміщення

3.1.1. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із застосуванням відлежування та принципу протитечії

Для встановлення методу сушіння, який сприяв би зниженню витрат сушильного агента та зменшенню нерівномірності вологості льонотрести після сушіння як в умовно поділених шарах рулонів, розміщених за висотою і діаметром, так і в самих рулонах використовували відлежування.

Процес сушіння рулонів льонотрести із застосуванням відлежування між періодами сушіння досліджували згідно із розробленою моделлю технологічного процесу сушіння (рис. 1.3) та методикою п.2.3.1. Рулони льонотрести при цьому періодично просушували протягом 30 хв у кожній із сушильних секцій, а після закінчення з таким же часом та переміщенням у наступну секцію, розміщену ближче до джерела підготовки сушильного агента. Для прослідковування зміни вологості матеріалу під час циклу сушіння в трисекційній сушарці використовували п'ять рулонів, один з яких проходив процес сушіння з першої по третю секції, при завантаженій усій сушильній камері.

Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із застосуванням відлежування проводили за температури сушильного агента 75°C з початковою вологістю матеріалу 44,5% та його щільністю 112 кг/м³ (рис. 3.1).

Під час сушіння рулонів спостерігалось збільшення вологості льонотрести від центра до периферії, а також від вершин до гузирів (табл. 3.1).

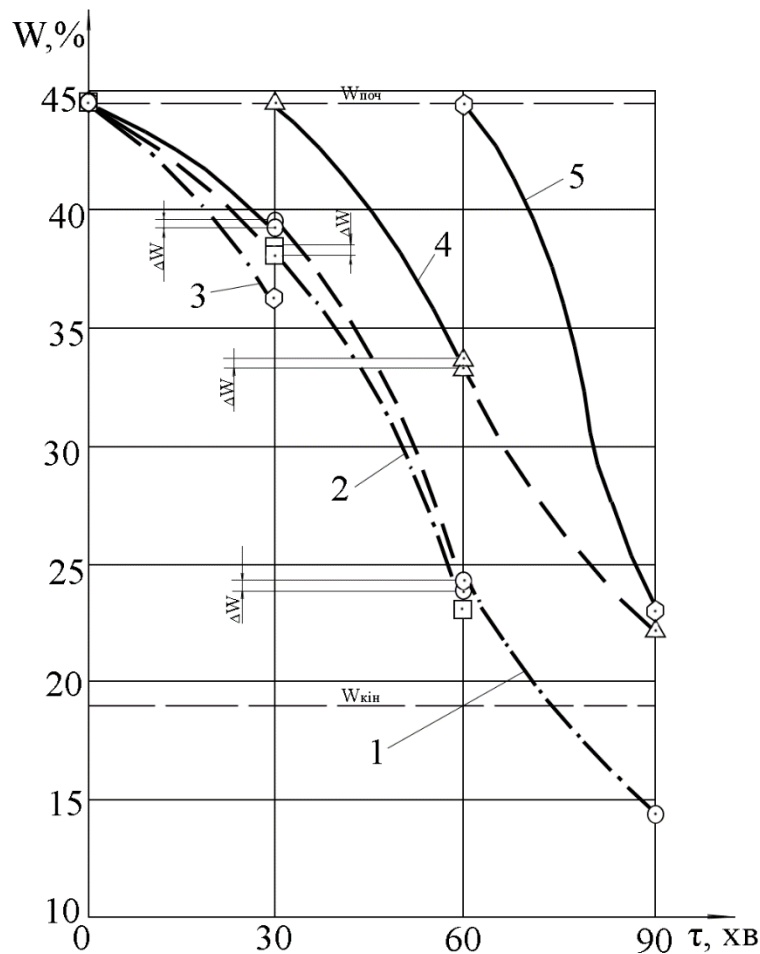


Рис. 3.1. Криві сушіння рулонів льонотрести сушильним агентом із застосуванням процесу відлежування та принципу протитечії: $W_{поч} = 44,5\%$, $\rho_p = 112 \text{ кг/м}^3$; секції сушарки: - перша; - - - друга; - · - третя; 1-5 – рулони трести

Операція відлежування призводила до збільшення вологості льонотрести за шарами рулонів під час періодів сушіння з 0,1% до 0,4% та зниження вологості під час циклу сушіння до 14,4%, що показано на рис. 3.1.

Коефіцієнти варіації, крім одного дослідів, є меншими 10%, тобто мінливість вважається незначною, а похибка дослідів менша 5%, що вважається цілком задовільною, вказуючи на точність проведення дослідів.

Суттєві недоліки, які спостерігались під час дослідження даного методу сушіння, спонукали до відмови від нього в подальших дослідженнях.

Таблиця 3.1. Сушіння льонотрести в рулонах сушильним агентом із застосуванням процесу відлежування та принципу протитечії

Рулон (у сушильній секції)	Час сушіння, τ , хв	Маса рулонів, m_p , кг		Вологість рулонів до сушіння, $W_{\text{поч}}$, %	Вологість рулонів після сушіння, $W_{\text{кін}}$, %												Середнє значення вологості рулонів
		до сушіння	після сушіння		гузирі			середнє	середина			середнє	вершини			середнє	
					п	с	ц		п	С	ц		п	с	ц		
1(1)	30	50	0,44	44,50	42,81	40,71	37,94	40,48	41,12	39,64	37,53	39,43	40,11	39,72	36,64	38,82	39,48
2(2)			0,43		37,44	35,99	32,24	35,22	35,20	34,94	30,58	33,58	33,39	33,21	29,19	31,93	33,53
3(3)			0,43		25,28	24,35	23,11	24,25	23,20	21,94	20,58	23,00	22,05	20,00	19,00	20,35	22,47
4(1)	30	0,50	0,43	44,50	41,21	39,80	38,88	39,96	40,06	38,62	36,22	38,30	39,02	38,36	35,14	37,51	38,39
1(2)		0,43	0,37	39,65	29,03	26,60	25,00	26,88	26,10	25,01	23,08	24,73	23,20	21,94	20,58	23,00	24,21
2(3)		0,43	0,35	34,00	25,25	24,11	23,56	24,31	22,39	21,67	20,19	21,41	22,00	20,88	19,01	20,63	22,12
5(1)	30	0,50	0,43	44,50	40,52	38,06	33,57	38,05	38,40	37,19	33,41	36,33	36,23	36,05	32,00	34,76	36,48
4(2)		0,43	0,36	38,54	25,17	24,89	23,39	24,48	24,14	23,09	21,16	22,79	23,10	23,02	22,04	22,72	23,33
1(3)		0,36	0,30	24,37	16,11	15,18	14,83	15,38	15,10	14,90	13,86	14,62	14,02	13,11	12,54	13,23	14,41

3.1.2. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із застосуванням принципу протитечії

Сушіння льонотрести в рулонах сушильним агентом, температура якого як і в попередніх дослідках становила 75° , початкова вологість 51% і щільність 105 кг/м^3 , проводилось на п'яти рулонах, які періодично завантажували в сушильні секції в міру сушіння.

За експериментальними даними за зміною вологості матеріалу під час сушіння в сушильних секціях побудовані криві сушіння (показані на рис. 3.2), з яких наочно видно, що сушіння рулонів льонотрести із застосуванням переміщення їх у сушильній камері назустріч джерелу підготовки сушильного агента доцільне, оскільки сприяє зниженню вологості кожного наступного рулону, на відміну від попереднього в певній секції сушарки. Вологість під час циклу сушіння в сушильній камері змінювалась відповідно по секціях 47,5%; 33%; 15%.

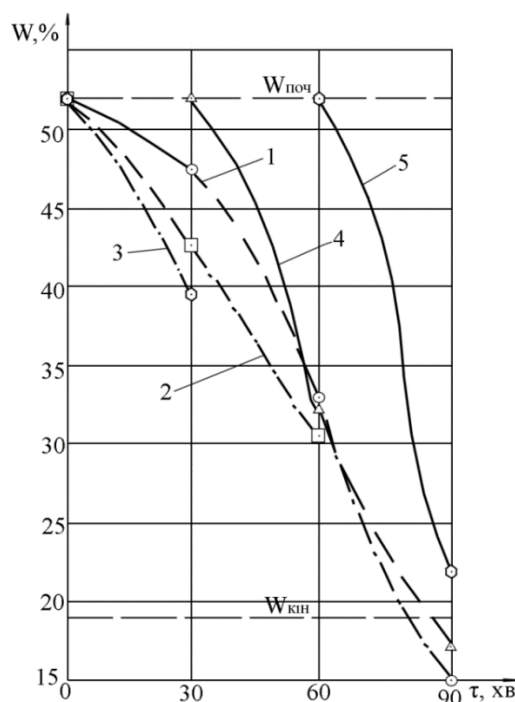


Рис. 3.2. Криві сушіння рулонів льонотрести із застосуванням принципу протитечії $W_{\text{поч}} = 51\%$; $\rho_p = 105 \text{ кг/м}^3$; _____ перша; - - - - друга; - · - · - третя; 1-5 – рулони трести

Максимальне значення коефіцієнта варіації проведених дослідів становить 9,83%, що вважається незначною мінливістю. Максимальна похибка дослідів дорівнювала 3,28%, що вважається цілком задовільною і підтверджує точність проведених дослідів.

Отже, сушіння рулонів льонотрести сушильним агентом, температура якого 75°C із застосуванням принципу протитечії, є доцільним.

3.1.3. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести при попередній подачі сушильного агента і атмосферного повітря в нерухомому товстому шарі

Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести при попереми́нній подачі сушильного агента і атмосферного повітря проводили в нерухомому товстому шарі з метою визначення доцільності використання цього процесу із застосуванням переміщення рулонів у сушильній камері назустріч джерелу підготовки сушильного агента. Оскільки сушіння з попереми́нною подачею атмосферного повітря призводить до зменшення нерівномірності вологості як за шарами рулонів, так і в стеблах.

Під час проведення досліду початкова відносна вологість матеріалу становила 37,9%, щільність 110 кг/м³, а температурні режими сушильного агента і атмосферного повітря відповідно 75 і 27 °C з вологістю повітря 40%.

За результатами досліду зміна вологості рулонів льонотрести від періодичного півгодинного продування атмосферним повітрям збільшувалась, особливо зі сторони подання атмосферного повітря, відповідно в сушильних секціях: 0,4÷0,7%; 0,45÷1%; 0,7÷1,3%, а зміна вологості льонотрести під час сушіння, який становив 3 год, відповідала таким значенням: 32,4; 22; 16,7% (рис. 3.3).

Максимальне значення коефіцієнта варіації проведеного дослідження становить 7,53%, тобто мінливість незначна, а максимальна похибка

дорівнює 2,51%, що вважається цілком задовільною і вказує на точність проведених дослідів.

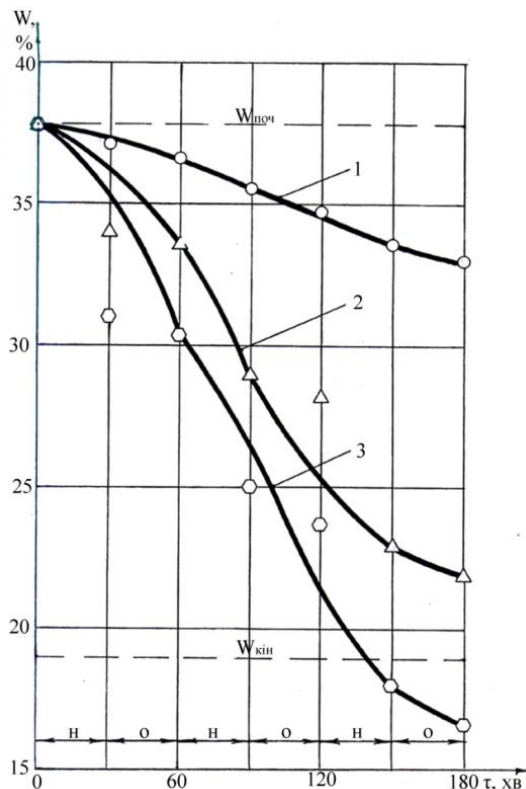


Рис. 3.3. Криві сушіння рулонів льонотрести при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря в нерухомому товстому шарі: $W_{\text{поч}} = 37,9\%$; $\rho_p = 110 \text{ кг/м}^3$; 1, 2, 3 – відповідно сушильні секції з розміщеними в них рулонами

З аналізу викладеного можна зробити висновок, що процес сушіння з поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря є доцільним і ефективним.

3.1.4. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести із поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря та застосування принципу протитечії

Процес сушіння рулонів льонотрести в трисекційній сушарці із поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря із

застосуванням принципу протитечії проводили на матеріалі, вологість якого становила 47,3%, а щільність 103 кг/м³. Параметри сушильного агента і атмосферного повітря відповідали температурам 75 і 23 °С і вологості повітря 40%.

Згідно з методикою п. 2.3.1 матеріал, розміщений в сушильних секціях, піддавали періодичному сушінню як сушильним агентом, так і атмосферним повітрям протягом 30 хв. За отриманими даними зміна вологості рулонів протягом періодів сушіння збільшувалась у міру наближення просушуючого матеріалу до джерела підготовки сушильного агента, що показано на рис. 3.4. Під час циклу сушіння зміна вологості рулону в сушильних секціях відповідно становила 44,8; 36,3 і 20%, що входить у межі параметрів для зберігання матеріалу.

Під час дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести з поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії коефіцієнти варіації дослідів знаходяться в межах 1,30–7,12%, тобто мінливість незначна, а похибка дослідів – 0,43–2,37%, що вважається цілком задовільною.

Криві сушіння рулонів льонотрести під час циклу сушіння (рис. 3.5) наочно показують зміну вологості рулонів льонотрести, з часом за згаданими вище методами. З аналізу графіків можна зробити висновок, що застосування методів сушіння з поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії та сушіння сушильним агентом із застосуванням цього принципу сприяє інтенсивному видаленню вологи.

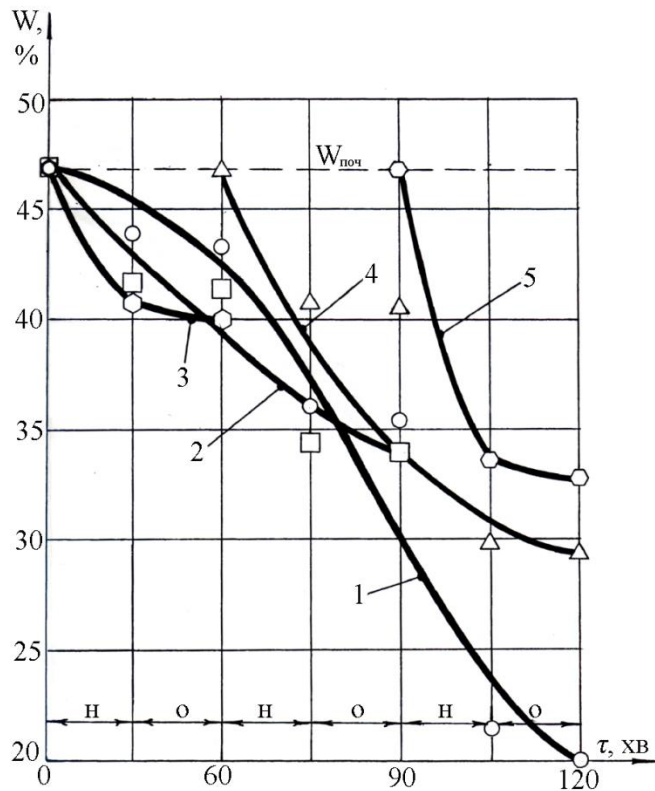


Рис. 3.4. Криві сушіння рулонів льонотрести при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії: $W_{\text{поч}} = 47,3\%$; $\rho_p = 103 \text{ кг/м}^3$; 1-5 рулони льонотрести

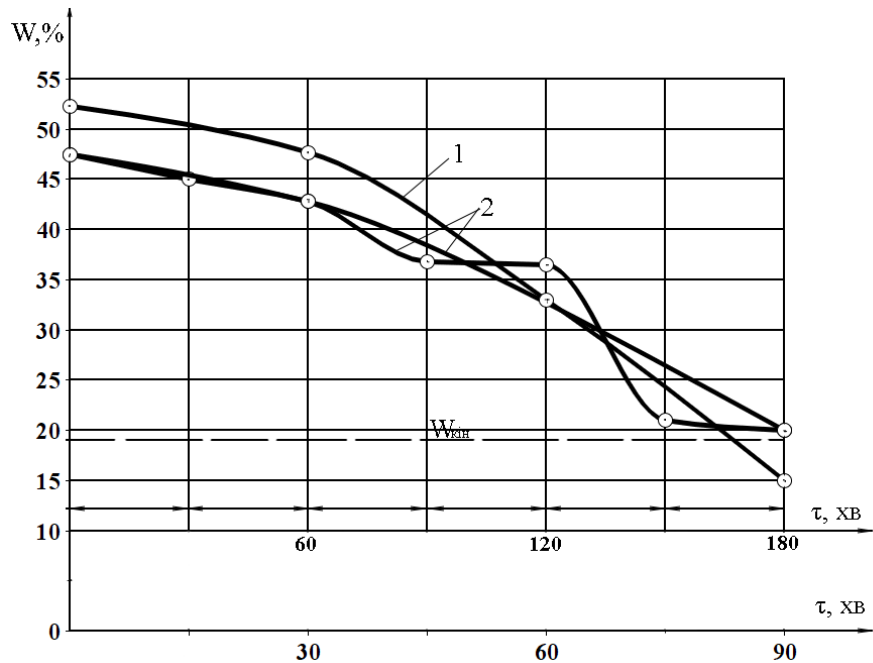


Рис. 3.5. Криві сушіння рулону льонотрести за час повного циклу в трисекційній сушарці: 1 – сушильним агентом; 2 – при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря

Отже, за результатами досліджень методів сушіння рулонів льонотрести в трисекційній камерній сушарці кращими методами сушіння є: сушіння з попеременною подачею сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії та сушіння сушильним агентом із використанням цього принципу.

3.2. Визначення кінцевої вологості рулонів льонотрести під час сушіння в трисекційній сушарці

Встановлення кінцевої вологості просушених рулонів при попереми́нній подачі сушильного агента і атмосферного повітря з використанням принципу протитечії проводили на лабораторній установці, показаній на рис. 3.1, згідно з розробленою методикою п.2.3.1.

