

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії та енергетики

Кафедра механіки та
інженерії агроєкосистем

Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

Пелешок Віктор Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові здобувача вищої освіти)

УДК 662.636.3

(індекс)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

**Обґрунтування параметрів сушарки зернових культур, що працює на
синтез-газі з біомаси**

Спеціальність 208 «Агроінженерія»

(шифр і назва спеціальності)

Подається на здобуття освітнього ступеня магістр

Кваліфікаційна робота містить результати власних досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело _____ В. В. Пелешок

(підпис, ініціали та прізвище здобувача вищої освіти)

Керівник роботи

Цивенкова Н.М.

(прізвище, ім'я, по батькові)

доцент канд. тех. наук

(науковий ступінь, вчене звання)

Житомир – 2020

АНОТАЦІЯ

Пелешок В. В. Обґрунтування параметрів сушарки зернових культур, що працює на синтез-газі з біомаси. – Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 208 – агроінженерія. – Поліський національний університет, Житомир, 2020.

Здійснено аналіз конструкцій обладнання та технологічних процесів сушіння зерна в сушарках з псевдозрідженим шаром. Встановлено можливість роботи сушарок на синтез-газі з біомаси. Представлено математичну модель, яка пов'язує параметри обладнання, зернової маси та агенту сушіння. Методом проведення багатofакторного експерименту визначено умови, при яких забезпечуються високі показники ефективності даного процесу. Математична модель має високу відповідність результатам експериментальних досліджень. Визначено витрати біомаси на забезпечення процесу сушіння зерна та формування агенту сушіння. Доведено, що використання синтез-газу для енергозабезпечення процесу сушіння зерна забезпечує високі показники економічної, енергетичної та екологічної ефективності при використанні біомаси з вологістю 10–30 %. Використання запропонованої конструкції сушарки та способу її енергоживлення знижує питомі витрати енергії на післязбиральну обробку зерна до 30 %.

Ключові слова: сушарка, псевдозріджений шар, синтез-газ, біомаса, агент сушіння.

SUMMARY

Peleshok V. V. Substantiation of grain dryer parameters that is working on syngas from biomass. – Qualification work on the rights of the manuscript.

Qualifying work for a master's degree in specialty 208 – agroengineering – Polissya National University, Zhytomyr, 2020.

The analysis of equipment designs and technological processes of grain drying in fluidized bed dryers is carried out. The possibility of operation of dryers on syngas from biomass is established. A mathematical model is presented that relates the parameters of the equipment, grain mass and drying agent. The method of a multifactorial experiment determines the conditions under which high efficiency of this process is provided. The mathematical model has a high correspondence to the results of experimental research. The costs of biomass for the grain drying process and the formation of the drying agent are determined. It is proved that the use of synthesis gas for energy supply of the grain drying process provides high indications of economic, energy and environmental efficiency when using biomass with a humidity of 10-30%. The use of the proposed design of the dryer and the method of its power supply reduces the specific energy consumption for post-harvest processing of grain by up to 30%.

Key words: dryer, fluidized bed, syngas, biomass, drying media.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....	4
ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ЗЕРНОВИХ СУШАРОК ТА ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА.....	9
1.1. Аналіз конструкцій зерносушарок з псевдо-зрідженим шаром.....	9
1.2. Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу в сушарці з псевдо-зрідженим шаром.....	12
1.3. Дослідження процесу енергоживлення сушарок зернових синтез-газом, виробленим з біомаси.....	14
1.4. Висновки до розділу 1.....	15
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА В СУШАРЦІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ З БІОМАСИ.....	16
2.1. Обґрунтування параметрів процесу сушіння зернового матеріалу в псевдо-зрідженому шарі.....	15
2.2. Обґрунтування процесу енергоживлення сушарки зернової синтез-газом з біомаси.....	19
2.3. Визначення продуктивності сушарки за зерном.....	24
2.4. Висновки до розділу 2.....	25
РОЗДІЛ 3 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА В СУШАРЦІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ З БІОМАСИ.....	26
3.1. Матеріали та методи дослідження процесу сушіння зерна в сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси	26
3.2. Результати дослідження процесу сушіння зерна в сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси...	28
3.3. Висновки до розділу 3.....	33
ВИСНОВКИ.....	34
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	35
ДОДАТКИ.....	