У результаті обробки статистичних даних трифакторного експерименту та трирівневим планом другого порядку Бокса-Бенкіна на ПЕОМ, типу IBM PC-AT/XT отримали такі рівняння регресії:

$$W_1 = 28,0602 + 7,0885X_1 - 5,1079X_2 + 4,9928X_3 - 0,1430X_1^2 + 2,0393X_2^2 + 0,1693X_3^2 + 2,0518X_1X_2 - 0,3201X_1X_3 - 0,2339X_2X_3, \quad (3.1)$$

$$W_2 = 17,7934 + 6,2326X_1 - 4,5607X_2 + 4,9631X_3 - 0,0093X_1^2 + 2,6471X_2^2 - 0,9384X_3^2 + 0,6858X_1X_2 - 0,3181X_1X_3 - 0,1792X_2X_3 \quad (3.2)$$

$$W_3 = 7,8060 + 3,5475X_1 - 2,6495X_2 + 2,1909X_3 + 1,0136X_1^2 + 2,8466X_2^2 - 0,2604X_3^2 + 1,2857X_1X_2 + 0,0752X_1X_3 + 0,0662X_2X_3, \quad (3.3)$$

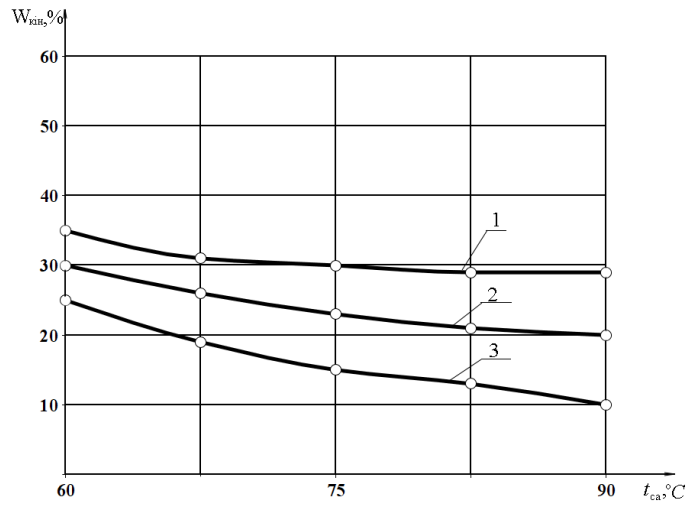
де W_1, W_2, W_3 – значення кінцевої вологості льонотрести у відповідних секціях, %;

X_1, X_2, X_3 – кодовані значення відповідно початкової вологості ($W_{\text{поч}}$ (-1; 0; +1, що відповідає 40; 50; 60%) , температури сушильного агента і атмосферного повітря t_{ca} (-1; 0; +1, що відповідає 60; 75; 90 °С і 25 °С атмосферного повітря) та щільності рулону ρ_p (-1; 0; +1, що відповідає 80; 100; 120 кг/м³).

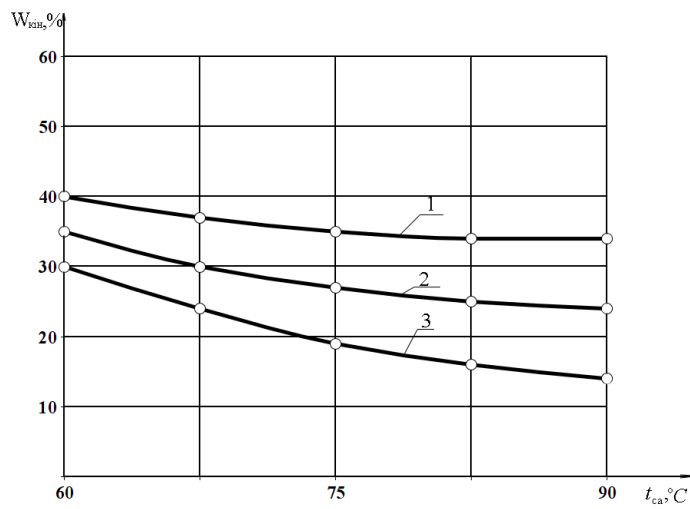
На рис. 3.6–3.8 наведено графічні залежності зміни кінцевої вологості $W_{\text{кін}}$ льонотрести від температури сушильного агента при різній початковій вологості матеріалу $W_{\text{поч}}$ та його щільності ρ_p ; обчислених за допомогою спеціально розробленої програми на ЕОМ «Вологість» (дод. А) за рівняннями (3.1–3.3).

Аналізуючи наведені графіки, було встановлено що рулони, початкова вологість яких становила 40%, висихають до вологості нижче нормованої (до 10; 15%) за температури сушильного агента 75; 90 °С з щільністю відповідно 80; 100 кг/м³ ще в секції 1. А в секції 2 льонотреста з початковою вологістю 40; 50% щільністю 80; 100 кг/м³ за температури сушильного агента відповідно 75; 90 °С не тільки висихала до нормованої вологості, а й нижче її.

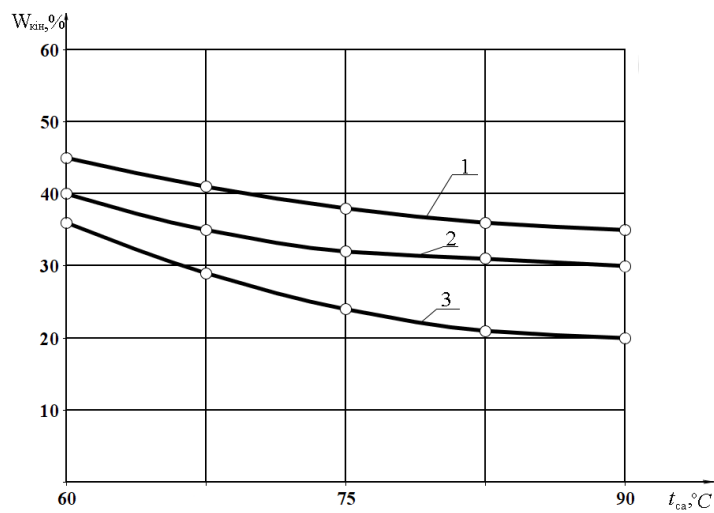
Згідно з аналізом про швидкість сушіння мокрих рулонів льонотрести до нормованої вологості $W_{\text{кін}} = 19\%$ можна зробити висновок, що рулони з щільністю 80; 100; 120 кг/м³ доцільно сушити за температури сушильного агента, що відповідає 60; 75; 90 °С.



а)

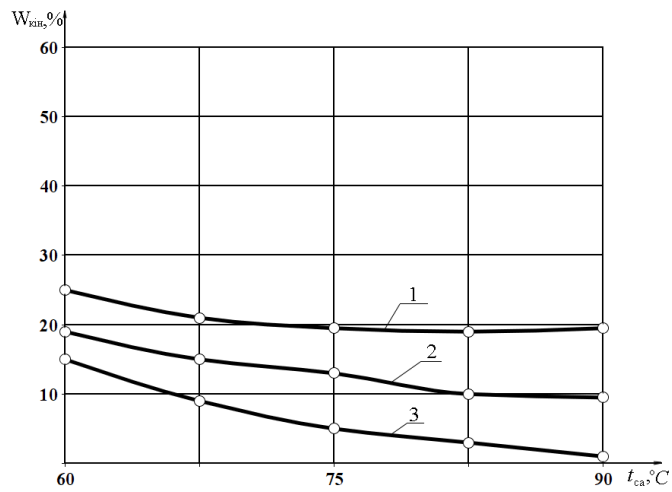


б)

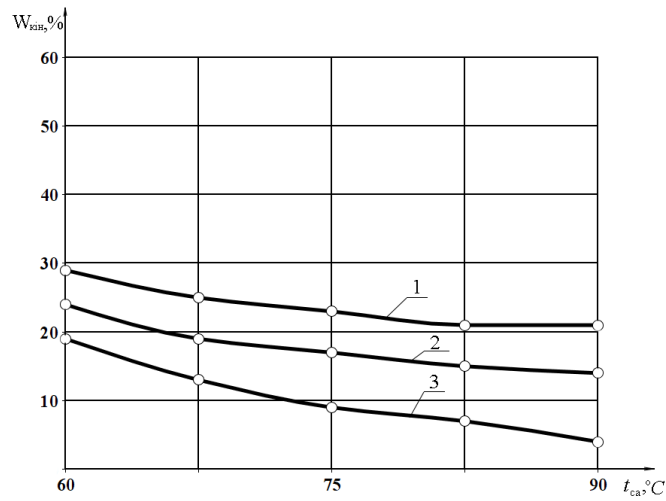


в)

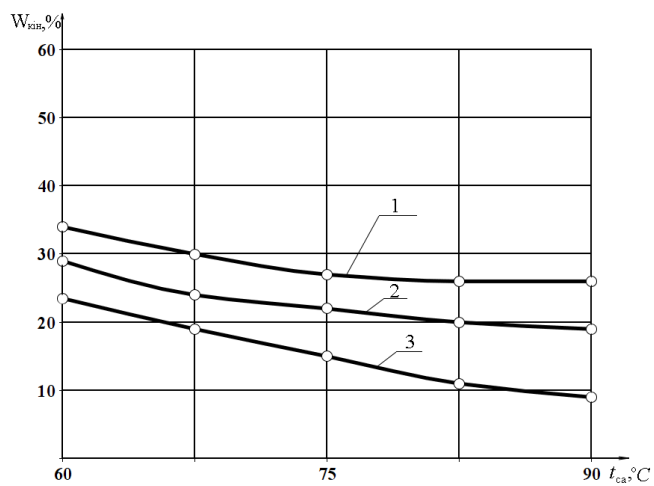
Рис. 3.6. Залежність кінцевої вологості рулонів $W_{кін}, \%$ від температури сушильного агента $t_{ca}, ^\circ C$ під час сушіння в секції 1



а)



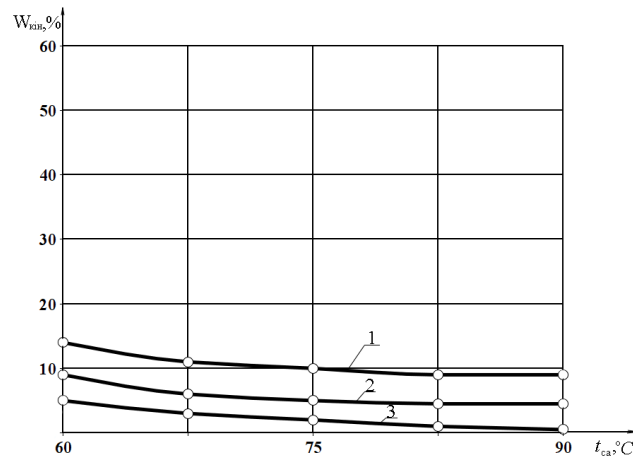
б)



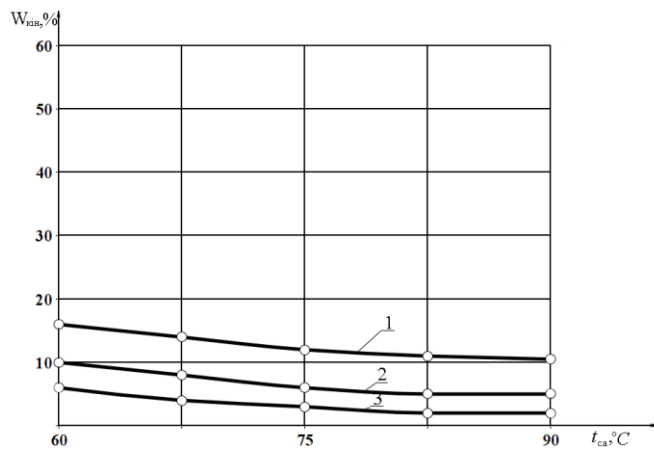
в)

Рис. 3.7. Залежність кінцевої вологості рулонів $W_{\text{кін}}, \%$ від температури сушильного агента $t_{ca}, ^\circ\text{C}$ під час сушіння в секції 2: а) $\rho_p = 80 \text{ кг/м}^3$; б) $\rho_p = 100 \text{ кг/м}^3$; в) $\rho_p = 120 \text{ кг/м}^3$; 1 – $W_{\text{поч}} = 60\%$, 2 – $W_{\text{поч}} = 50\%$, 3 –

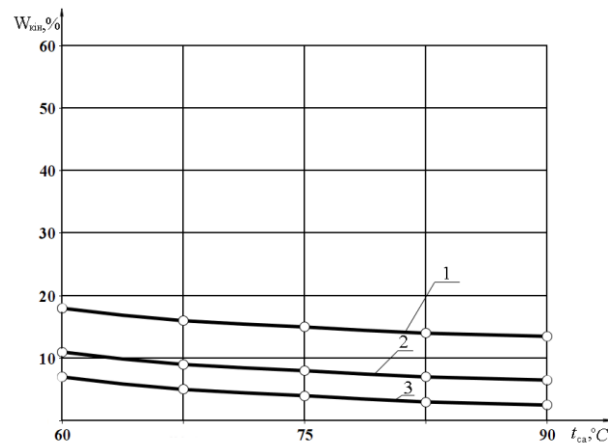
$W_{\text{поч}} = 40\%$



а)



б)



в)

Рис. 3.8. Залежність кінцевої вологості рулонів $W_{\text{кін}}, \%$ від температури сушильного агента $t_{\text{са}}, ^\circ\text{C}$ під час сушіння в секції 3: а) $\rho_p = 80 \text{ kg/m}^3$; б) $\rho_p = 100 \text{ kg/m}^3$; в) $\rho_p = 120 \text{ kg/m}^3$; 1 – $W_{\text{поч}} = 60\%$, 2 – $W_{\text{поч}} = 50\%$, 3 – $W_{\text{поч}} = 40\%$

3.3. Визначення коефіцієнта вологопоглинаючої здатності сушильного агента

Згідно з проведеними дослідженнями (п. 2.1) найкращими процесами сушіння рулонів льонотрести є сушіння сушильним агентом із застосуванням принципу протитечії, а також процес сушіння з поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням цього принципу.

Визначення коефіцієнта вологопоглинаючої здатності сушильного агента для цих методів сушіння проводимо згідно з методикою п. 2.4 за формулою:

$$\varepsilon = \frac{m_B}{V}, \quad (3.4)$$

де m_B – маса видаленої вологи з рулону, г;

V – об'єм повітря, необхідний для видалення цієї кількості вологи, м³.

Результати експериментальних досліджень параметрів сушильного агента під час циклу сушіння в трисекційній сушарці подані на рис. 3.9–3.12. А результати визначення коефіцієнта вологопоглинаючої здатності сушильного агента в табл. 3.1.

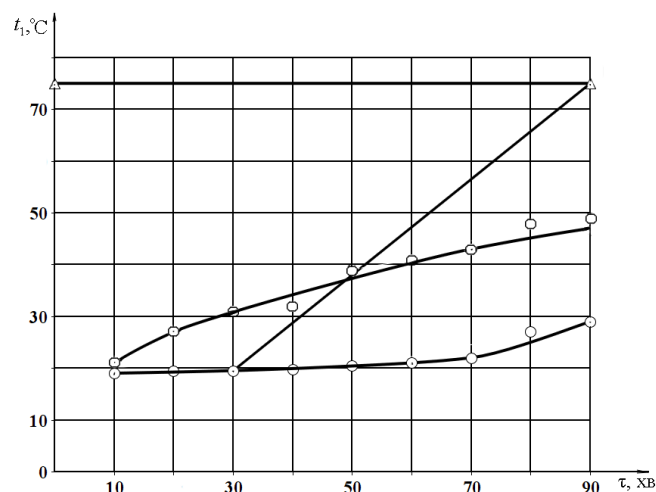


Рис. 3.9. Криві зміни температури сушильного агента під час сушіння льонотрести в рулонах: O, square, Delta – відповідно перша, друга і третя сушильні секції

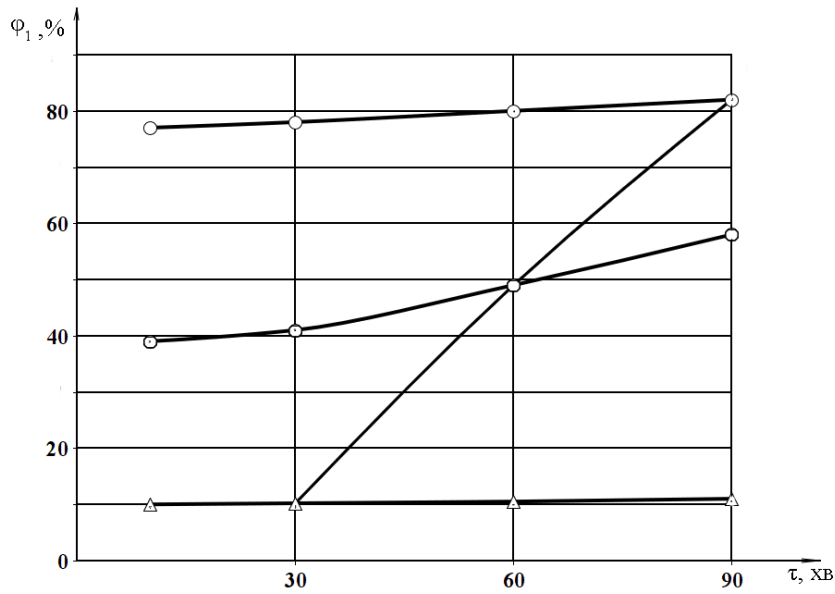


Рис. 3.10. Криві зміни вологості сушильного агента під час сушіння льонотрести в рулонах: O, □, Δ – відповідно перша, друга і третя сушильні секції

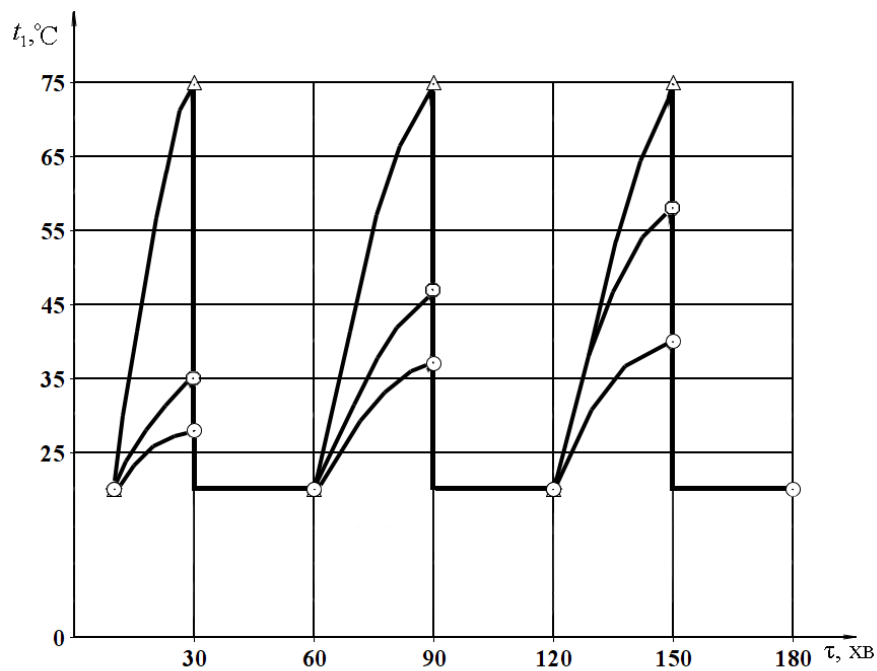


Рис. 3.11. Криві зміни температури сушильного агента під час поперемінної подачі сушильного агента та атмосферного повітря: O, □, Δ – відповідно перша, друга і третя сушильні секції

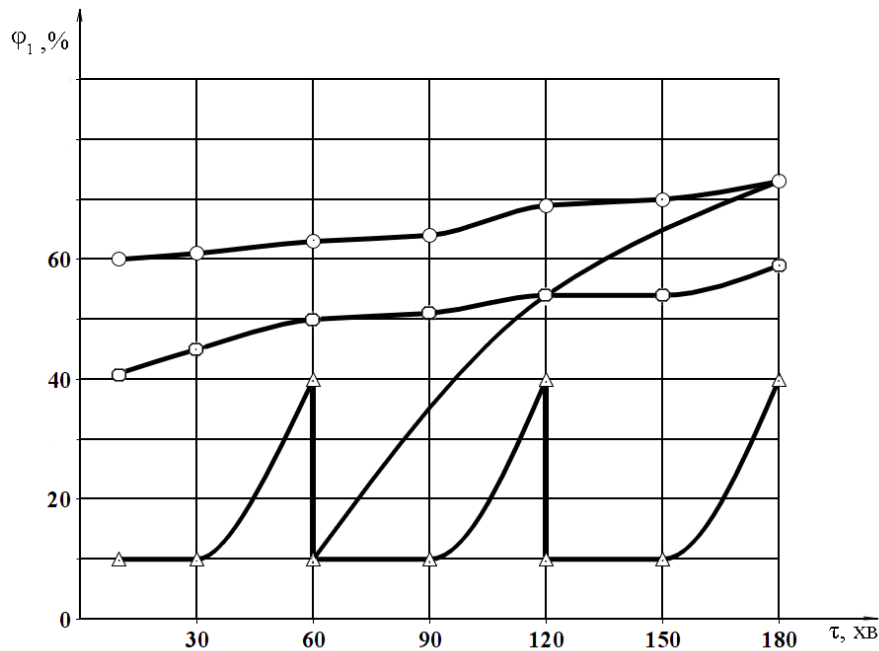


Рис. 3.12. Криві зміни вологості сушильного агента під час поперемінної подачі сушильного агента та атмосферного повітря: O, □, Δ – відповідно перша, друга і третя сушильні секції

Таблиця 3.1 Результати визначення вологопоглинаючої здатності сушильного агента

Секції сушарки	Час сушіння, τ, год	Вологовміст сушильного агента на виході (вході) з секцій, d, г/кг сух.пов.	Маса видаленої вологи, m _в , Г	Кількість сухого повітря, L, кг сух.пов./0,5 год	Приведений об'єм сухого повітря на вході в секції, V _{прив} , м ³ /кг сух.пов.	Об'єм повітря, V, м ³	ε, г/м ³
а) сушіння матеріалу під час постійної подачі сушильного агента і атмосферного повітря							
1	0,5	7(9)	55	12,22	0,86	10,51	5,23
2		13,5(20)	60		0,91	11,12	5,40
3		43(25)	69		0,97	11,85	5,82
б) сушіння матеріалу під час поперемінної подачі сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії							
1	0,5	10,2(15,5)	57	7,02	0,91	6,39	8,92
1		7(11,5)	1	0,4	0,89	0,36	2,78

2		27(29)	59	7,02	0,97	6,82	8,65
2		8,1(10)	2	0,4	0,89	0,35	5,71
3		56(29,5)	64	7,02	1,08	7,55	8,48
3		9,5(7)	3	0,4	0,88	0,35	8,37

Аналіз табл. 3.1 показує, що коефіцієнт вологопоглинаючої здатності збільшується в міру наближення просушуючого матеріалу до джерела підготовки сушильного агента.

3.4. Визначення витрати сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести

Витрату сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести визначали за таких початкових параметрів рулонів: 52 і 47,3% вологості та 105 і 103 кг/м³ щільності в таких методах сушіння:

- 1) сушильним агентом із застосуванням принципу протитечії;
- 2) з попереминою подачею сушильного агента та атмосферного повітря із застосуванням вказаного принципу.

Витрата сушильного агента за цикл сушіння рулону льонотрести сушильним агентом із застосуванням принципу протитечії, найбільша в другій секції: 5,37; 11,33; 8,40 кг/с, що наочно видно з рис. 3.13. А під час попереминої подачі сушильного агента та атмосферного повітря витрата сушильного агента за періоди нагріву і охолодження не значно відрізняється в перших двох сушильних секціях, і становить: 1,91(1,77); 2,99(2,11); 2,97(0,54) кг/с, що в 2,04 рази менше в порівнянні з витратою під час сушіння сушильним агентом.

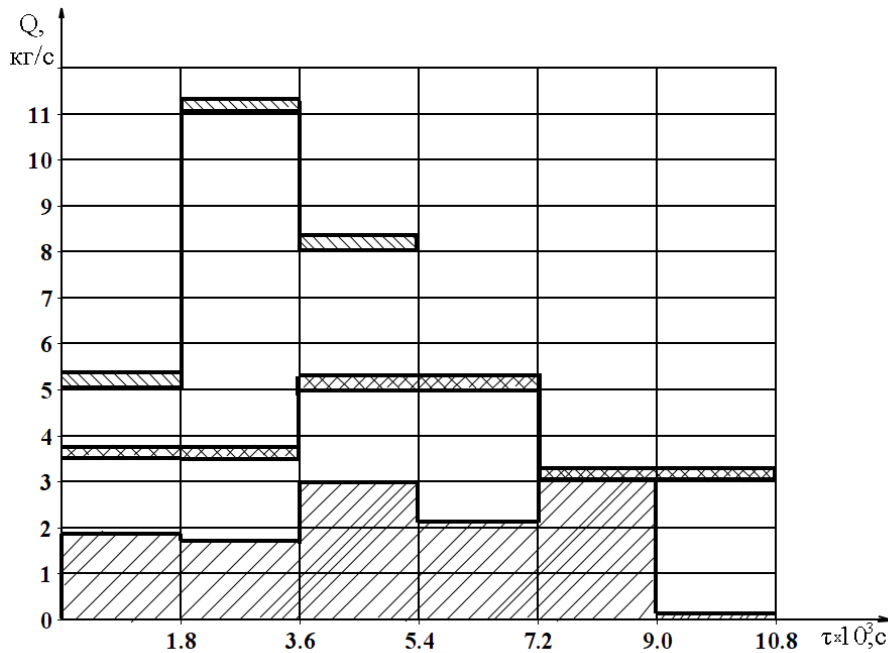





Рис. 3.13. Витрата сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести:  – при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії $W_{\text{поч}} = 47,3\%$, $\rho_p = 103 \text{ кг/м}^3$;  – сумарна витрата сушильного агента в сушильних секціях під час сушіння з поперемінною подачею сушильного агента і атмосферного повітря;  – під час сушіння сушильним агентом $W_{\text{поч}} = 51 \%$, $\rho_p = 105 \text{ кг/м}^3$

3.5. Визначення моменту інерції рулонів льонотрести

Визначення моменту інерції рулонів і його шарів, а також розрахунок щільності шарів здійснювали для рулонів радіусами 0,50; 0,55; 0,60 м з відповідними їх щільностями 120; 110; 100 кг/м^3 згідно з формулами (1.27); (1.30–1.34) і методиками експериментальних досліджень п. 2.3.2 і 2.5.

За результатами розрахунків побудовані криві зміни моментів інерції шарів рулонів від їх радіусів і щільностей (рис. 3.14), зі збільшенням яких момент інерції збільшується і криві мають вигляд парабол. У результаті

розрахунку моменту інерції рулонів за сумою моментів інерції шарів рулонів і підрахунку вказаного параметра за загальною формулою визначення моменту інерції рулону (табл. 3.2), можна зробити висновок про правильність виведених формул.

Таблиця 3.2 Результати визначення моменту інерції рулонів

Радіус рулонів, r_p , м	Маса рулонів, m_p , кг	Момент інерції рулонів, I_c , кг · м ²	
		підрахований за сумою моментів інерції шарів	після підрахунку за загальною формулою
0,50	219	12,75	15,36
0,55	198	17,25	17,90
0,60	187	22,15	22,01

Коефіцієнти варіації проведених дослідів знаходяться в межах 0,07÷14,56%, що вказує на незначну та середню мінливість, а похибки дослідів – 0,04÷10,30%, свідчать про задовільну і допустиму точність проведених дослідів.

На основі теоретичного та експериментального дослідження з подальшими розрахунками моменту інерції та незначної мінливості і розбіжності в отриманих даних, із задовільною похибкою, стверджуємо про правильність виведених формул і точність проведених дослідів.

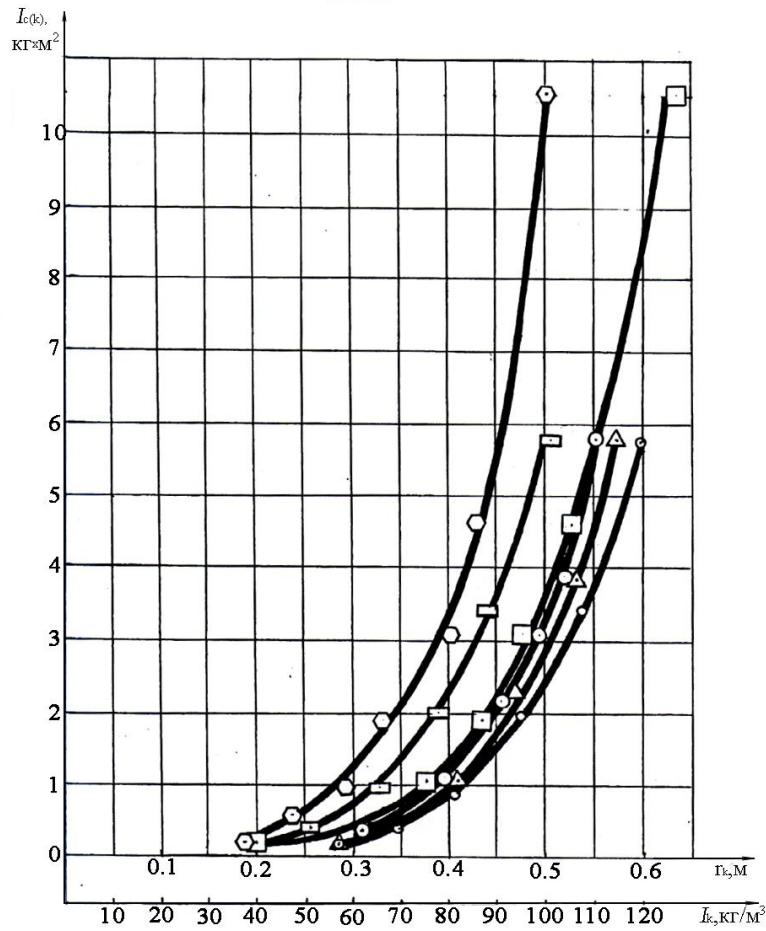


Рис. 3.14. Криві зміни моментів інерції шарів рулонів $I_{c(k)}$, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$:

■ - $r_p = 0,50$ м

□ - $r_p = 0,55$ м

△ - $r_p = 0,60$ м

○ - $\rho_p = 120$ $\text{кг}/\text{м}^3$

○ - $\rho_p = 110$ $\text{кг}/\text{м}^3$

□ - $\rho_p = 100$ $\text{кг}/\text{м}^3$

3.6. Дослідження процесу кочення рулонів по похилій площині

Час кочення рулонів по похилій площині визначали згідно із методикою п. 2.5 під кутом 25 і 10° до горизонту по пофарбованій металевій поверхні з вологістю рулонів льонотрести 48% .

Розрахунок кутової швидкості центрів рулонів під час перекочування, шлях проходження центрами рулонів, кут повертання рулонів і кінетичну енергію рулонів, здійснювали згідно з формулами (1.42–1.44); (1.49–1.50). За результатами розрахунків побудовані графіки, подані на рис. 3.15–3.17, які

показують, що зі збільшенням кута нахилу похилої площини перераховані вище параметри збільшуються.

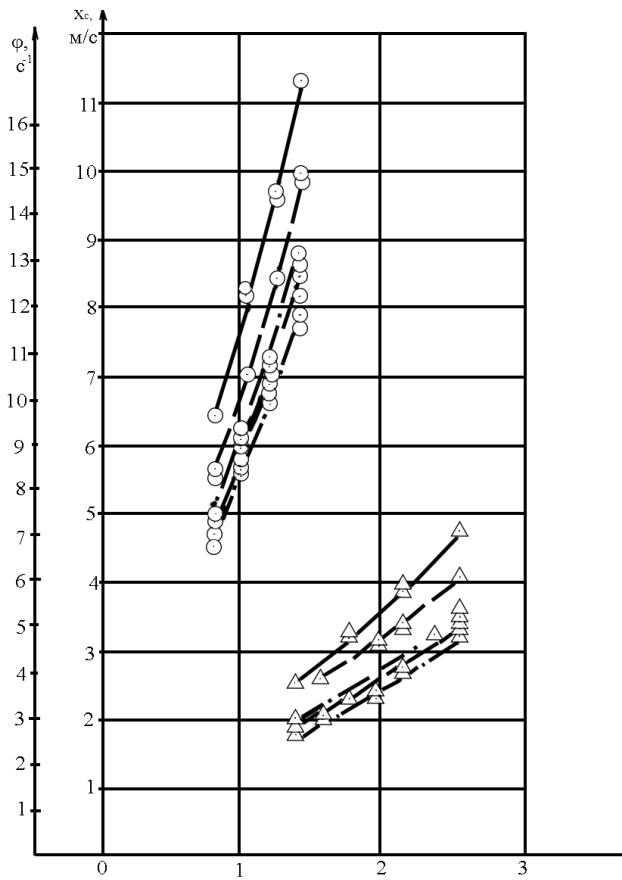


Рис. 3.15 Криві зміни кутової швидкості, $\dot{\varphi}$, с^{-1} і швидкості центрів рулонів, \dot{x}_c , м/с , з часом, t , с :

$\dot{\varphi} = f(t)$	$\dot{x}_c = f(t)$
— — — — — $r_p = 0,50 \text{ м}$;	—#—#—# $r_p = 0,50 \text{ м}$;
- - - - - $r_p = 0,55 \text{ м}$;	-#-#-# $r_p = 0,55 \text{ м}$;
-·-·-· $r_p = 0,60 \text{ м}$	-#·-#· $r_p = 0,60 \text{ м}$

кути нахилу похилої площини:
 O – 25°; Δ – 10°

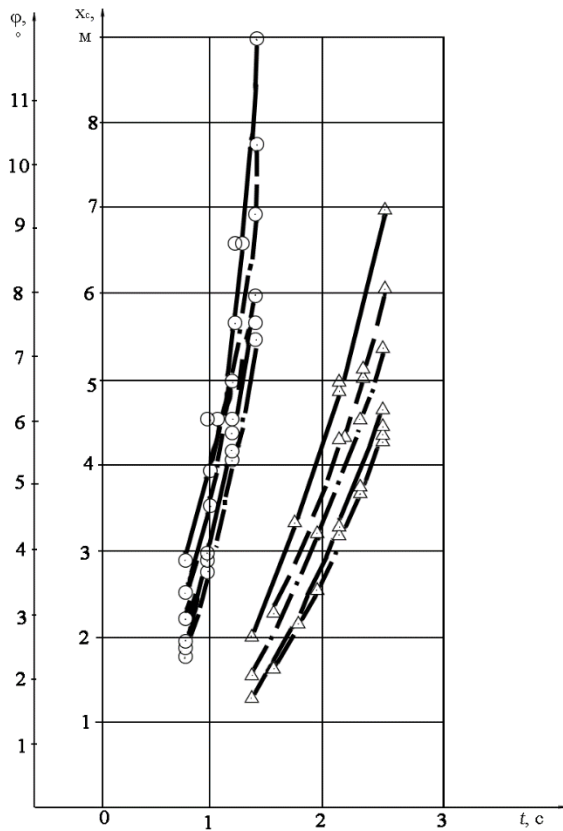


Рис. 3.16. Криві зміни кута повертання рулонів, $\varphi, ^\circ$ і шляху проходження центрами рулонів, $x_c, \text{ м}$ з часом $t, \text{ с}$:

$\varphi = f(t)$ $x_c = f(t)$
 ————— $r_p = 0,50 \text{ м}$; ———— $r_p = 0,50 \text{ м}$;
 - - - - - $r_p = 0,55 \text{ м}$; - - - - - $r_p = 0,55 \text{ м}$;
 - · - · - $r_p = 0,60 \text{ м}$ - · - · - $r_p = 0,60 \text{ м}$

кути нахилу похилої площини:

О - 25° Δ - 10°

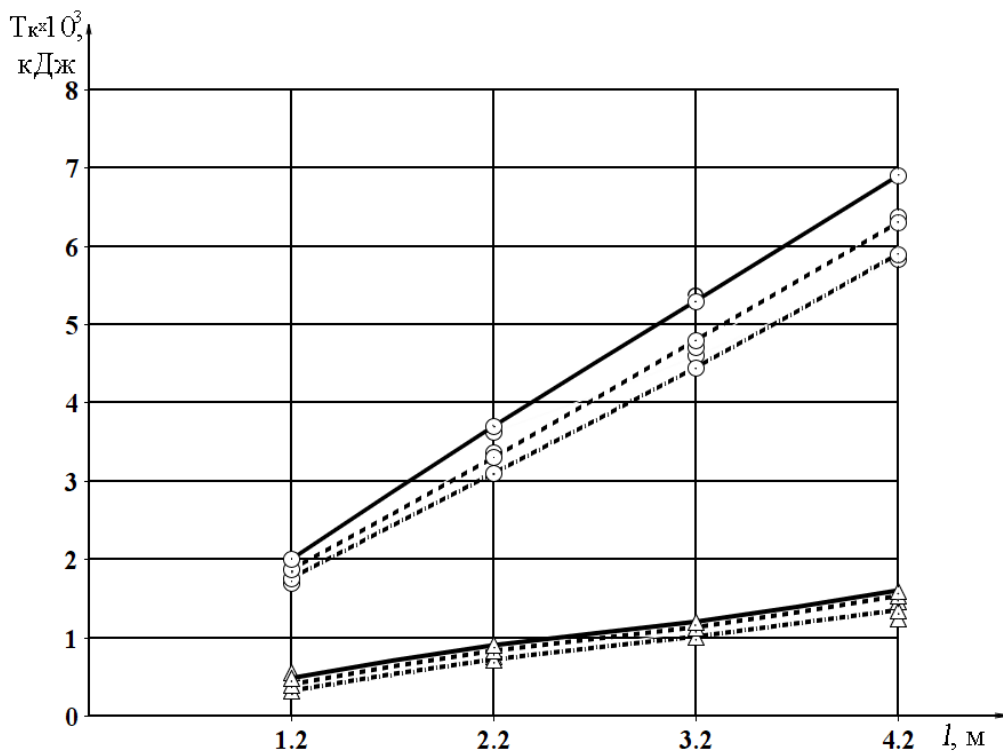


Рис. 3.17. Криві зміни кінетичної енергії рулонів $T_k, \text{ кДж}$, під час кочення: ——— $r_p = 0,50 \text{ м}$; - - - $r_p = 0,55 \text{ м}$; - · - · $r_p = 0,60 \text{ м}$; О - 25° ; Δ - 10°

3.7. Інженерне обґрунтування конструкції секції сушильної камери

Діаметр сушильної секції приймаєм 1,6 м, довжина секції відповідає довжині рулону – 1,5 м, з врахуванням того, що у внутрішній порожнині розміщений ущільнювач у формі гумовотканевої пластини товщиною 20 мм і шириною 1884 мм. Гумовотканевий ущільнювач призначений для сприймання ударних навантажень у машинах і агрегатах і виконаний у вигляді пластин.