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- q_m – інтенсивність випаровування, кг/м²·год;
- α_m – коефіцієнт вологообміну, кг/(м²·год·Па);
- p_z – парціальний тиск пари на поверхні зерна, Па;
- p_c – парціальний тиск пари оточуючого середовища, Па;
- P – тиск в зоні сушіння, Па;
- a_m – коефіцієнт дифузії вологи, м²/с;
- ρ_0 – щільність абсолютно сухої речовини, кг/м³;
- δ – термоградієнтний коефіцієнт, кг/кг·град;
- ∇u – градієнт концентрації в напрямку дифузії;
- ∇T – градієнт температури в напрямку потоку тепла;
- N^c – швидкість сушіння, кг/кг·с;
- R_z – еквівалентний радіус зернівки, м;
- \bar{u}_0 – вологість зерна, кг/кг сух. реч.
- α – коефіцієнт тепловіддачі між повітрям і рідиною, Вт/м²·К;
- $T_{a.c.}$ – температура агента сушіння, К;
- $T_{pid.}$ – температура на поверхні рідини, що випаровується, К;
- r – питома теплота пароутворення, кДж/кг;
- Q – кількість теплоти, передана за одиницю часу, кДж/год;
- F – ефективна поверхня теплообміну, м²;
- $\Delta t = T_{a.c.} - T_{pid.}$ – температурний напір, К;
- G_{cl} – маса частинок в шарі, кг;
- d_e – еквівалентний діаметр зерна, м;
- v – швидкість руху матеріалу вздовж апарату, м/с;
- c_z, ρ_z – теплоємність і щільність шару зерна в апараті (Дж/кг·К, кг/м³);
- λ_z – коефіцієнт теплопровідності шару зерна в горизонтальному напрямку;
- $c_{нов}, \rho_{нов}$ – теплоємність і щільність газу (псевдо-зрідженого середовища), (Дж/кг·К, кг/м³);
- t – температура зернового шару, К.

t_1 – температура агента сушіння, К;

w_c – вологість зерна, віднесена до маси сухої речовини, %;

$\gamma_z, \gamma_{нов}$ – питома вага зерна і повітря відповідно, кг/м³;

ε – порозність шару матеріалу;

K – коефіцієнт процесу сушіння;

W_p – рівноважна вологість, %;

τ – час, год.

Q_n та Q_v – відповідно енергія, що надходить в топку сушарки з синтез-газом, повітрям і утворюється при згорянні синтез-газу, та енергія, що відбирається сушильною камерою, кДж.

φ – активність води, рівна $\varphi = p_n / p_u$;

R – газова стала, кДж/кг·°С;

T – температура сушіння, °С;

p_u – парціальний тиск пари в граничному шарі над матеріалом, Па;

$m_{вол}$ – кількість вологи, що випарувалася з зерна в процесі сушіння, кг;

p_n – тиск насиченої пари вільної води, Па;

ΔW – зміна вологості зерна протягом циклу сушіння ($\Delta W = W_1 - W_2$), %;

$m_{зерна}$ – маса зернового матеріалу, що підлягає сушінню, кг;

q – кількість енергії, що необхідна для випаровування вологи з зерна при зміні її значення на ΔW , кДж/кг;

ψ – коефіцієнт, що відображає нерівномірність споживання теплоти зерносушаркою протягом циклу сушіння зерна;

η_T – коефіцієнт корисної дії топки сушарки;

r_n – питома енергія пароутворення кДж/кг;

c_n – масова теплоємність пару при сталому тиску, кДж/(кг·°С);

$V_{нов1}, V_{нов2}$ – об'єм повітря, необхідний для спалювання синтез-газу та формування агента сушіння відповідно, м³;

k_1, k_2 – коефіцієнт, що враховує кількість повітря, необхідну для спалювання газу та формування агента сушіння відповідно ($k_1=1,57-1,74$), ($k_2=10,28-10,96$);

- K_1 – коефіцієнт, що залежить від вмісту CO , CO_2 , CH_4 в газі, % / m^3 ;
- K_2 – коефіцієнт, що виражає кількість вуглецю, з загальної його кількості в паливі з врахуванням усіх втрат, що переходить в газ, % / кг;
- N_2^c – вміст азоту в генераторному газі, %;
- $G_{кз/м\%}$ – питомий показник витрат соломи-січки на зниження вологості тони зерна на 1 %, кг/т·%;
- $П_{м\%/кг}$ – показник питомої продуктивності зерносушарки на кілограм соломи-січки, що задіяна в процесі газоутворення, т·%/кг;
- $G_n(dv_{нов}/d\tau)$ та $G_n(dv_3/d\tau)$ – зміна витрат повітря, що надходить в газогенератор, та виробленого синтез-газу за проміжок часу, $m^3/год$;
- $П_{V_{гг}}$ – продуктивність газогенератора за синтез-газом, $m^3/год$;
- $П_{V_{нов}}$ – витрати повітря на процес виробництва газу, $m^3/год$;
- v_c – кількість сухого газу, отриманого з кілограма біомаси, $m^3/кг$;
- G_n – годинні витрати біомаси, кг/год;
- $v\gamma$ – масова швидкість агента сушіння, $кг/м^2\cdot c$;
- F – живий переріз шару зерна, m^2 ;
- B – ширина шару матеріалу, м;
- H_m – висота шару матеріалу, м;
- v – швидкість руху зерна, м/с;
- α_k – кут нахилу камери сушіння, град;
- ε_l – коефіцієнт, що враховує співвідношення роботи зовнішніх сил і сил внутрішнього тертя і форми поперечного перерізу шару, $\varepsilon_l=1,5\dots 1,65$;
- L – довжина сушильної камери, м;
- f – коефіцієнт тертя переміщуваного шару об стінки камери сушіння;
- β – кут нахилу газорозподільного решета, град;
- τ', τ_l – тривалість продування секції та переміщення матеріалу по одній секції, с;
- d – вологовміст агента сушіння, г/кг сухого повітря;
- Θ – температура зерна, К.