Фізико-механічні показники гуми, яка використовується для виготовлення пластин [2]:

- 1) границя міцності під час розриву – не менше 40 кгс/см²;
- 2) відносне подовження під час розриву – не менше 330;
- 3) відносне остаточне подовження під час розриву – не більше 25%;
- 4) твердість за Шором – 40 – 50 умовних одиниць.

Фізико-механічні показники пластини:

- 1) твердість – 35 – 50 (міжнародні одиниці JRHD);
- 2) міцність зв'язку гумових шарів із тканиними прокладками – не менше 0,6 кгс/см.

Пластина вибрана відповідно до таких умов:

- 1) номер групи робочого середовища – 1;
- 2) підгрупа – прісна вода, номер підгрупи робочого середовища 1,7;
- 3) ступінь твердості пластини – м'яка (М);
- 4) умови експлуатації: температура від – 45 °С до + 90 °С;
- 5) марка пластини: тепломорозокислотолугостійка (ТМКЛ).

Або скорочено: пластина 1, рулон ТМКЛ.-М 20×13501884 – 9.9 ГОСТ 7338-77. Для піднімання симетричних частин секції в середині їх розміщений шарнірний механізм із фіксованою довжиною, яка становить 1,30 м і здійснює зворотно-поступальний рух. Шарнірний механізм рухається по канавці, розміщеній в середині ущільнювача, обробленої сталлю 35.

Циліндричні шарніри, що з'єднують симетричні частини секції, виготовлені, як і секції, зі сталі 35 і розміщені по довжині секції через 300 мм у кількості 8 шт.

3.8. Висновки

1. Дослідження процесу сушіння рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення під час застосування відлежування, поперемінної подачі сушильного агента і атмосферного повітря як у нерухомому товстому шарі, так і з застосуванням принципу протитечії встановлено, що оптимальними значеннями параметрів технологічного процесу є: температура сушильного агента $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, температура атмосферного повітря $23\text{--}27\text{ }^{\circ}\text{C}$ при його вологості до 40% , швидкість їх на вході в сушильну камеру 1 м/с .

2. Порівняльний аналіз процесів сушіння льонотрести в рулонах показує перевагу сушіння даного матеріалу при поперемінній подачі сушильного агента і атмосферного повітря із застосуванням принципу протитечії.

3. Масова витрата сушильного агента під час використання цього методу в $2,04$ рази менша в порівнянні з витратою під час сушіння тільки сушильним агентом.

4. Моменти інерції рулонів льонотрести радіусами $0,50$; $0,55$; $0,60\text{ м}$ при відповідній щільності 120 ; 110 ; 100 кг/м^3 становлять: $12,75$; $17,25$; $22,15\text{ кг}\cdot\text{м}^2$; похибки між теоретичними і експериментальними даними знаходяться в межах $0,31\text{--}2,21\%$.

5. Кращим кутом нахилу є кут $\alpha = 10^{\circ}$. Під час його використання кінетична енергія рулонів зменшується і становить $445,55$; $402,83$; $380,45\text{ кДж}$ у порівнянні з $\alpha = 25^{\circ}$ - $1970,21$; $1781,29$; $1682,33\text{ кДж}$.

РОЗДІЛ 4. ТЕХНІЧНІ РІШЕННЯ ЩОДО РЕАЛІЗАЦІЇ СУШІННЯ РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ З ГОРИЗОНТАЛЬНОЮ ВІССЮ РОЗМІЩЕННЯ

4.1. Пропонуюча установка для технологічного процесу сушіння рулонів льонотрести

Вдосконалений технологічний процес сушіння рулонів льонотрести з періодичним сушінням в секціях сушильної камери, покладений в основу принципу протитечії, передбачає досушування матеріалу в пунктах його формування до нормованої 19%-ої вологості, з метою зберігання якісних властивостей волокна. Для реалізації поставленої мети необхідно використовувати штучне сушіння льонотрести в циліндричних паковках – рулонах. А цей процес вимагає значних енергетичних витрат сушильного агента. Для забезпечення використання вдосконаленого технологічного процесу сушіння матеріалу для вирішення поставлених вище питань пропонується сушарка рулонів льонотрести, яка дозволяє забезпечити зменшення затрат праці та енергетичних витрат під час виконання даного процесу у порівнянні з іншими методами.

Технічне рішення по вирішенню питання зниження витрат сушильного агента під час процесу сушіння та зменшення затрат на переміщення рулонів, покладене в запропонованій сушарці рулонів сільськогосподарських культур [27].

Яка працює таким чином. Рулони розміщують у внутрішніх порожнинах секцій роз'ємних циліндрів 1, 2, 3 (рис. 4.1) при піднятих симетричних частинах 4 і 5, вказаних секцій. Після їх закривання тепловентиляційною установкою 8, подають сушильний агент у секцію 3, яка через гнучкі рукави 6 з'єднана з секціями 2 і 1. Тому весь поданий об'єм сушильного агента проходить крізь рулони в секціях 3, 2, 1, відбираючи вологу з льонотрести. Для зниження вологовмісту та підвищення швидкості

переміщення сушильного агента, який вийшов з секцій 3 і 2 на переходах з'єднань секцій, вмонтовані вентилятори В з вологопоглинаючими насадками.

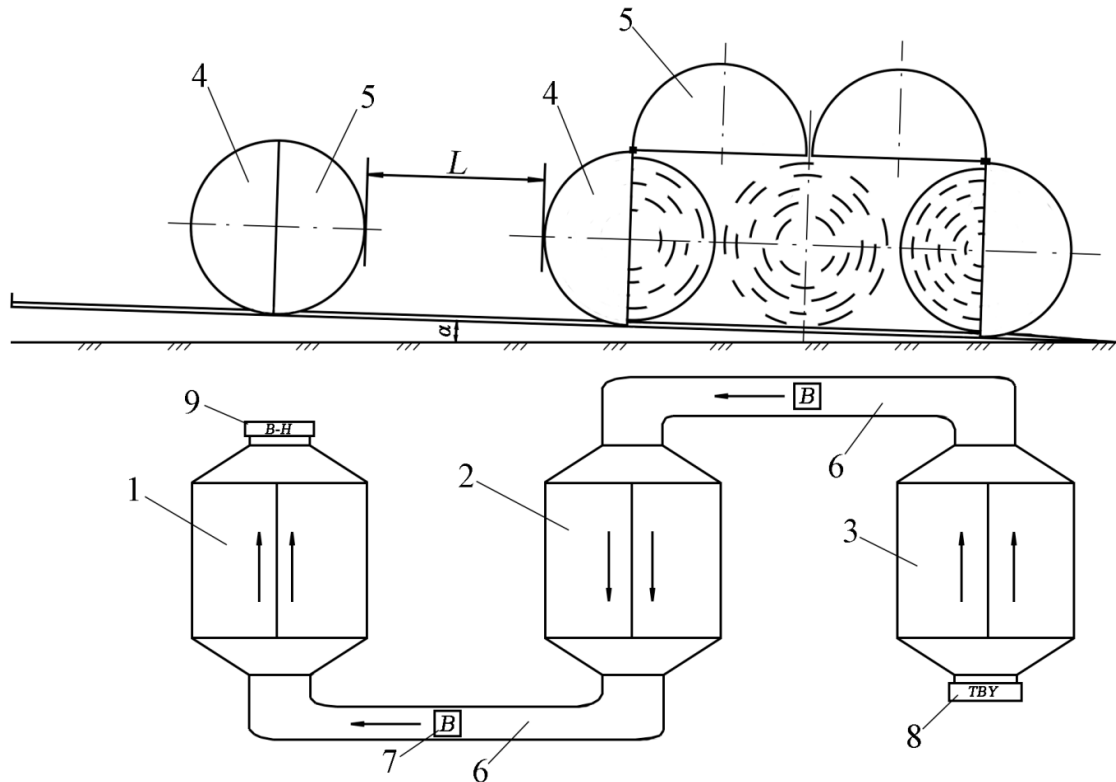


Рис. 4.1. Схема сушарки рулонів з горизонтальною віссю розміщення

Із секції 1 відпрацьований сушильний агент забирають вакуум-насосом. За такого розміщення секцій першим рулоном, у якому льонотреста досягне нормованої вологості, буде рулон секції 3, а в рулонах секцій 2 і 1 вологість буде дещо вищою. Тому рулони з секцій 2 і 1, переміщують відповідно в секції 2 і 3 шляхом їх кочення по похилій площині, розміщеній під кутом 10° . Перед секцією 1 передбачена площадка для накопичення рулонів з початковою вологістю. Відстань між секціями 3, 2, 1 дорівнює величині $L = \frac{3}{2} d$, де d – діаметр рулону. Така відстань дозволяє ефективно її використовувати для відлежування рулонів, з метою забезпечення

досягнення рівномірності сушіння рулонів льонотрести як за висотою, так і за діаметром.

Зниження витрат сушильного агента під час сушіння рулонів льонотрести досягається шляхом створення герметичної сушильної камери [30].

При цьому паковку циліндричної форми по направляючих 2 рами 1 (рис. 4.2) подають до циліндричної камери 3. Відкривають замки 11 і піднімають симетричну частину 4 і у внутрішній порожнині симетричної частини 5 циліндричної камери щільно встановлюють паковку. Після цього циліндричну камеру 3 закривають на замки 11. Ущільнювачі 6 створюють більшу щільність паковки на її кінцях. Через повітропровід 9 сушильний агент подають до циліндричної камери 3 і виводять назовні через повітропровід 10, відбираючи при цьому вологу з матеріалу. Після зниження вологості матеріалу до нормованої відкривають замки 11, піднімаючи частину 5 циліндричної камери 3, і висушену паковку транспортують на зберігання чи подають на подальший обробіток.

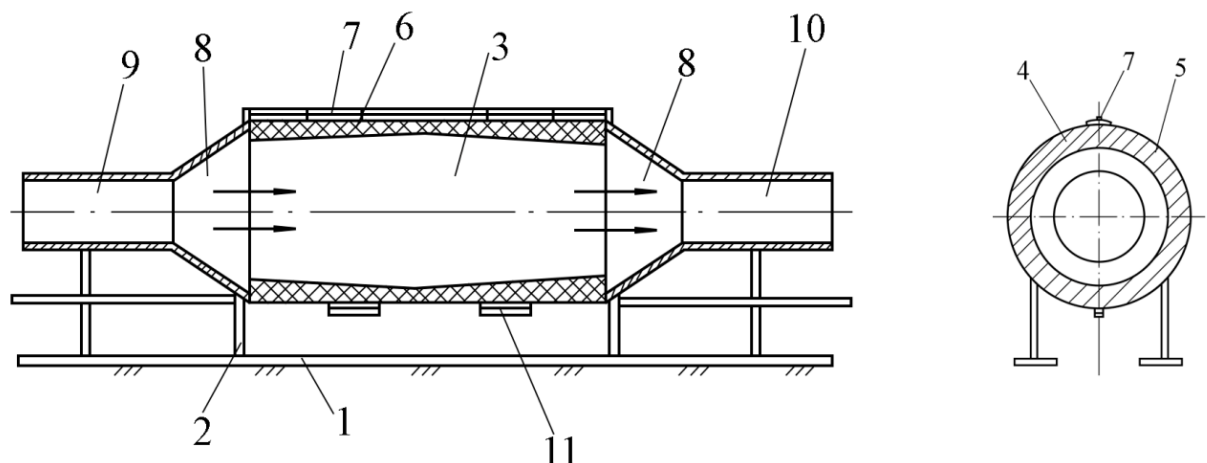


Рис. 4.2. Схема сушильної секції

4.2. Аналіз установок для сушіння рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення

Для сушіння рулонів льонотрести діаметром 1,5 м використовують сушарку, схема якої показана на рис. 4.3. При цьому електротельфером 1 із спеціальним захватом 2 рулон 3 встановлюють на повітророзподільчу систему, створену каналами 4 і 5. Канал 4 при цьому прокладений впоперек сушарки, а основний 5, що прокладений вздовж неї, призначений для підведення теплоносія до рулонів. У свою чергу для регулювання подачі теплоносія в установці передбачена засувка 6 [23].

Недоліком конструкції цієї сушарки є великі втрати теплоносія під час сушіння.

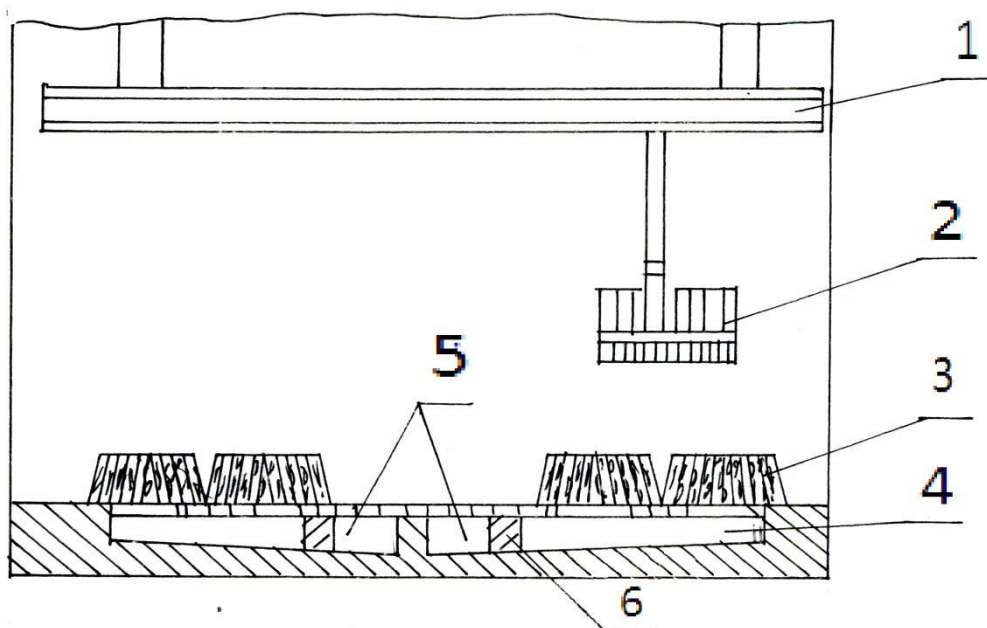


Рис. 4.3. Карусельна сушарка

Найпростішим методом просушування рулонів 1 (рис. 4.4) із зниженням втрат сушильного агента є розміщення їх у брезентовому рукаві 2, краї якого прикріплювались до країв отвору повітропровода 3 [45].

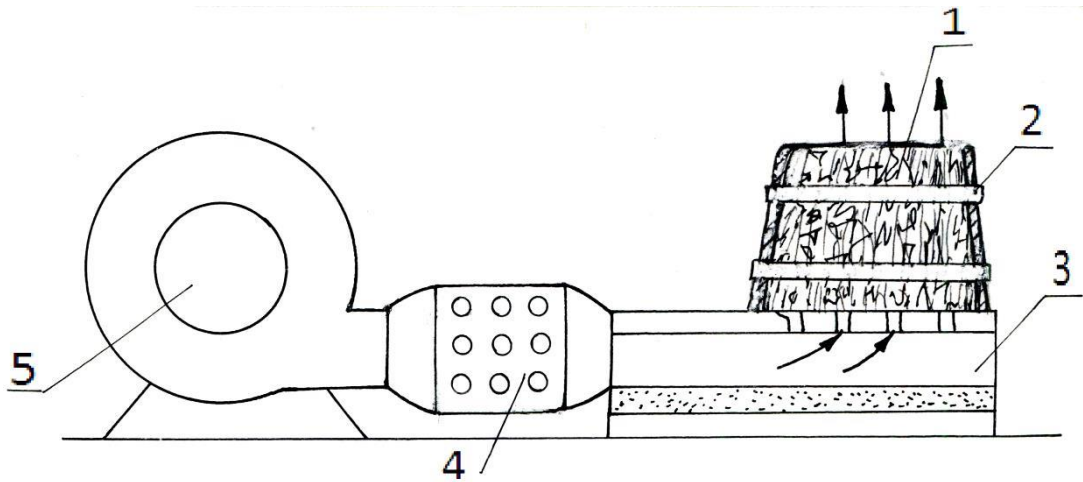


Рис. 4.4. Сушарка рулонів розміщених у брезентовому рукаві

Проте економічність сушарки цього виду залежить від того, як щільно притиснутий рукав до поверхні рулону. На виконання цієї операції потрібно додатково затрачувати ручну працю, що в значній мірі знижує ефективність сушарки.

Аналогічною за конструкцією до цієї сушарки є розроблена західнонімецькою фірмою ФАБ «Бюерберг» установка, що відрізняється тим, що для утворення щільного прилягання внутрішньої поверхні брезентової камери 1 до рулону 2 (рис. 4.5) встановлюють вентилятор 3, який за рахунок створеного ним тиску й забезпечує герметичність сушіння рулону. Але завантаження рулону в таку сушарку є складним процесом і потребує значних зусиль праці [45].

До четвертого способу сушіння спресованого льономатеріалу відноситься установка для сушіння паковок, розроблена Апіхінім А.П, Селівановим А.Г. і Кагіровим Г.М. (рис. 4.6) [6]. Принцип роботи сушарки такий. На перфороване днище 1 встановлюється паковка 2, за допомогою тросів 3 та механізму опускання (підймання) 4, які опускають сушильну камеру 5 і ковпак 6 в робоче положення.

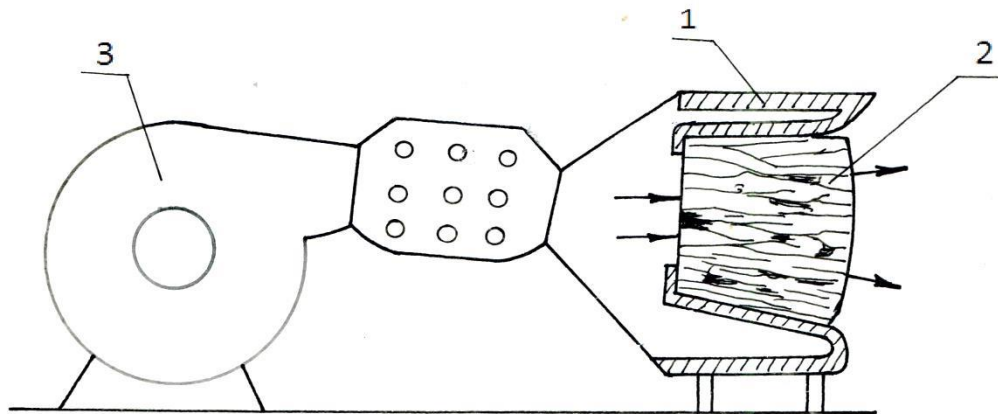


Рис. 4.5 Сушарка рулонів з горизонтально розміщеною центральною віссю

Сушильна камера містить по внутрішньому периметрові ущільнення, виконане у вигляді наборів сегментів, які щільно прилягають до поверхні паковки, що виключає можливість проходження сушильного агента поза паковкою. Нагріте повітря в калориферному блоці (КБ) подається по повітропроводу 7 до сушильної камери і, проходячи через паковку, забирає вологу від матеріалу, виводячи назовні її через трубопровід 8 і перфороване днище 1. Негативним фактором описаної установки є пошкодження периферійних шарів паковки набором сегментів.

Крім вказаних технічних засобів, для сушіння льонотрести, спресованої в рулони, в Англії розроблена сушарка [45], принципова схема якої приведена на рис. 4.7. Всмоктуючі патрубки вентилятора 1 і електрокалорифера 2 розміщують по різні сторони відносно рулонів 3, що забезпечує відсмоктування теплоносія і щільне прилягання цирати до рулонів.

Необхідність виконання допоміжних операцій по приєднанню та з'єднанню як калорифера, так і вентилятора та перехід вологи з одного рулона в інший за рахунок подання-відсмоктування сушильного агента та встановлення рулонів у ряд є суттєвим недоліком описаної установки.

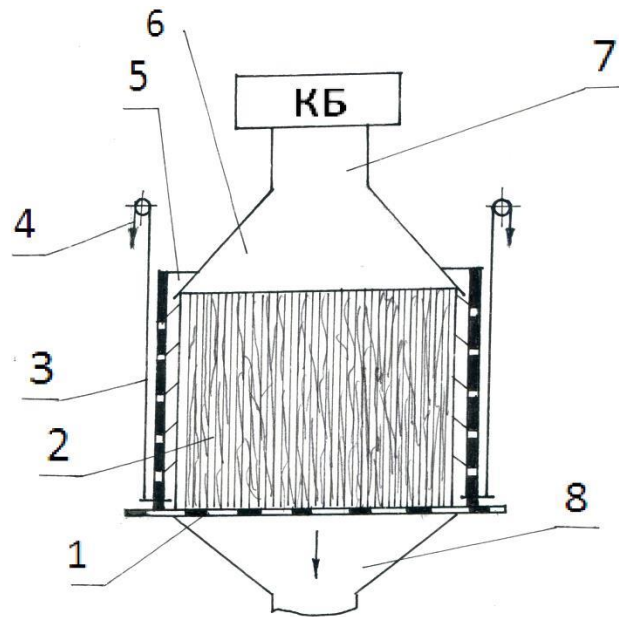


Рис. 4.6. Сушарка паковок з сегментним ущільненням сушильної камери

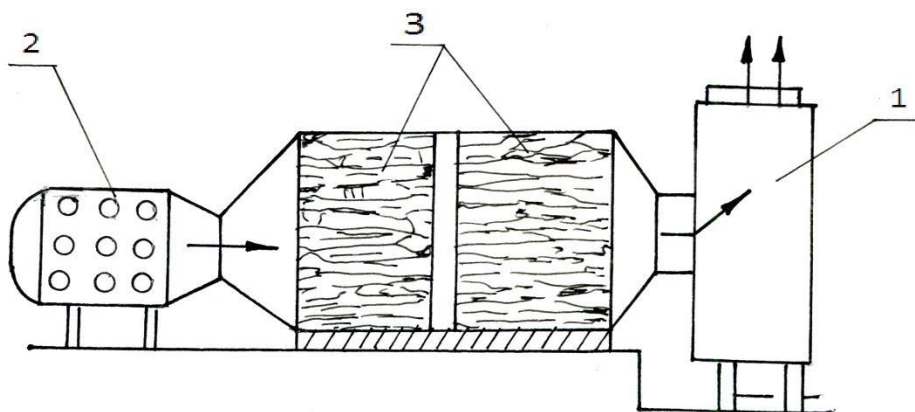


Рис. 4.7. Сушарка рулонів встановлених у ряд

Сушарка (рис. 4.8) не має цих недоліків у конструкції. Вона обладнана теплогенератором 1, вакуум-насосом 2, колектором 3 у вигляді платформи, що обертається, та верхніми і нижніми конусоподібними насадками 4. Насадки містять конусні штирі 5 з прорізами, через які відбувається підведення та відведення сушильного агента. Відсутність герметичної сушильної камери призводить до значних втрат сушильного агента, а наявність штирів – до пошкодження рулону та матеріалу [5].

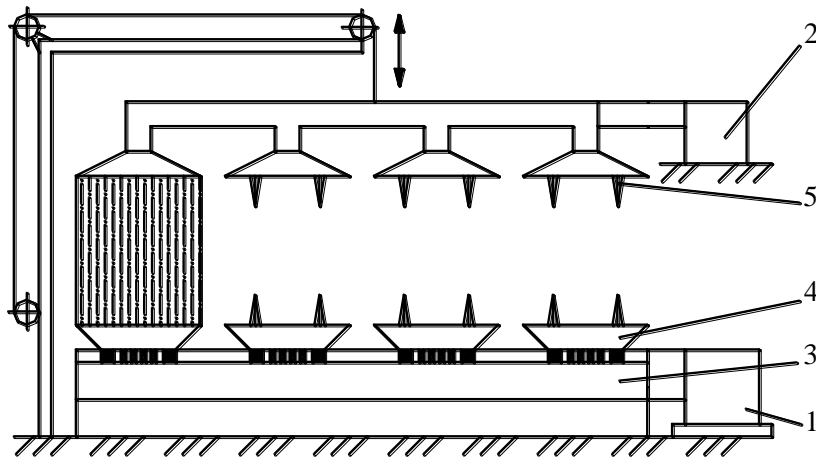


Рис. 4.8. Сушарка рулонів з конусними штирями: 1 – теплогенератор; 2 – вакуум-насос; 3 – колектор; 4 – насадка; 5 – штирі

Сушарка для спресованих у рулони сіна, соломи, трести льону та льоносоломки, (рис. 4.9), складається з трьох сушильних секцій 1, що встановлені на нерухомих днищах 2, виконаних у формі зрізаного конуса, та такої ж форми рухомих ковпаків 3. Сушарка має еластичні герметичні стінки 4 сушильних секцій, які щільно прилягають до рулону за рахунок створення вакууму в секціях. Колектор 5 для сушильного агента з калорифером підключений трубопроводами до днищ та ковпаків. Частини колектора над і під секціями з'єднуються з ними і разом підключаються до вакуум-насоса 6. Кожна з гілок колектора після повітрянагрівача і перед вакуум-насосом обладнана клапанами 7 [3].

Конструкція цієї сушарки дозволяє, комбінуючи закриття і відкриття різних клапанів, забезпечити періодичне заповнення матеріалу у рулонах підігрітим повітрям, та періодичне створення вакууму і різні напрямки руху повітря через рулони.

Таке конструктивне рішення дає можливість значно інтенсифікувати процес за рахунок рівномірного підведення сушильного агента за об'ємом

рулону. Проте недоліком сушарки є складність завантаження рулонів у сушильні секції.

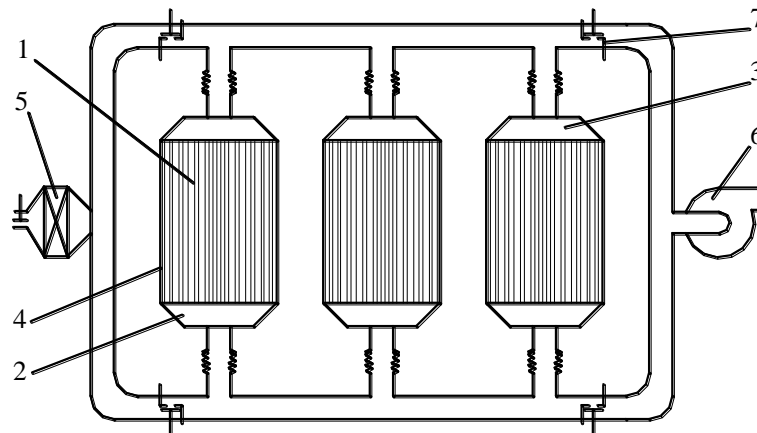


Рис. 4.9. Вакуумна сушарка волокнистих матеріалів у рулонах: 1 – сушильна секція; 2 – днище; 3 – ковпак; 4 – еластичні стінки; 5 – колектор; 6 – вакуум-насос; 7 – клапан

Серед конструкцій для сушіння рулонів з центральним вентиляційним каналом можна виділити сушарку (рис. 4.10), яка містить сушильну камеру 1, виконану у вигляді двох сегментів циліндрів, що розміщені горизонтально і співвісно. На торцях камера обладнана кришками, одна з яких виконана з отвором для подачі сушильного агента. Конструкція забезпечує можливість обертального переміщення внутрішнього сегмента 2 циліндра відносно нерухомого зовнішнього 3. Частина повітророзподільчої системи змонтована у товщині стінок сегментів у вигляді труб 4, що з'єднані з колектором, який в свою чергу з'єднаний з вентилятором. Труби виконані перфорованими з внутрішньої сторони камери сушіння. У сушильній камері передбачене ущільнення рулонів.

При відкритому внутрішньому сегменті рулон завантажується у сушарку і сушильна камера закривається. Сушильний агент вентилятором через отвір у кришці подається в осьовий канал рулону. Пройшовши через

рулон, він відсмоктується вентилятором через перфорацію труб і колектор у стінках сегментів і викидається назовні [28].

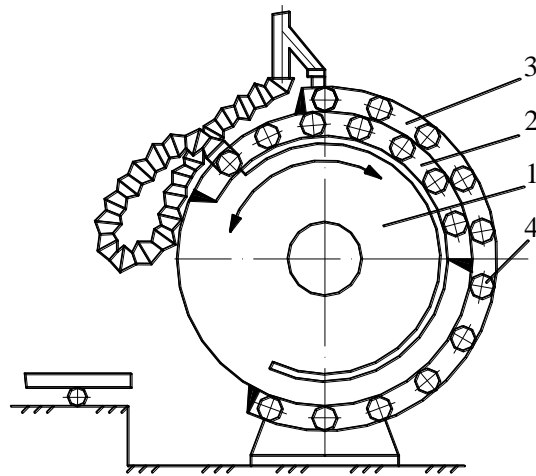


Рис. 4.10. Сушарка рулонів з центральним вентиляційним каналом: 1 – сушильна камера; 2, 3 – внутрішній та зовнішній сегменти; 4 – труби

Запропонована сушарка хоча і забезпечує кращу циркуляцію сушильного агента через рулон, але має складну систему відведення відпрацьованого сушильного агента. І процеси завантаження і вивантаження рулонів у сушильну секцію не передбачено.

Наступна сушарка рулонів (рис. 4.11) не містить таких недоліків. Оскільки складається з камери сушіння 1, рухомих візків 2, повітророзподільної системи 3. На кожному візку є два яруса настилів з отворами. Над кожним з них є повітропроводи з еластичними рукавами 4 та заслінками. У нижній частині рукавів є ущільнюючі кільця. Принцип роботи сушарки такий. За допомогою завантажувача рулони встановлюють на настили над отворами, після чого опускається рама з рукавами, які надягаються на рулони. Далі візок заковчується у камеру сушіння, з'єднується з вентиляторами. Вентилятори всмоктують сушильний агент, який крізь отвори у настилі проходить через рулони та виводиться повітропроводом. За рахунок створеного вентилятором розрідження еластичні рукави щільно

прилягають до рулонів, а ущільнююче кільце притискається до настилу. У залежності від вологості матеріалу подача сушильного агента регулюється заслінкою над рулонами. Позитивним є можливість регулювання подачі сушильного агента для кожного рулону окремо. Але великі габаритні розміри сушарки та наявність візка є негативними сторонами сушарок даного виду [4].

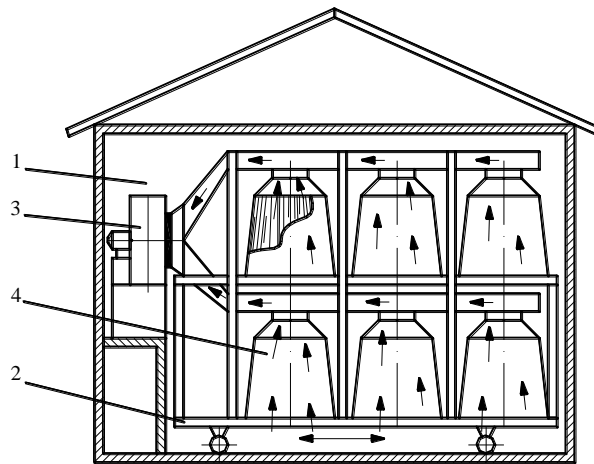


Рис. 4.11. Камерна сушарка рулонів сільськогосподарських культур: 1 – камера сушіння; 2 – візок; 3 – повітророзподільча система; 4 – рукав

Заслугою уваги конструкція установки для сушіння циліндричних і прямокутних паковок (рис. 4.12). Установка складається з вентиляційних камер 1, які розміщені одна над одною. На двох нижніх камерах розташовуються рулони, а на верхній – повітродувно-нагрівальний пристрій 2. Верхня і нижня поверхні двох нижніх камер обладнані отворами 3 для продування. Установка може знаходитися у двох станах: робочому – коли камери підняті і транспортному – коли камери опущені. Піднімання і опускання камер здійснюється телескопічними блоками 4. При піднятих камерах в установку завантажують рулони, встановлюючи їх співвісно отворах для продування. Після чого, подають сушильний агент одночасно з двох сторін рулона, який проходячи через матеріал виходить назовні.

Перевагою установки є можливість її переміщення. Подача сушильного агента з обох сторін дозволяє забезпечити рівномірніше сушіння за висотою паковки. Основні недоліки установки – відсутність герметичної камери, що веде до неефективного використання сушильного агента та складність обслуговування конструкції [31].

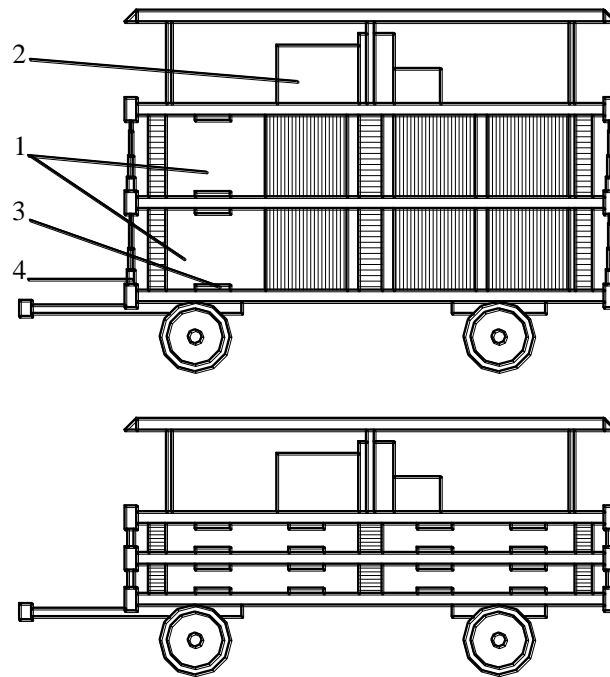


Рис. 4.12. Пересувна двоярусна сушарка для паковок різної форми: 1 – вентиляційна камера; 2 – повітрорудовно-нагрівальний пристрій; 3 – отвір; 4 – телескопічний блок

Рівномірне сушіння льоносировини в рулоні та зменшення енергоємності процесу досягається за рахунок реверсивного почергового підведення сушильного агента та атмосферного повітря з врахуванням структурних характеристик паковки. Для забезпечення даного способу та режиму сушіння пропонується сушарка рулонів льоносировини з диференційованим підведенням сушильного агента та атмосферного повітря (рис. 4.13). Сушарка дозволяє реалізувати рівномірне сушіння, а також зменшити енерговитрати шляхом врахування особливостей розподілу

матеріалу за об'ємом паковки при підведенні сушильного агента та атмосферного повітря. Крім того, конструктивне виконання сушарки забезпечує компактне розташування сушильних секцій, механізацію переміщення рулонів у процесі сушіння та спрощує їх завантаження-вивантаження [29; 37 – 39].

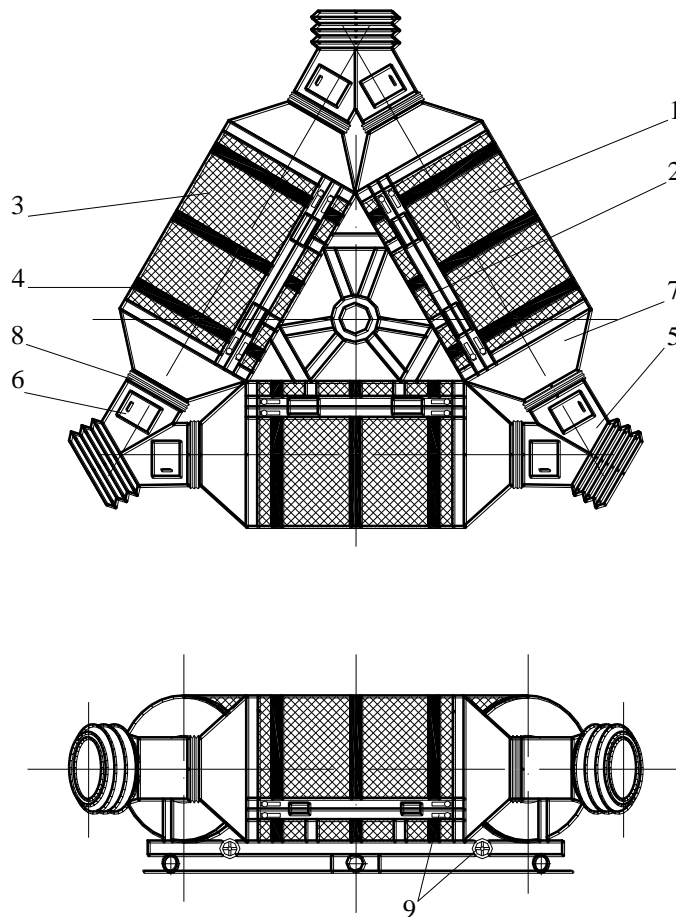


Рис. 4.13. Сушарка льоносировини в рулонах

Дана установка містить три сушильні секції, що складаються з верхньої 1 і нижньої 2 півсекцій. Для забезпечення проходження сушильного агента та атмосферного повітря через рулони у повному об'ємі та зменшення металомісткості конструкції, паковки охоплюються еластичним матеріалом 3, прикріпленим до каркасу (рами) сушильних секцій. Щільне прилягання еластичного матеріалу до рулону досягається за рахунок використання

стягуючих пасів 4. До повітропроводів 5 з вікнами 6, що встановлені між сушильними секціями на рамі та з'єднані з ними через ковпаки 7, під'єднуються калорифери з вентиляторами. Рулони льоносировини мають різну висоту, тому для притискання до них ковпаків у сушарці передбачена можливість зміни довжини сушильних секцій. Установа обладнана гнучкими з'єднаннями 8 між ковпаками і повітропроводами та механізмами 9 переміщення ковпаків з боковинами сушильних секцій.

Для завантаження рулону сушильна секція встановлюється у положення «завантаження». При піднятій верхній півсекції 1 шляхом кочення напрямними доріжками 2 рулон 3 завантажується у нижню півсекцію 4 і опускають верхню півсекцію, (рис. 4.14, а). Аналогічно завантажуються усі сушильні секції.