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. В Україні наявні режими сушіння зернових в установках безперервної і періодичної дії не забезпечують вимог щодо якості висушеного продукту та відповідних норм щодо витрат енергії. Зернові сушарки характеризуються низьким термічним коефіцієнтом корисної дії та високою питомою матеріалоємністю [5, 17].

Зернові сушарки з псевдо-зрідженим шаром є альтернативою до використання обладнання з конвективним методом підведення теплоти [15, 26]. На аграрних підприємствах з надлишком біомаси зернові сушарки доцільно оснащувати установками з виробництва синтез-газу з біомаси загалом, та з соломи зернових зокрема. Такий технологічний прийом забезпечує самодостатність процесу післязбиральної обробки зернових та високі показники енергетичної та екологічної ефективності процесу сушіння [26, 27].

Однак, використання зерносушарок з псевдо-зрідженим шаром, оснащених установками з виробництва синтез-газу з біомаси, має ряд недоліків: завдяки постійному перемішуванню зернини знаходяться в псевдо-зрідженому шарі різний час, отже зернова маса на виході з сушарки може бути нерівномірно обробленою; має місце процес травмування зерна; існує складність узгодження теплотехнічних режимів роботи сушарок з установками з виробництва синтез-газів [3, 4]. Отже, потрібно дослідити процес сушіння зернового матеріалу у сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси [15].

Мета роботи – розробити конструкцію і встановити раціональні режими роботи та параметри сушарки з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси. Це підвищить ефективність процесу сушіння зернових культур.

Завдання роботи:

– проаналізувати існуючі способи і засоби сушіння зернової маси та розробити і обґрунтувати конструктивно-технологічну схему сушарки зернової;

- аналітично обґрунтувати раціональні параметри процесу сушіння зерна у псевдо-зрідженому шарі та конструкцію сушарки, що працює на синтез-газі;
- експериментально підтвердити відповідність аналітично обґрунтованих конструктивно-технологічних параметрів сушарки зернової з псевдо-зрідженим шаром, що працює синтез-газі з біомаси.

Предмет дослідження – закономірності процесу сушіння зернових в сушарці з псевдо-зрідженим шаром з енергоживленням на синтез-газі з біомаси.

Об'єкт дослідження – технологічний процес сушіння зернової маси в псевдо-зрідженому шарі на базі сушарки з періодичною подачею теплоносія, що працює на синтез-газі з біомаси.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження базувалися на методах теорії сушіння, теорії тепло- та масообміну, математичного моделювання технологічних процесів і проводилися з використанням основних положень вищої математики. Експериментальні дослідження виконані на розробленій лабораторній установці у відповідності до існуючих методик і галузевих стандартів. Результати досліджень оброблені з застосуванням пакету прикладних програм Microsoft Excel 2003 та Statistica 6.0.

Перелік публікацій автора за темою дослідження. Результати кваліфікаційної роботи надруковано в збірниках праць «Студентські читання – 2020: Матеріали науково-практичних конференцій «Студентські читання – 2020». Житомир: Поліський національний університет, 2020, які проходили 5-6 березня та 26 жовтня 2020 року.

Практичне значення отриманих результатів полягає в розробці конструкції та обґрунтуванні параметрів зернової сушарки з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси, яка дозволяє підвищити якість та ефективність процесу сушіння зерна.

Структура та обсяг роботи. Кваліфікаційна робота містить вступ, три розділи, кожен з яких включає три підрозділи, висновки до кожного розділу, загальні висновки, список використаних літературних джерел з 45 найменувань, додатки. Загальний обсяг роботи становить 33 арк.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ ЗЕРНОВИХ СУШАРОК ТА ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА

1.1. Аналіз конструкцій зернових сушарок з псевдо-зрідженим шаром

В [7] представлено обладнання для сушіння зернової маси в псевдо-зрідженому шарі. Обладнання оснащено камерою з секційними газорозподільними решітками і окремим підведенням теплоносія до кожної секції. В конструкції передбачено регулюючі заслінки. Перша секція решітки оснащена вібраційним приводом, а повертання заслінок здійснюється автоматично за допомогою регульовального апарату (дод. А, рис. 1). В конструкції [7] переміщення зернової маси в зоні сушіння і подача зерна з бункера не взаємопов'язані. Кут нахилу решітки розподілення агенту сушіння змінюється на довжині камери сушіння, що є причиною нерівномірного розосередження шару зерна в камері та нерівномірного його сушіння.

В [8] представлено сушарку фірми «Петрі і Мак Хаут» з псевдо-зрідженим шаром, що складається з двох ярусів. Перший ярус призначений для сушіння зернового матеріалу, другий – слугує для його охолодження. Установка оснащена похилими газорозподільними решетами з стінками-опорами, що забезпечує регулювання висоти шару зерна і швидкості його переміщення (дод. 1, рис. 2). Недоліки цієї установки полягають в наступному: вона громіздка; теплоносій надходить суцільним потоком; переміщення зерна в камері та подача зерна в зону сушіння із бункера не пов'язані між собою, що сприяє нерівномірному сушінню шару зерна.

В [11] представлено сушарку для обробки зерна в псевдо-зрідженому шарі (дод. 1, рис. 3 а). Вертикально встановленими перегородками корпус сушарки розділений на секції з автономними газорозподільними решетами. Простір під решетами секцій підключено до газовідвідної труби, яку оснащено клапанним пульсатором (дод. 1, рис. 3 б). Кожне решето шарнірно закріплене і має упор у вигляді дисків, які ексцентрично закріплені на валу обертання.

Основними недоліками зазначеної конструкції є: надходження теплоносія одночасно реалізується по всій площі газорозподільного решета; швидкість переміщення зерна по решетах і швидкість його надходження в зону сушіння не синхронізовані; слід забезпечувати високу герметичність в зоні сушіння зерна.

Зазначені недоліки не дозволяють забезпечити рівномірний рух зерна вздовж газорозподільного решета. Поворотні патрубки, розташовані на вільних кінцях трубопроводів, на валах заслінок повинні створювати обертальний момент. Однак, в той час, коли заслінки повністю перекривають трубопровід, зупиняється надходження агенту сушіння, обертальний момент відсутній, отже, з'являються «мертві зони». Зазначений факт призводить до ненадійної роботи пульсатора, що призводить до збоїв в роботі усієї установки [11].

В роботі [16] представлено сушарку з псевдо-зрідженим шаром для сипких матеріалів. Установка містить камеру сушіння (дод. 1, рис. 4 а) з пульсатором (дод. 1, рис. 4б) та газорозподільними решітками секційного типу, які перегородками розділено на канали для підведення агенту сушіння. В кожному каналі є дволопастні заслінки, закріплені на спільній поворотній осі. Заслінки встановлено одна відносно одної з кутовим зміщенням, що забезпечує створення пульсуючого потоку. Заслінки під дією набігаючого потоку агенту сушіння обертаються, завдяки чому створюється обертальний момент. Недоліками вказаної конструкції є: потреба забезпечувати високу ступінь герметичності зони сушіння; через високу швидкість обертання пульсатора, подача теплоносія реалізується одночасно практично на всій площі газорозподільної решітки. Вказані недоліки унеможливають забезпечення рівномірного переміщення матеріалу вздовж газорозподільної решітки. Через відсутність можливості регулювати кут нахилу газорозподільної решітки, складно регулювати продуктивність сушарки в широких межах.

В [18] представлено конструкцію лоткової печі для сушіння мінеральної, рослинної та зернової сировини в псевдо-зрідженому стані (дод. А, рис. 5). Піч складається з лотків, оснащених системою труб для підведення агенту сушіння від спільного колектора, закріплених на каркасі. Через патрубок верхнього

лотка (систему «завантаження») сировина надходить в зону сушіння і, рухаючись вздовж лотків в напрямку протилежному напрямку руху агенту сушіння, усувається з зони сушіння через патрубок «вивантаження» нижнього лотка. Кут встановлення лотків складає 3° . З метою регулювання подачі гарячого агенту сушіння фланці лоткових труб оснащені шиберами. Недоліками конструкції [18] є: непостійна швидкість пересування оброблюваної сировини по лотках; складно регулювати продуктивність сушарки за висушеним зерном. Вказане унеможливує регулювання експозицією сушіння, що порушує стабільні умови роботи печі лоткової [18].

В [28] представлено конструкцію сушарки ротаційної (дод. А, рис. 6). За конструкцією – це циліндрична шахта з чотирма зонами нагрівання. Зони нагрівання по висоті чергуються з зонами охолодження. Днище робочої зони зроблене у вигляді сталевих сит. Вертикальний вал ротора, який проходить через цент сушарки, в робочій зоні кожної секції оснащений 12 лопатями. Лопаті забезпечують просування зерна по днищу кожної секції. Камери сушарки (5 шт) мають діаметр 2,5 м, частота обертання ротора складає 1...1,3 об/хв., висота лопатей ротора близько 0,8 м. Недоліком цієї сушарки є великі габаритні розміри, висока енергетична та металоємність.