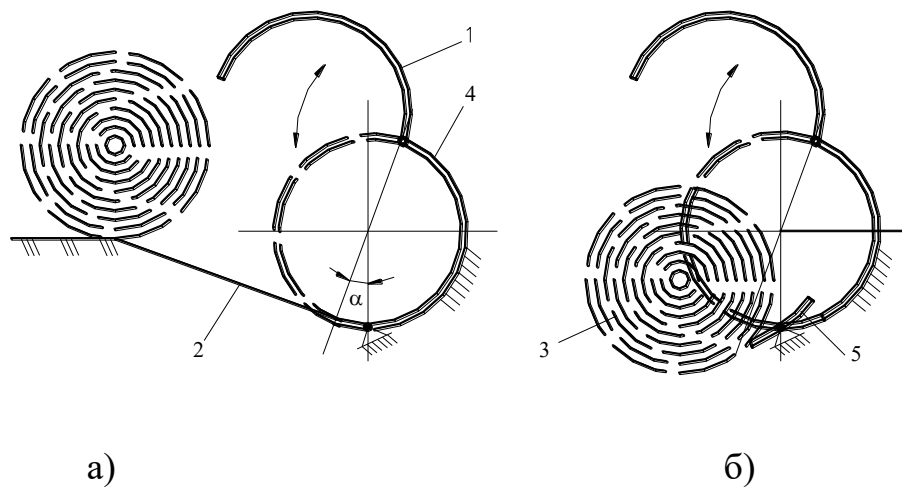


Рис. 4.14. Схема процесу «завантаження-вивантаження» рулону: а – положення «завантаження»; б – положення «вивантаження»

Вивантаження рулону відбувається у положенні сушильної секції «вивантаження». Для цього піднімається верхня півсекція та звільняється рухома частина 5 нижньої півсекції і рулон під дією власної ваги випадає з нижньої півсекції (рис .4.14, б).

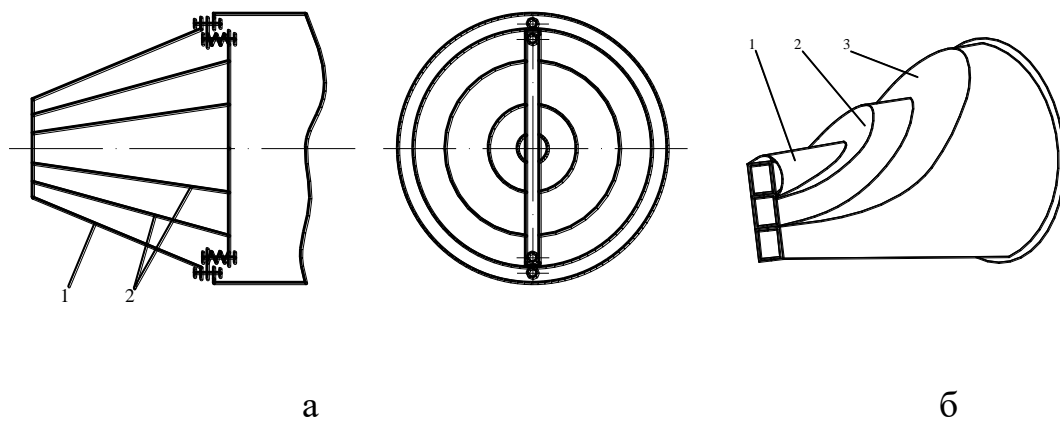


Рис. 4.15. Схеми ковпаків: а – утворених набором спрямовувачів; б – утворених дифузорами

За допомогою заслінок у повітропроводах потоки сушильного агента та атмосферного повітря спрямовуються до необхідної сторони ролонів (реверсивне підведення). З протилежної сторони до сторони підведення у повітропроводах відкриваються вікна для відведення відпрацьованих сушильного агента та атмосферного повітря.

Для раціонального використання сушильного агента та атмосферного повітря у сушарці передбачено їх диференційоване підведення до шарів ролону. За рахунок встановленням ковпаків двох видів. Перший вид передбачає встановлення спрямовувачів повітряного потоку 1 (рис. 4.15, а), які розміщені у ковпаках 2 і забезпечують підведення більшого об'єму повітря до більш щільних шарів і меншого – до шарів у ролоні з меншою щільністю.

Ковпаки другого виду являють собою утворені дифузори, що розміщені один в одному (рис. 4.15, б). Їх вхідні отвори містять прямокутні поперечні перерізи, а вихідні отвори – круглі, а середні 2 та периферійні 3 – форми кілець. Вхідні отвори дифузоров приєднано до повітропроводу та обладнано заслінками, які призначені для регулювання інтенсивності вентилявання шарів ролону. Перевагою ковпаків другого варіанта, у

порівнянні з першим, є можливість їх використання для вентиляції рулонів, утворених як у камері сталого, так і змінного об'ємів. Натомість у ковпаках першого варіанта необхідно змінювати набір спрямовувачів, хоча вони простіші у виготовленні.

Для реалізації реверсивного коливного температурного режиму спочатку до всіх рулонів з одного торця підводиться сушильний агент, а потім з того ж торця підводиться атмосферне повітря. Після чого за допомогою заслінок забезпечують підведення спочатку сушильного агента, а потім атмосферного повітря з іншого торця рулонів. При необхідності цикл «нагрівання-охолодження» повторюють з іншого торця рулонів. Конструкція сушарки льоносировини в рулонах забезпечує реалізацію сушіння як без її обертання, так і з періодичним обертанням між циклами «нагрівання – охолодження», що дозволяє просторово відділити місця завантаження та вивантаження рулонів.

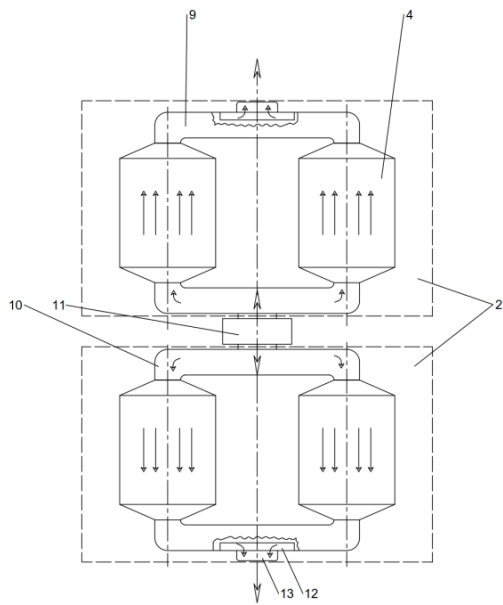
Але при всіх позитивних особливостях негативною є складність конструкції установки для сушіння матеріалу.

Найбільш близькою за технічною суттю до запропонованої сушарки для рулонів сільськогосподарських культур, є сушарка, що містить змонтовану на рамі 1 багатосекційну об'єднану попарно у блоки 2 сушильну камеру, кожна з секцій якої, 3, виконана у формі роз'ємного циліндра 4 з рухомою напівциліндричною стулкою 5 та розміщених опозитно на торцях циліндра 4 днищ 6, виконаних у вигляді зрізаних конусів, при цьому внутрішня поверхня кожної секції 3 сушильної камери містить ущільнювач 7, рис. 4.16. На нижній частині рухомої стулки 5 змонтовані в ряд конічні перфоровані порожнинні насадки 8, що містять вологопоглинач та розташовані із збільшенням відстані одна від одної (за тепло-технічним розрахунком). Блок 2 сушильної камери включає у себе ділянки повітропроводу 9, що виконаний у вигляді гнучких рукавів 10, що розміщені

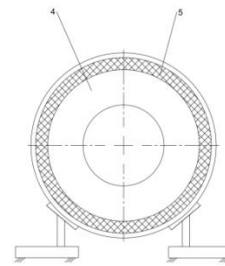
опозитно відносно джерела тепла 11, наприклад, тепловентилятора. Кожна з ділянок повітропроводу містить колектор 12 з насадкою для відводу газоподібних продуктів сушіння, при цьому колектор споряджено додатково насосом 13 [33].

Ця сушарка працює таким чином. Рулон завантажують у внутрішню порожнину секції 3 сушильної камери для чого попередньо піднімають рухому напівциліндричну стулку 5, секції сушильної камери; після завантаження рулона опускають стулку 5. Змонтовані на цій стулці перфоровані конічні насадки 8 виконують функцію механізму центрування рулону та підтримки стабільного розміщення всередині секції. Після чого вмикають тепловентилятор 11 для подачі сушильного агента до рулонного матеріалу в кожену секцію сушильної камери. Сушильний агент проходить крізь матеріал по повітропроводу та завдяки наявності колектора відводить назовні. У разі підвищеної вологості матеріалу, з метою збільшення швидкості руху сушильного агента та прискорення процесу вмикають насос 13 (для додаткового відсмоктування), що розміщений на виході повітропроводу. А також розміщують вологопоглинач у середині конічних насадок. Загальна конструкція сушарки дає можливість одночасно використовувати декілька або усі сушильні секції. Крім того у кожному з блоків 2 можна до секцій 3 під'єднати додаткові секції, збільшивши таким чином продуктивність сушарки.

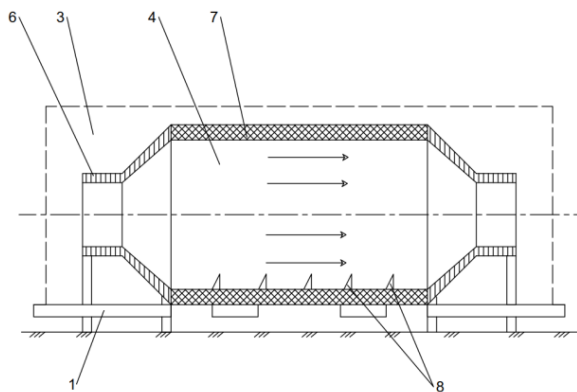
Недоліком такого типу сушарок є складність та велика габаритність конструкції, а також суттєві витрати на переміщення рулонів.



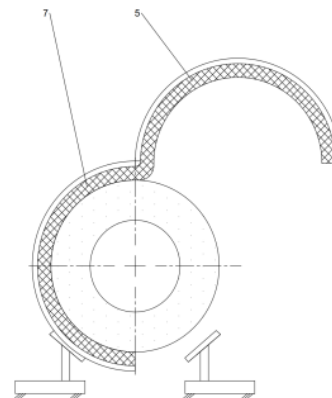
а)



б)



в)



г)

Рис. 4.16. Чотирисекційна сушарка для рулонів сільськогосподарських культур; а -- загальний вигляд; б – секція сушильної камери у поперечному перерізі (в положенні «закрита»); в – секція сушильної камери у повздовжньому перерізі; секція сушильної камери у поперечному перерізі (в положенні «відкрита»)

На рис. 4.17 зображена також чотирисекційна сушарка для рулонів сільськогосподарських культур. Яка містить раму 1 із змонтованими на ній сушильними рознімними секціями 2, що з'єднані із повітророзподільчою системою, до складу якої входять споряджені гофрованими вставками 3 повітропроводи 4 з колекторами 5 та джерелом 6 примусової подачі сушильного агента, відсмоктувальним вентилятором 7 (який застосовують в разі підвищеної вологості сировини). Кожна з кришок 8 сушильної секції 2 з'єднана пасом 9, який перекинуто через шків 10 на верхній перекладині рами 1, зі штоком пневмоциліндра 11. Кожна сушильна секція 2 оснащена рухомим піддоном 12, торцеві краї якого під'єднані тросами до пневмоциліндрів 11, а краї, що контактують із сушильними секціями 2 закріплені до рами 1 шарнірами 13. Для зменшення матеріаломісткості піддон виконаний у вигляді напрямних, об'єднаних кріпильними рейками у єдину площину [34].

Перед початком роботи рухомі піддони 12 кожної сушильної секції 2 за допомогою тросів, (які є конструктивним елементом приводу) та які з'єднують торці піддонів 12 з пневмоциліндрами 11, встановлюють з нахилом до горизонталі, забезпечуючи таким чином необхідний кут для кочення рулону у, попередньо відкрити сушильну камеру 2. Кришку 8 сушильної секції 2 відкривають за допомогою пасу 9, що з'єднаний зі штоком пневмоцилінра 11 при русі штоку донизу. При зворотному русі (вгору) штоку пневмоцилінра 11, кришка 8 сушильної камери закривається, а піддон 12 займає вихідне горизонтальне положення (або положення з невеликим нахилом вниз).

Для забезпечення роботи сушарки завантажують її секції 2 рулонами рослинного матеріалу та подають сушильний агент (повітря) від відповідного джерела примусової подачі (вентилятора). Сушильний агент (повітря) проходячи крізь перший колектор 5 та повітропроводи з

сушильних камер відводяться крізь другий колектор з сушарки. У залежності від ступеня вологості вихідного матеріалу, передбачено підключення відсмоктуючого вентилятора 7. За необхідності прискорення процесу сушіння сушильний агент (повітря) можна подавати з підігрівом.

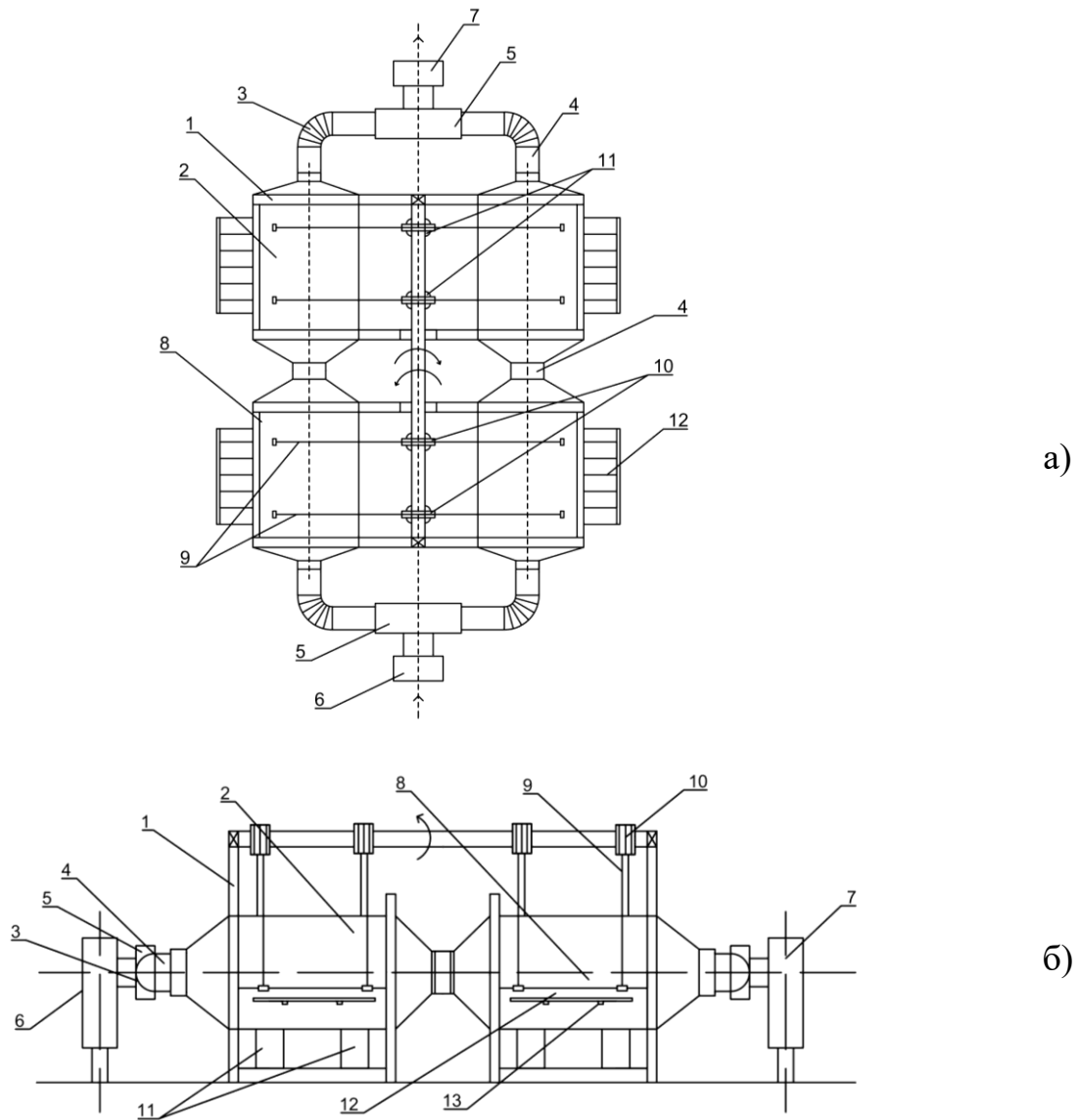


Рис. 4.17. Схема сушарки: а – вигляд зверху; б – вигляд збоку

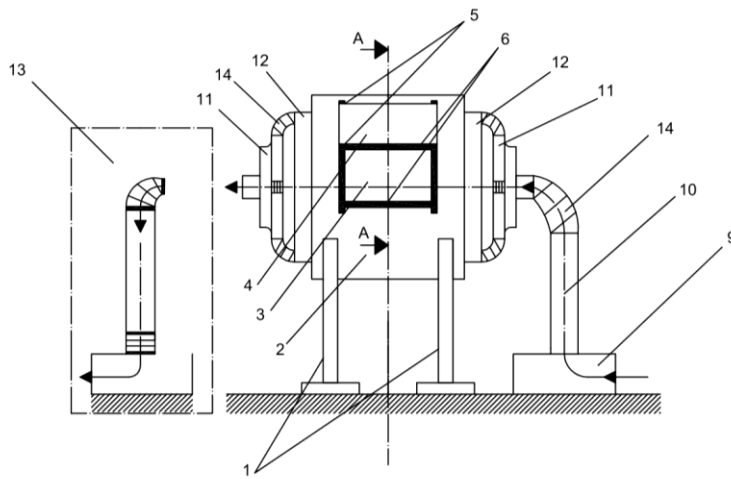
Повітропроводи 4 в основному є гладкими трубами і споряджені лише гофрованими вставками 3 у місцях згину (для зручності монтажу) та

безпосередньо перед бічними кришками сушильних секцій 2 на їх вході для створення турбулентності потоку повітря, що покращує процес сушіння за такої організації потоку повітря.

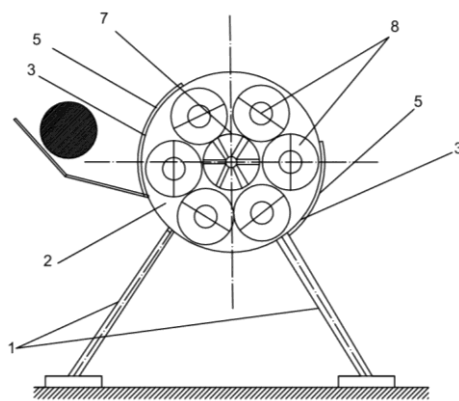
Недоліком цього виду сушарки є складність механізму завантаження-розвантаження рулонів, який виконаний у вигляді системи пасів і пневмоциліндрів, що змонтовані спільно зі шківками на рамі сушарки, та оснащений рухомим піддоном з приводом від пневмоциліндрів.