Зернова сушарка [34] складається з: бункера, прикріпленого до корпусу; камери сушіння; розподільної решітки для розподілу агенту сушіння, оснащеної пристроєм для зміни кута її нахилу у поздовжньому напрямку. Нижня секція камери містить пульсатор, вентилятор та систему трубопроводів для подачі повітря (дод. А, рис. 7 а). Пульсатор – це пустотілий барабан з отворами на бічній поверхні та на одному з торців (дод. А, рис. 7 б). Отвори з'єднані один з одним криволінійною перегородкою. Отвір на торці з'єднано з напірним фланцем вентилятора. На боковій поверхні отвір може послідовно з'єднуватися з вхідними отворами повітряних каналів, які підведені до різних ділянок решітки розподілу агента сушіння. Недолік конструкції – велика металоємність при порівняно невисокій продуктивності і конструктивній складності пульсатора, значні втрати напору в системі повітряних каналів.

1.2. Дослідження процесу сушіння зернового матеріалу в сушарці з псевдо-зрідженим шаром

Конвективне сушіння зерна – це комплекс взаємопов'язаних явищ, що протікають одночасно. До цих явищ належить: перенесення теплоти від агента сушіння до поверхні зерна; перенесення теплоти всередину зернини; випаровування вологи; перенесення вологи з поверхні зерна в навколишнє середовище; перенесення вологи всередині зерна [23–25, 32, 41, 42].

В процесі сушіння волога переміщується не лише під дією градієнта вологості, але і під дією градієнта температури (термовологопровідність). Зазначене явище представлено в [1, 2, 6, 24]. Явище термовологопровідності викликає переміщення вологи у напрямку потоку теплоти. Механізм перенесення вологи у вологій колоїдній капілярно-пористій сировині складний і визначається формою її зв'язку з твердим скелетом тіла, структурою тіла і термодинамічними умовами взаємодії його з навколишнім середовищем [24].

Залежно від цих факторів перенесення буває молекулярним (дифузія рідини і пари, ефузія пароповітряної суміші) і молярним (фільтраційне перенесення рідини). У зерні переважає дифузійно-молекулярне перенесення пари: при більшій вологості зерна волога частково переміщується у вигляді рідини (до зони випаровування) і частково у вигляді пари (від зони випаровування назовні), причому зона випаровування знаходиться поблизу поверхні зерна [29–31]. Швидкість дифузійного перенесення пари не залежить від розмірів капіляра. Збільшується з ростом температури зерна і з пониженням тиску зовнішнього повітря. Внутрішнє тепло- та масоперенесення в капілярно-пористій вологій сировині описують системою диференціальних рівнянь другого порядку, в основу яких покладені градієнтні закони перенесення теплоти, вологи і надлишкового тиску, що виникає внаслідок випаровування вологи всередині капілярно-пористої структури сировини [35, 37, 38]. Зовнішнє тепломасоперенесення від поверхні вологого матеріалу в потік сушильного агента визначається гідродинамічними явищами поблизу поверхні вологого

тіла. Складнощі спільного аналізу рівнянь внутрішнього і зовнішнього тепло- та масообміну призводять до необхідності використання експериментальних даних за швидкістю сушіння і нагрівання.

Інтенсивність випаровування q_m визначається рівнянням за [36], кг/м²·год:

$$q_m = \alpha_m (p_s - p_c)(1,01 \cdot 10^5 / P), \quad (1.1)$$

При підведенні теплоти до зерна його поверхня починає нагріватися, а волога з поверхні – випаровуватися. Настає внутрішнє перенесення вологи, при якому відбувається переміщення вологи всередині зерна до його поверхні. В період нагрівання поля вологості і температури зерна стають неоднорідними (дод. Б, рис. 1): на поверхні зерна вологість буде нижчою, а температура вищою, ніж в центральних шарах зернівки, тобто з'являється градієнт концентрації вологи du/dn і температурний градієнт $\Theta u/dn$.

Якщо в зернині присутні градієнти вологовмісту і температури, то виникають два потоки вологи: один – внаслідок вологопровідності, інший – через явища термовологопровідності. Залежно від напрямку градієнтів вологовмісту і температури потоки вологи, що виникли, мають взаємно протилежний вплив, тобто або послаблюють, або посилюють один одного.

Волога в зерні переміщується і в рідкому і пароподібному вигляді, а перенесення вологи описується формулою [36, 40], кг/м²·с:

$$q_m = q_{m_u} + q_{m_\Theta} = -a_m \cdot \rho_0 \cdot \nabla u - a_m^T \cdot \rho_0 \cdot \nabla T = -a_m \cdot \rho_0 \cdot (\nabla u + \delta \nabla T). \quad (1.2)$$

Основний закон ізотермічного перенесення вологи за [24], кг/м²·с:

$$q_m = \rho_0 (N^c \cdot R_s) / 3(1 + \bar{u}_0) \quad (1.3)$$

Оскільки процес сушіння зерна характеризується зміною вологості, швидкістю сушіння і температурою зерна, то при спільному розгляді залежностей (1.2) і (1.3) з врахуванням експериментальних досліджень при безперервному сушінні в киплячому шарі зерна [24], були побудовані криві зміни вологості, і нагрівання зерна (дод. Б, рис. 2) при наступних початкових умовах: початкова температура зерна – 8°C, температура агента сушіння – 60°C, початкова вологість зерна 25 %. За залежністю (дод. Б, рис. 2) при безперервному сушінні в псевдо-зрідженому шарі протягом 5 хв вологість

зерна знижується з 25 % до 21,3 %, а зерно при цьому нагрівається вище гранично допустимої температури, що є недопустимим.

За [23] швидкість сушіння майже на всьому періоді стала і в залежності від початкової вологості зерна і температури агента сушіння становить 0,005...0,045 %/с. Для періоду постійної швидкості сушіння її величина складає:

За дослідженнями [23–25] в процесі сушіння зерна вже в I періоді процесу відбувається поглиблення поверхні випаровування. Швидкість цього поглиблення зростає із збільшенням інтенсивності вологовіддачі. У початковий момент часу, внаслідок енергійного нагрівання, на поверхні зерна виникає значний температурний градієнт. Різке зменшення вологовмісту на поверхні шару відбувається через інтенсивне випаровування вологи з поверхні зерна.

Поглиблення зони випаровування призводить до зростання гідродинамічного опору поверхневої плівки і до структурних змін шару [24].

Режим сушіння чинить істотний вплив на поле вологовмісту. Жорсткий режим призводить до пересушування поверхні зерна, більш інтенсивному поглибленню поверхні випаровування, створення великих градієнтів вологості.

При розробці нових методів сушіння зерна слід намагатися, щоб зона випаровування вологи з зерна розташовувалася якомога ближче до його зовнішньої поверхні. Чим глибше зона випаровування проникає в середину зерна, тим гірше, так як в більшій мірі перегрівається поверхневий шар зерна.

1.3. Дослідження процесу енергоживлення сушарок зернових синтез-газом, виробленим з біомаси

З метою забезпечення енергоживлення сучасних зерносушарок синтез-газом з біомаси особливу увагу слід приділити питанням: підвищення якості і забезпечення стабільності складу виробленого синтез-газу; досягнення високої встановленої теплотворності синтез-газу; можливості керування параметрами технологічного процесу отримання синтез-газу; оптимізації конструкції основних вузлів для можливості виробництва газогенераторів багатопаливного

типу; досягнення міцності та надійності конструкції вузлів газогенератора і підвищення їх терміну експлуатації [10].

Можливість роботи сушарки на синтез-газі з біомаси визначається за продуктивністю газогенераторної установки $P_{V_{гг}}$ за газом та витратами біомаси на виробництво газу [12–15]. Продуктивність за синтез-газом $P_{V_{гг}}$, м³/год [15]:

$$P_{V_{гг}} = 0,79 \cdot P_{V_{ног}} / N_2^2. \quad (1.4)$$

Виходячи з продуктивності газогенераторної установки $P_{V_{гг}}$ за газом годинні витрати біомаси G_n становлять, кг/год [12–15]:

$$G_n = P_{V_{гг}} / v_c. \quad (1.5)$$

Проаналізувавши витратні складові енергії енергетичного балансу процесу сушіння відмітимо, що раціональним методом зниження цих витрат енергії є використання енергоносіїв з ВДЕ [29]. Найбільшу частку в структурі потенціалу біомаси для енергетичних потреб складає солома зернових – 43% (10,3 млн. т.у.п. в рік). Основними її перевагами є: доступність, здатність до відтворення, висока реакційна і теплотворна здатність (18,8 МДж/кг). Використання для енергозабезпечення процесу сушіння зернових синтез-газу з соломи має ряд переваг порівняно з технологіями її прямого спалювання: низьку металоємність конструкції; тепловий потік має однакову температуру та рівномірно розподілений; характеризується високим екологічними показниками.

1.4. Висновки до розділу 1

1. Найбільш перспективним напрямком підвищення ефективності технологічного процесу сушіння зерна є застосування сушарок з псевдо-зрідженим шаром.