Наступний вид сушарки для рулонів сільськогосподарських культур, рис. 4.18, містить опори 1, на яких встановлено сушильну камеру 2, корпус якої виконаний у вигляді барабана. На зовнішній циліндричній поверхні якого встановлені два вікна 3 для завантаження-відвантаження рулонів. Вікна 3 містять зсувні дугоподібні кришки 4, що змонтовані на рейках 5. При цьому вікна 3 та кришки 4 облямовані по торцях герметичними прокладками 6. В середині сушильної камери 2 розміщений порожнинний барабан 7 (з можливістю обертання). Він встановлений коаксиально до основного барабану (корпусу сушильної камери 2) [35].

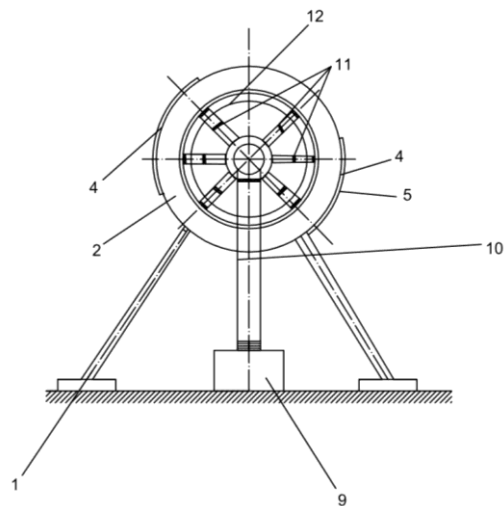
Секції 8 сушильного барабана мають напівциліндричну форму та скріплені з порожнинним барабаном 7. Подача повітря від вентилятора 9 до сушильної камери 2 здійснюється через центральний трубопровід 10 з можливістю центрування потоків повітря до кожного рулону за допомогою рукавів 11, що об'єднані у колектор 12. Якщо рівень вологості рулонів великий, повітря відсмоктують з барабана (сушильної камери 2) шляхом під'єднання знімної системи 13 для відсмоктування вологого повітря. Для зручності монтажу повітропроводів (рукавів 12). Для зручності монтажу повітропроводів (рукавів у місцях згинання, останні споряджені гофрованими вставками 14.



а)



б)



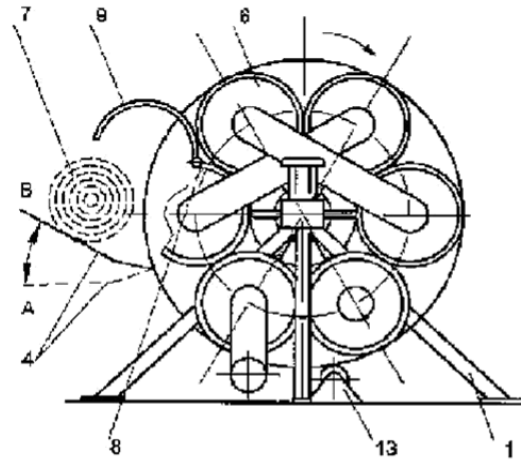
в)

Рис. 4.18. Схема барабанної сушарки рулонів сільськогосподарських культур; а – вигляд спереду, б – вигляд у поперечному перерізі, в – вигляд збоку з повітропровідною системою

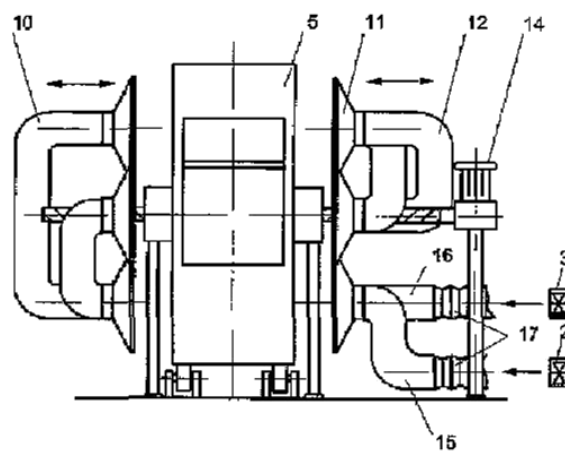
Ця сушарка працює таким чином. Рулони сільськогосподарських культур по похилій підставці завантажують крізь вікно 3 у сушильну камеру 2 безпосередньо у секцію 8. Після чого внутрішній порожнинний барабан 7 за допомогою приводу повертають так, щоб співпала для завантаження наступна секція 8. За повного завантаження усіх секцій сушарки щільно закривають вікно 3 за допомогою дугоподібної кришки 4, переміщуючи її по рейках 5. Надійність закривання забезпечують герметичні прокладки 6 на кришці 4 та на торцях вікон 3, а в щільно закриту сушильну камеру 2 подають повітря, вимикаючи вентилятор 9. Повітря по повітропроводу 10, рукавах 11 та колектору 12 проходить крізь рулони до отримання ними кондиційної вологості. Висушені у сушарці рулони вивантажують через інше (вивантажувальне) вікно 3 шляхом зсуву іншої кришки 4 по рейках 5. За потреби вентилятор може бути обладнаний калорифером з регулятором для подачі теплого повітря періодично. У разі потреби інтенсифікації процесу вентилятор може бути споряджений калорифером із регулятором для подачі теплого повітря періодично чи до протилежного торця сушильної камери 2, під'єднують відсмоктуючу систему 13.

Недоліком даної сушарки є знімна, а не стаціонарна система для відсмоктування вологого повітря.

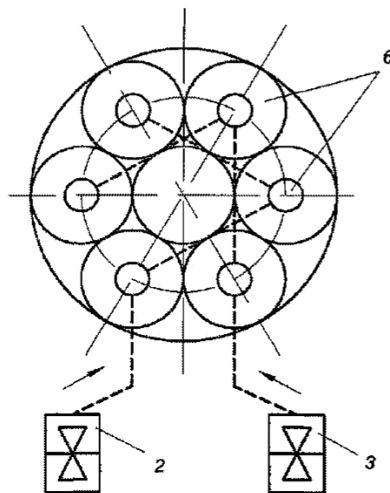
Подібного виду сушарка для рулонів сільськогосподарських культур, рис. 4.19, містить раму 1, джерело тепла 2, вентилятор атмосферного повітря 3, механізм завантаження-вивантаження 4, сушильну камеру 5, яка включає шість роз'ємних циліндричних секцій 6, у яких розміщені рулони 7. Секції 6 складаються з нерухомих 8 і рухомих пів-секцій 9 [26].



а)



б)



в)

Рис. 4.19. Сушарка рулонів сільськогосподарських культур: а – загальний вигляд; б – вид збоку; в – схема руху сушильного агенту та атмосферного повітря в процесі сушіння рулонів

У той же час сушильна камера 5 обладнана суцільною повітророзподільчою системою 10 із конусоподібними днищами 11, повітропроводами 12 та приводами 13 і повітророзподільчої системи 14. З'єднання повітророзподільної системи 10 із джерелом тепла 2 та вентилятором атмосферного повітря 3 виконано через вхідні патрубки для сушильного агенту 15 та атмосферного повітря 16 у вигляді гофри 17.

Установка працює таким чином. Рулон під дією сил гравітації переміщується по механізму завантаження-вивантаження 4 у роз'ємну циліндричну сушильну секцію 6, у якій рухома пів-секція 9 відкрита. Після встановлення рулону 7 у нерухому пів-секцію 8, рухома пів-секція 9 під дією власної ваги закриває роз'ємну циліндричну сушильну секцію 6. Аналогічно за допомогою приводу повітророзподільчої системи 14 конусоподібні днища 11 повітророзподільчої системи 10 щільно прилягають до роз'ємних циліндричних сушильних секцій 6. Після цього одночасно включають джерело тепла 2 і вентилятор атмосферного повітря 3. Сушильний агент і атмосферне повітря надходять у повітророзподільчу систему 10 через гофри 17 та вхідні патрубки для сушильного агенту 15 та атмосферного повітря 16 відповідно з джерела тепла 2 та вентилятора атмосферного повітря 3. По повітропроводах 12 повітророзподільчої системи 10 сушильний агент і атмосферне повітря рухаються через рулони 7 за схемою «один через один». Таким чином отримується три цикли «нагрівання-охолодження» рулонів. Після досягнення кондиційної вологості в останньому рулоні механізм завантаження-вивантаження 4 встановлюється в положення «вивантаження». А – рухома пів-секція 9 відкривається і рулон 7 під дією сил гравітації переміщується на подальший обробіток або збереження, а механізм завантаження-вивантаження 4 встановлюється у положення «завантаження» і черговий рулон подається у звільнену роз'ємну циліндричну сушильну

секцію 6. Обертання сушильної камери 5 навколо осі здійснюється приводом сушарки 13.

Недоліком такої установки є складність конструкції.

Наступна установка для сушіння рулонів сільськогосподарських культур, не має вказаного недоліку. Оскільки вона містить встановлену на шасі 1 раму 2 з причепом 3 до енергомодуля, наприклад, трактора, рис. 4.20. На рамі 2 встановлені вентилятори 4, 5, один з яких є нагнітальним (і в разі високої вологості рулонного матеріалу може бути додатково спорядженим калорифером), а другий вентилятор є відсмоктуючим. Між вентиляторами 4 і 5 розміщена система повітропроводів 6, яка прикріплена до рами 2 кріпильними елементами, наприклад, хомутиками 7. Для полегшення монтажу повітропроводу 6 можуть бути виконані еластичні труби [36].

Всередині рами 2, на її нижній частині, змонтовані піддони 8 з концентрично розташованими у них отворами. При цьому під кожним піддоном встановлений запірний пристрій 9, а у верхній частині рами 2 змонтовані ковпаки 10, які втулкою (верхньою) стороною з'єднані із трубами повітропроводу 6, а з другою стороною (нижньою) прикріплені до гофрованих труб еластичних рукавів 11. Нижні торці гофрованих рукавів 11 споряджені жорсткими манжетами 12, по периметру яких встановлені еластичні ущільнювачі 13. На зовнішній поверхні у западинах гофрів еластичних рукавів 11 розміщені пружини стискання 14, а до низу жорстких манжет 12 прикріплені пластини 15 з концентричними отворами.

У проміжках між концентричними отворами на піддонах 8 та на пластині встановлені перфоровані кільцеподібні трубки 16 з вологопоглинаючою речовиною. Трубки 16 виконані знімними для забезпечення заміни вологопоглинача. Пластина 15 виконана із кільцевими концентричними отворами, що сприяє утворенню вертикально орієнтованих циліндричних потоків повітря, крім того пластина 15 виконує функцію

додаткового тримача, що надійно закріплює рулони по вертикалі.

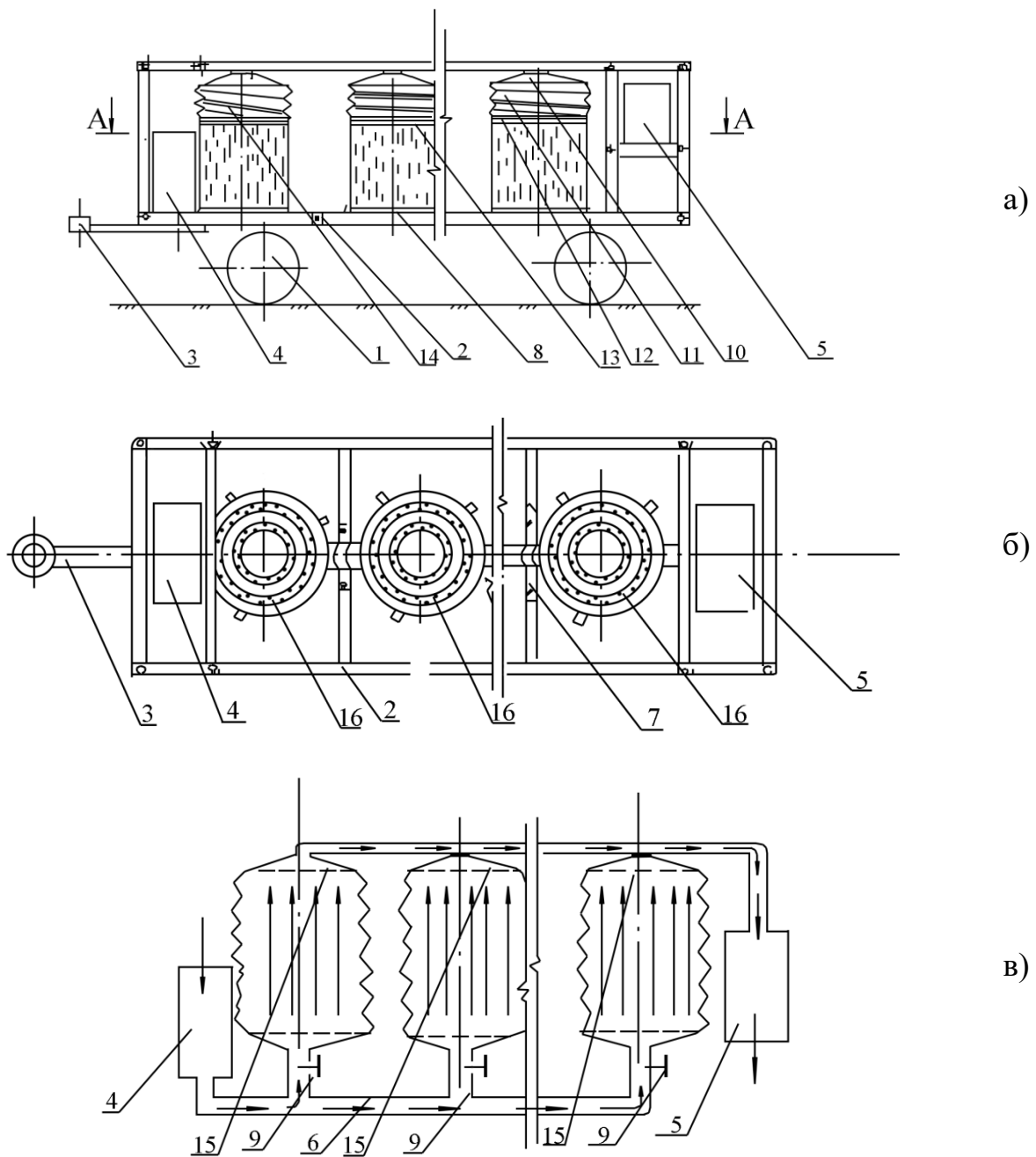


Рис. 4.20. Пересувна сушарка для рулонів сільськогосподарських культур: а – вигляд збоку, б – вигляду зверху у площині А-А; в – схема руху енергоносія у системі повітропроводів

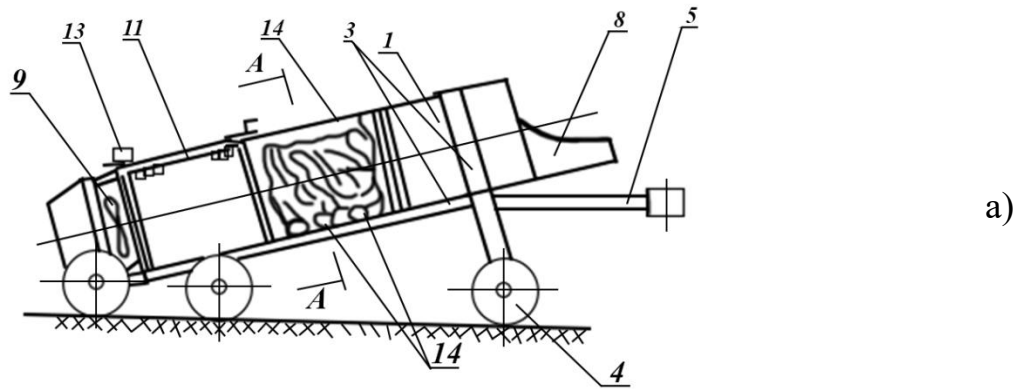
Установка працює таким чином. Рулони завантажують на піддони 8, після чого опускають гофровані труби еластичних рукавів 11 та притискають еластичні ущільнювачі 13, що розміщені по периметрах жорстких манжет 12

та піддонів 8 за допомогою притискачів, які розміщені симетрично по колу, щонайменш у трьох точках по лінії контакту ущільнювачів. Таким чином, розтягуючи донизу гофровані труби рукавів 11 та пружину стискання 14 утворюють герметичну камеру сушіння. Коли сушильні камери готові до роботи, вмикають вентилятори 4 і 5, одночасно подаючи та відсмоктуючи повітря. Завдяки наявності над і під рулонами кільцеподібних отворів (у піддонах 8 та у пластинах 15) енергоносій проходить крізь рулон вертикальними потоками у форми циліндричних поверхонь, орієнтованих вздовж геометричної вертикальної осі кожного рулону.

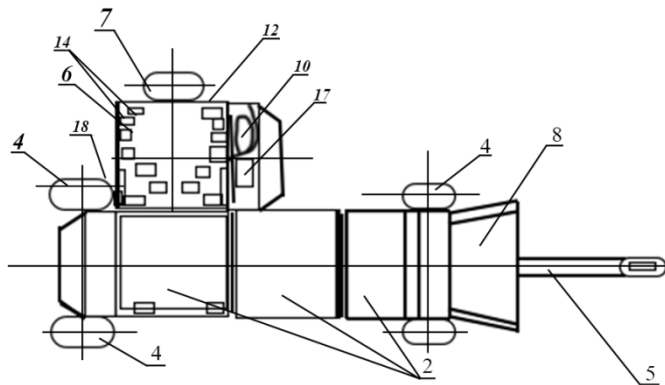
Завдяки наявності вологопоглинаючої речовини у перфорованих трубках 16, швидкість відділення вологи з рулонів підвищується, чим прискорюється процес сушіння. Вентилятори 4 і 5 можна функціонально вмикати реверсивно для зворотної подачі-відведення сушильного агента, що сприятиме рівномірності сушіння рулонів.

Недоліком цієї установки є значні затрати на завантаження-розвантаження рулонів у сушильні секції сушарки.

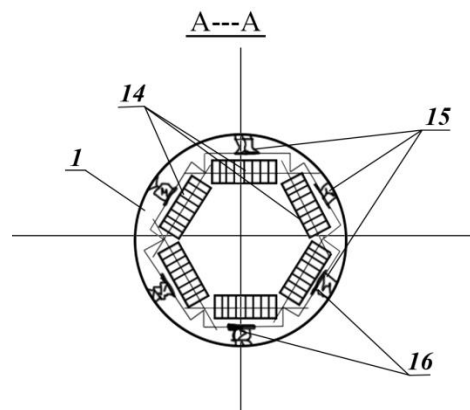
Пересувний вид сушарки для сформованих у рулони сільськогосподарських матеріалів, рис. 4.21, містить корпус 1, виконаний у вигляді послідовно з'єднаних сушильних секцій 2, що встановлені на похилій рамі 3, яка змонтована на шасі 4. На початку рами розміщена сниця 5. Поряд із основною сушильною секцією встановлена додаткова секція 6, яка містить власне опорне колесо 7. Перед першою сушильною секцією розміщений прийомний лоток 8, для завантаження вологих рулонів. На кінці останньої сушильної секції 2, в корпусі 1, встановлений вентилятор 9 для подачі повітря, а на початку додаткової сушильної секції 6 встановлено вентилятор 10.