2. Для енергозабезпечення процесу сушіння зерна доцільно використовувати синтез-газ, вироблений з біомаси, та адаптувати параметри роботи газогенераторної установки до параметрів роботи зерносушарки.

РОЗДІЛ 2

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА В СУШАРЦІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ З БІОМАСИ

2.1. Обґрунтування параметрів процесу сушіння зернового матеріалу в псевдо-зрідженому шарі

Перенесення теплоти і вологи в псевдо-зрідженому шарі пов'язано з переміщенням частинок. Нагрівшись частки, переміщуються в шарі, переносять теплоту в сусідні ділянки. Газ теж переміщується в шарі і переносить теплоту, але його об'ємна теплоємність набагато менша, ніж у частинок, отже і внесок в перенесення теплоти незначний [23, 24]. Отримані різними авторами значення коефіцієнтів переносу нерідко відрізняються більш ніж на порядок. Причина в нестійкості і складності гідродинаміки псевдо-зрідженого шару.

На механізм перенесення теплоти і маси у вологих дисперсних середовищах впливають форма зв'язку вологи з матеріалом, структура матеріалу, умови нагрівання і сушіння. Залежно від інтенсивності процесу і від температури механізм перенесення суттєво змінюється. При температурі матеріалу до 50°C явище переносу обумовлюється молекулярним процесом.

При невеликій вологості матеріалу переважає дифузійно-молекулярне перенесення пари, при більшій вологості матеріалу волога частково переміщується у вигляді рідини (до зони випаровування) і частково у вигляді пари (від зони випаровування назовні), причому зона випаровування розташована поблизу поверхні матеріалу. Такий характер перенесення в основному має місце в мікрокапілярах [6, 24]. Важливо врахувати не тільки абсолютну величину коефіцієнта внутрішнього перенесення вологи, але також, в якому вигляді волога переміщається всередині зерна – рідина чи пара.

Інтенсивність випаровування вологи з поверхні зерна за [24], кг/м²·К:

$$\partial W / \partial t = \alpha \cdot (T_{a.c.} - T_{pю}) / 3,6r, \quad (2.1)$$

Питома теплота пароутворення води залежить від температури самого матеріалу і підпорядковується закономірності:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{\alpha \cdot (T_{a.c.} - T_{pid})}{9000 - (8,28 + 0,00504 \cdot T_{pid}) \cdot T_{pid}}. \quad (2.2)$$

Коефіцієнт тепловіддачі між газом і поверхнею зерна за [23, 24], Вт/м²·К:

$$\alpha = Q / F \cdot \Delta t = Q \cdot \rho_3 \cdot d_e / 6 \cdot G_{cl} (T_{a.c.} - T_{pid}). \quad (2.3)$$

Після перетворень залежність (1.7) прийме наступний вигляд:

$$\frac{\partial W}{\partial t} = \frac{Q \cdot \rho_3 \cdot d_e}{6 \cdot G_{cl} (9000 - (8,28 + 0,00504 \cdot T_{pid}) \cdot T_{pid})}. \quad (2.4)$$

Рівняння обміну теплоти та вологи матиме вигляд [23, 24]:

$$q(\tau) = r \cdot \rho_0 \cdot R_v \cdot \frac{d\bar{u}}{d\tau} + \rho_0 \cdot R_v \cdot c \cdot \frac{dt}{d\tau}, \quad (2.5)$$

де $R_v = v/F$ – відношення об'єму до поверхні тіла.

Диференціальне рівняння поширення теплоти по довжині апарату [24]:

$$\lambda_3 (d^2 \Theta / dx^2) - v \cdot c_3 \cdot \rho_3 (d\Theta / dx) - c_{nos} \cdot \rho_{nos} \cdot w(t - t_0) = 0. \quad (2.6)$$

$$v \cdot c_3 \cdot \rho_3 \cdot t_0 = v \cdot c_3 \cdot \rho_3 \cdot t(0) - \lambda_{nos} \left. \frac{dt}{dx} \right|_{x=0}; \quad \lambda_3 \left. \frac{dt}{dx} \right|_{x=l} = 0. \quad (2.7)$$

На практиці розв'язати систему диференціальних рівнянь для конкретних випадків важко, особливо якщо врахувати, що кінематичні коефіцієнти, що входять в ці рівняння, змінюються в процесі сушіння [23, 24]. Для створення математичної моделі процесу сушіння задамося деякими припущеннями:

- у вертикальному напрямку перемішування частинок ідеальне і температура змінюється тільки по довжині апарату: з боку завантаження вона мінімальна, а по мірі віддалення від місця завантаження температура зростає;
- температура повітря, що залишає шар, рівна середній температурі зерна в шарі;
- тепло- та масообмін відбувається між сушильним агентом і зерном;
- під час відлежування зерна вологість і температура не змінюються.