а)



б)



в)

Рис. 4.21. Сушарка рулонів сільськогосподарських культур: а - вигляд збоку; б - вигляд зверху; в - поперечний переріз секції сушильної камери (А-А)

При цьому додаткова сушильна секція 6 та остання секція корпусу 1 споряджені відкидними кришками 11 і 12. А також кожна з цих секцій має ідентичні опозитно розташовані прорізи на їх тильних бічних сторонах. Між сушильними секціями 2 розташовані рухомі рулоноутримувачі 13. Вздовж

кожної сушильної секції 2 встановлені, з можливістю обертального руху, ролики 14 з рифленою робочою поверхнею, для надійного захвату та зсуву рулонів від першої до останньої сушильної секції. Ролики 14 у місцях кріплення до корпусу 1 споряджені пружинками 15, що встановлені в еластичних гофрованих стаканчиках 16. Під додатковою сушильною секцією розміщено озонатор 17 із вбудованим у його корпус акумулятором, як джерела живлення. Між останньою секцією багатокамерної сушарки та додатковою сушильною секцією 6 змонтована телескопічна штора 18 з герметизованою облямівкою, для перекривання прорізів контактуючих між собою секцій, під час виконання робочого процесу [32].

Установка працює таким чином. На прийомний лоток 8 корпусу 1 сушарки завантажують рулон рослинного матеріалу. Завдяки нахилу корпусу 1 рулон і роликів 14, рулон переміщується у першу сушильну секцію 2. Рулон надійно утримується за рахунок роликів, що симетрично підпружинені в напрямку центральної поздовжньої осі сушарки. Пружинки 15 для запобігання їх швидкому зносу у вологому середовищі, захищені у гофрованих еластичних стаканах. Після завантаження рулонів, кількість яких відповідає кількості секцій у сушарці, рулоноутримувачі 13 підтримують паковки у сушильних секціях. Рулоноутримувачі 13 являють собою систему зібраних у коло пружних штирів, які відсувають до стінок камери 1, звільнюючи від утримання рулонів при здійсненні пересування останніх. Після завершення процесу завантаження та пересування рулонів вмикають вентилятор 9.

Якщо потреби у довготривалому та високоякісному зберіганні рулонів сільськогосподарських культур немає, додаткову сушильну камеру не використовують, а кризь відкидну кришку 11 рулони вивантажують з останньої сушильної камери для подальшого їх використання. У разі потреби - рулони матеріалів переміщують у додаткову сушильну камеру шляхом підняття телескопічної штори 18 з наступним її закриванням (опусканням).

Крім досушування сировини у цій камері рулони обробляють озоном, позбавляючись таким чином від бактерій у матеріалі. Крім того, озонатор 17 знищує пестициди і інші шкідливі для тварин речовини. Осьове обертання рулонів у додатковій сушильній камері здійснюють за допомогою розташованих по спіральній траєкторії роликів 14, які як надійно симетрично до вісі сушильної камери підтримують рулони, а й сприяють полегшенню їх вивантаження з сушарки.

4.3. Висновки

1. Запропонована модель технологічного процесу сушіння рулонів циклічним методом із використанням поперемінної подачі сушильного агента і атмосферного повітря та відлежування.

2. На основі проведених досліджень запропонована сушарка для сушіння рулонів льонотрести з їх горизонтальною віссю розміщення та можливістю застосування принципу протитечії, що створює умови максимально використати енергетичний потенціал сушильного агента і зменшити затрати праці під час її експлуатації.

3. Аналіз останніх досліджень підтверджує доцільність застосування сушарки рулонів льонотрести з горизонтальною віссю розміщення та процесом перекочування рулонів у сушильні секції, що зменшує затрати на завантаженні і вивантаження сушильних секцій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Алиев Б. М. Разработка энергосберегающего процесса сушки листостебельных материалов в установке противоточного типа: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01. – М., 1985. – 187 с.
2. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя / Анурьев В. И. – т.1. – М.: Машиностроение, 1982. – С. 268
3. А.С. №1474408 СССР, МКИ F26 B9/06, 5/04. Сушилка для волокнистых материалов. / Куц П. С., Смагина Т. В., Любошиц А. И., Зелепуга А. С., Лапцевич П. С., Курильчик Т. Г. – Заявлено 03.08.87; Оpubл. 23.04.89, Бюл. №15. – 3 с.
4. А.С. №1606006 СССР, МКИ A01 F25/08, F26 B9/06. Сушилка для рулонов сельскохозяйственных культур. / Огнев Е. М., Зеленко В. И., Тарлецкий А. Г. (СССР). – Заявлено 20.02.89; Оpubл. 15.11.90, Бюл. №42. – 5 с.
5. А.С. №1690607 СССР, МКИ A01 F25/08. Сушилка рулонов сельскохозяйственных культур. / Ковалев В. Б., Мелегов В. Б. (СССР). – Заявлено 02.03.89; Оpubл. 15.11.91, Бюл. №42. – 4 с.
6. А.С. №1486719 СССР, МКИ A01 F26B9/06. Установка для сушки паковок. / Апыхин А. П., Селиванов А. Г., Кагиров Г. М., Дмитриев Л. Е., Ермалинский Ф. П., Куликовский О. А. (СССР). - №4258046/24; Заявлено 08.06.87; Оpubл. 15.06.89, Бюл.изобр. №22. – 4 с.
7. Ахназарова С. Л. Оптимизация эксперимента в химии и химической технологи / Ахназарова С. Л., Кафаров В. В. – М.: Высшая школа, 1978. – 317 с.
8. Большакова С. Р. Влияние строения стебля льна-долгунца на распределение плотности льносырья в рулонах / Большакова С. Р., Мухин В. В., Егорова И. А. // Селекция, семеноводство, возделывание и первичная

обработка льна-долгунца: Сборник научных трудов ВНИИЛ. – Выпуск XXVIII-XXIX. Торжок, 1994. – С. 319-330

9. Брахман Т. Р. Многокритериальность и выбор альтернативы в технике / Брахман Т. Р. - М.: Радио и связь, 1984. – 288 с.

10. ГОСТ 20915-2011 Испытания сельскохозяйственной техники. Методы определения условий испытаний // <http://docs.cntd.ru/document/1200094197>

11. ГОСТ 7338-90 Пластины резиновые и резиноканевые. Технические условия // <http://www.internet-law.ru/gosts/gost/7385/>

12. ГОСТ 12041-82 Семена сельскохозяйственных культур. Метод определения влажности (с Изменением №1) // <http://vsegost.com/Catalog/39/39397.shtml>

13. Дідух В. Ф. Науково-технологічні основи механізованого сушіння неоднорідних рослинних матеріалів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня доктора техн. наук: спец. 05.05.11 «Машини і засоби механізації сільськогосподарського виробництва» / В. Ф. Дідух. – Тернопіль, 2003. – 39 с.

14. Дідух В. Ф. Збирання та первинна переробка льону-довгунця / Дідух В. Ф., Дударєв І. М., Кірчук Р. В. – Луцьк: Ред.-вид. відділ ЛНТУ, 2008. – 215 с.

15. Дидух В. Ф. Сушка вороха семян сахарной свеклы в противоточной карусельной сушилке: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Дідух Володимир Федорович – Луцк, 1990. – 210 с.

16. Драган М. С. Основні поняття і закони теоретичної механіки. Динаміка: Методичні вказівки.– Луцьк: ЛІІ, 1992. – С. 26

17. Испытание сельскохозяйственной техники. Машины для уборки льна. Программа и методы испытаний: ГОСТ 70.8.9-80 [Действующий от 01.07.1981]. – М.: Изд-во стандартов. – 1981. – 132 с.

18. Кіницький Я. Т. Теорія механізмів і машин: підручник / Кіницький Я. Т. – К.: Наукова думка, 2002. – 661 с.
19. Колчин Н.И. Механика машин / Колчин Н.И. – М.-Л.: Машгиз, 1963. – С. 403-411
20. Кришер О. Научные основы техники сушки / Кришер О. – М.: Иностранная литература, 1961. – С. 26
21. Лыков А. В. Теория сушки / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
22. Лурье М. Ю. Сушильное дело / Лурье М. Ю. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1948. – 711 с.
23. Любарский В., Йонушас З., Милянис С. Установка для сушки сырья // Лен и конопля. – 1987. - №5. – С. 37-38
24. Особов В.И. Механическая технология кормов / Особов В. И. – М.: Колос, 2009. – 344 с.
25. Павловський М. А. Теоретична механіка: підручник / Павловський М. А. – К.: Техніка, 2004. – 512 с.
26. Патент на винахід №54272 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Дідух В. Ф., Кірчук Р. В., Дударев І. М., Плющ І. В.; Заявлено 9.07.2002; Опубл. 17.02.2003. – 6 с.
27. Патент на винахід №23214 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Дідух В. Ф., Федік Л. Ю., Подоляк В. М., Панасюк С. Г., №96072961; Заявлено 23.07.96; Опубл.19.05.98
28. Патент на винахід №22518А Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Кужель Є. М., Божидарник В. В., Приймак О. В., Сомов Д. О., Кужель Е. В.; Заявлено 04.01.97; Опубл. 30.06.98, Бюл. №3. – 5 с.

29. Патент на винахід №76851 Україна, МКВ А01F25/08. Сушарка рулонів сільськогосподарських культур / Дударев І. М., Дідух В. Ф., Кірчук Р. В.; Заявлено 27.10.2004; Опубл. 15.09.2006; Бюл. № 9.

30. Патент на винахід №18049 України, МКВ А01 F25/08. Установа для сушки паковок сільськогосподарських культур / Федік Л. Ю., Дідух В. Ф., Балабан О. Ю., Хайліс Г. А., Подоляк В. М., №96072963; Заявлено 23.07.96; Опубл. 17.06.97

31. Патент на винахід №46843 С2 Україна, МКВ F26 B21/00, А01 F25/08. Установа для сушіння циліндричних і/або паралелепіпедоподібних тюків вологого фуражу / Муццареллі Габріел, ІТ; Заявлено 21.04.97; Опубл.17.06.2002, Бюл. №6. – 7 с.

32. Патент на корисну модель №109259 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Коцан І. Я., Кужель Є. М.; Заявлено 24.12.2015; Опубл. 25.08.2016, Бюл. № 16. – 4 с.

33. Патент на корисну модель №25409 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Кужель Є. М., Фесенко О. О., Божидарнік В. В., Кужель Є. М.; Заявлено 21.03.2007; Опубл. 10.08.2007, Бюл. № 12, 2007. – 6 с.

34. Патент на корисну модель №29451 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Кужель Є. М., Фесенко О. О., Божидарник В. В.; Заявлено 3.10..2007; Опубл. 10.01.2008, – 5 с.

35. Патент на корисну модель №43576 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Кужель Є. М., Фесенко О. О., Божидарнік В. В., Приймак О. В.; Заявлено 25.08.2009; Опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16, 2009. – 6 с.

36. Патент на корисну модель №72238 Україна, МКВ А01 F25/08. Сушарка для рулонів сільськогосподарських культур / Кужель Е. В., Коцан І. Я.; Заявлено 9.02.2012; Опубл. 10.08.2012 Бюл. №15 – 6 с.
37. Патент на корисну модель №19392 Україна, МКВ А01F25/08. Сушарка льоносировини в рулонах / Дударев І. М.; Заявлено 15.06.2006; Опубл. 15.12.2006; Бюл. № 12
38. Патент на корисну модель №11217 Україна, МКВ А01F25/08. Сушарка рослинних матеріалів, сформованих в рулони / Дударев І. М., Дідух В. Ф., Кірчук Р. В.; Заявлено 08.06.2005; Опубл. 15.12.2005; Бюл. № 12.
39. Патент на корисну модель №13744 Україна, МКВ А01F25/08. Сушильна камера для рулонів з рослинного матеріалу / Дударев І. М., Дідух В. Ф., Кірчук Р. В.; Заявлено 21.10.2005; Опубл. 17.04.2006; Бюл. № 4.
40. Пахолок О. А. Розробка і дослідження технологічного процесу та пристрою для підбирання і потовщення стрічки льонотрести: дис. ... канд. техн. наук: 05.20.01 / Пахолок Орест Андрійович. – Луцьк, 1997. – 207 с.
41. Подоляк В. М. Вдосконалення процесу сушіння вороху льону в нерухомому товстому шарі: Дис. ... канд. тех. наук: 05.20.01 / Подоляк Володимир Миколайович. – Луцьк, 1998. – 161 с.
42. Російсько-український технічний словник [уклад. Д. М. Коновалюк]. – Луцьк: Візор, 1993. – 1047 с.
43. Румшинский Л. З. Математическая обработка результатов экспериментов / Румшинский Л. З. – М.: Наука, 1971. – 192 с.
44. Суметов В. А. Сушка и увлажнение лубоволокнистых материалов / Суметов В.А. – М.: Легкая индустрия, 1980. – 336 с.
45. Тарлецкий А. Г. Обоснование выбора устройства для сушки льняной тресты, спрессованной в рулоны: Труды ВНИИЛ. – Выпуск 26. – Тверь, 1989. – С. 34-38

46. Технології вирощування, збирання та переробки льону-довгунця: навч. посіб. / В. Ф. Дідух, С. Й. Ковалишин, І. М. Дударєєв, І. В. Тараймович. – Львів: Львівський НАУ, 2013. – 324 с.

47. Треста лляна. Технічні умови: ДСТУ 4149:2003. - [Чинний від 2004-01-01]. – К.: Держспоживстандарт України. – 2004. – 14 с. – (Національні стандарти України)

48. Хайлис Г. А. Исследования сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных / Г. А.Хайлис, М. М. Ковалев. – М.: Колос, 1994. – 169 с.

49. Хайлис Г. А. К расчету процесса сушки материала в карусельной сушилке / Хайлис Г. А., Дидух В. Ф. // Наукові нотатки ЛШ. – Луцьк: Луцьк. індустр. ін-т. – 1993. – С. 32-38

50. Хайліс Г. А. Механіка рослинних матеріалів: Навч. посібник для студ. вищ. навч. закл. / Г.А. Хайліс, Ю.В. Федорусь; Луцк. держ. техн. ун-т. – Луцьк: РВВ Луцк. держ. техн. ун-ту, 2004. – 301 с.

51. Хайлис Г. А. О силах инерции точек катящихся колес / Г. А. Хайлис, М. С. Драган, Н. А. Толстушко, В. А. Шейченко // Сільськогосподарські машини. Зб наук.ст. Вип. 15. – Луцьк: Ред.-вид.відділ ЛДТУ. – 2007. – С. 297-304

52. Хайліс Г. А. Основи проектування і дослідження сільськогосподарських машин / Хайліс Г. А., Коновалюк Д. М. – К.: НМК ВО, 1992. – 314 с.

ДОДАТКИ

Додаток А
Програма «Вологість»

```
10 LPRINT"  вологість      "  
20 FOR X1=-1 TO 1  
30 FOR X2=-1 TO 1 STEP .5  
40 FOR X3=-1 TO 1  
50W1=28.0602+7.0885·X1-5.1079·X2+4.9928·X3-  
    0.143·X1·X1+2.0393·X2·X2-  
    .1693·X3·X3+2.0518·X1·X2- .3201·X1·X3-.2339·X2·X3  
60W2=17.793+6.2326X1-4.5607·X2+4.6931·X3-  
    .0093·X1·X1+2.6471·X2·X2-.9384·X3·X3+.6858·X1·X2-  
    .3181·X1·X3-. 1792·X2·X3  
70W3=7.806+3.5475·X1-  
    2.6495·X2+2.1909·X3+1.0136·X1·X1+2.8466·X2·X2-  
    .2604·X3·X3+1.2857·X1·X2+.          0752·X1·X3+.  
    0662·X2·X3  
80 LPRINT TAB (0): "x1=": X1: TAB (7): "x2=": X2:  
    TAB (14): "x3=": X3: TAB (20): "w1=": W1: TAB  
    (33):  
    "w2=": W2: TAB (47): "w3=": W3  
90 NEXT X3  
100 NEXT X2  
110 NEXT X1  
120 END
```

Додаток Б
Програма для розрахунку процесу кочення рулонів по похилій площині

```
1) 10 REM ЧАС КОЧЕННЯ РУЛОНІВ
    20 G=9.81
    30 INPUT LP, LR, LH, R, K, ALF
    40 FOR L=LP TO LR STEP LH
    50     T=SQR      ((2·L·(IC/M+R^2)/GR·(R·SIN(ALF) -
    K·COS(ALF)))
    55 IF INKEYS="" THEN 55
    60 PRINT "L="; L, "T="; T
    70 NEXT L
    80 END

2) 10 REM КУТОВА ШВИДКІСТЬ РУЛОНІВ
    20 G=9.81
    30 INPUT TP, TK, TH, R, K, ALF
    40 FOR T=TP TO TK STEP TH
    50 FI=G·(R·SIN(ALF) - K·COS(ALF))·T/(IC/M+R^2)
    60 PRINT "T="; T, "FI="; FI
    65 IF INKEY$="" THEN 65
    70 NEXT T
    80 END

3) 10 REM ШВИДКІСТЬ ЦЕНТРІВ РУЛОНІВ
    20 G=9.81
    30 INPUT TP, TR, TH, R, K, ALF
    40 FOR T=TP TO TR STEP TH
```

```

50 X=G·R·(R·SIN(ALF)-K·COS(ALF)·T)/(IC/M+R^2)
60 PRINT "T="; T, "X="; X
65 IF INKEY$="" THEN 65
70 NEXT T

```

```
80 END
```

4) 10 REM ШЛЯХ ПРОХОДЖЕННЯ ЦЕНТРАМИ РУЛОНІВ

```
20 G=9.81
```

```
30 INPUT TP, TR, TH, R, K, ALF
```

```
40 FOR T=TP TO TR STEP TH
```

```
50
X=(G·R·(R·SIN(ALF)-
K·COS(ALF)))/(IC/M+R^2)·(T^2/2)
```

```
60 PRINT "T="; T, "X="; X
```

```
70 NEXT T
```

```
80 END
```

5) 10 REM КУТ ОБЕРТАННЯ РУЛОНІВ

```
20 G=9/81
```

```
30 INPUT TP, TK, TH, R, K, ALF
```

```
40 FOR T=TP TO TK STEP TH
```

```
50
FI=(G·(R·SIN(ALF)-
K·COS(ALF)))/(IC/M+R^2)·(T^2/2)
```

```
60 PRINT "T="; T, "FI="; FI
```

```
65 IF INKEY$="" THEN 65
```

```
70 NEXT T
```

```
80 END
```

```
6) 10 REM КІНЕТИЧНА ЕНЕРГІЯ ПУЛОНУ
    20 G=9.81
    30 INPUT LP, IK, IH, M, K, R, ALF
    40 FOR L=LP TO IK STEP IH
    50 T=M·G·L·(SIN(ALF) - (K/R)·COS(ALF))
    60 PRINT "L="; L, "T="; T
    65 IF INKEY$="" THEN 65
    70 NEXT L
    80 END
```

Наукове видання

В.Ф. Дідух
Л.Ю. Федік

**ТЕХНОЛОГІЯ СУШІННЯ
РУЛОНІВ ЛЬОНОТРЕСТИ**

Монографія

Підп. до друку09.2017 р.
Формат 60×84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 18,6. Обл.-вид. арк. 3,0.
Тираж 300 прим. Зам. 35.

Інформаційно-видавничий відділ
Луцького національного технічного університету
43018, м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ІВВ Луцького НТУ