Згідно припущень і закону збереження енергії в процесі сушіння тепло, передане підігрітим повітрям йде на нагрівання зерна і випаровування вологи:

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = -\frac{\gamma_3 \cdot c_3 \cdot \partial \Theta}{\gamma_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} \cdot \varepsilon \cdot \partial \tau} - \frac{\gamma_3 \cdot r}{\gamma_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} \cdot \varepsilon} \cdot \frac{\partial W}{\partial \tau} \cdot \frac{1}{100}. \quad (2.8)$$

Відповідно до закону збереження речовини отримуємо залежність:

$$\partial W / \partial \tau = -(\gamma_{\text{нов}} \cdot \varepsilon / 10 \cdot \gamma_3) \cdot \partial d / \partial \tau. \quad (2.9)$$

Згідно законів тепло- і масообміну між зерном і агентом сушіння маємо:

$$\partial W / \partial \tau = -K \cdot (W - W_p). \quad (2.10)$$

Система, що складається з рівнянь (2.6), (2.8–2.10), описує процес сушіння зерна в псевдо-зрідженому шарі з переривчастою подачею теплоносія. З причини значної кількості змінних аналітичне рішення цієї системи рівнянь ускладнене. Тому для розв'язку використаємо ступінчастий метод розрахунку, який заснований на послідовному (в часі і в просторі) розрахунку процесу сушіння зерна протягом часу, за який швидкість сушіння змінюється незначно.

Дані розрахунків залежності вологості і нагрівання зерна в процесі сушіння, температури і вологовмісту агента сушіння представлені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1

Результати математичного моделювання процесу сушіння зерна

Номер секції	Температура продукту сушіння T_1 , °К			Вологість продукту сушіння W , %			Температура агента сушіння T_2 , °К			Вологовміст агента сушіння d , г/кг с.п.		
	Тривалість продування однієї секції τ , с											
	22	32	42	22	32	42	22	32	42	22	32	42
1	288,7	289,4	289,7	19,9	19,9	19,8	328,3	323,6	320,7	12,8	14,7	16,5
2	290,7	291,4	291,6	19,7	19,7	19,6	328,1	323,3	320,3	12,8	14,6	16,4
3	292,5	293,2	293,4	19,5	19,5	19,4	327,9	323,0	319,8	12,8	14,5	16,3
4	294,3	294,9	295,1	19,3	19,3	19,2	327,8	322,6	319,4	12,6	14,5	16,2
5	295,9	296,5	296,7	19,1	19,1	19,0	327,6	322,3	318,9	12,7	14,4	16,1
6	297,4	298,0	298,2	18,9	18,9	18,8	327,4	321,9	318,5	12,6	14,4	16,0
7	298,9	299,4	299,6	18,8	18,7	18,6	327,2	321,5	317,8	12,7	14,3	15,9
8	300,2	300,7	300,9	18,6	18,5	18,5	327,0	321,1	317,4	12,6	14,3	15,9
9	301,5	302,1	302,1	18,4	18,3	18,3	326,8	320,6	316,7	12,6	14,2	15,8
10	302,7	303,2	303,3	18,2	18,2	18,1	326,6	320,1	316,2	12,5	14,1	15,7
11	303,8	304,3	304,4	18,0	17,9	17,9	326,3	319,7	315,5	12,5	14,1	15,6
12	304,9	305,3	305,4	17,8	17,8	17,7	326,1	319,1	314,8	12,5	14,0	15,6
13	305,9	306,3	306,4	17,7	17,6	17,6	325,7	318,5	314,0	12,5	14,0	15,5
14	306,8	307,3	307,3	17,5	17,5	17,4	325,5	317,9	313,2	12,4	13,9	15,4
15	307,8	308,1	308,2	17,3	17,3	17,2	325,1	317,3	312,4	12,4	13,9	15,3
16	308,6	309,0	309,1	17,2	17,1	17,1	324,8	317,6	311,6	12,4	13,8	15,3

За даними таблиці 2.1 зі збільшенням температури агента сушіння швидкість сушіння зростає, однак температура зерна при цьому перевищує гранично допустиме значення.

2.2. Обґрунтування процесу енергоживлення сушарки зернової синтез-газом з біомаси

Рівняння енергетичного балансу для процесу сушіння зернових в конвективній сушарці складається з двох частин – продуктивної Q_n і витратної Q_6 . Продуктивна частина балансу складається з потоків, що надходять в топку сушарки з паливом Q_1 , повітрям Q_3 , утворюються при згорянні палива Q_2 та завдяки використанню рекуперації Q_4 за відніманням відповідних втрат енергії в елементах конструкцій обладнання Q_5 .

Рівняння енергетичного балансу сушильної установки конвективного типу в загальному вигляді [15, 21, 39]:

$$Q_n = Q_6, \quad (2.11)$$

Рівняння (2.11) можна перетворити на відповідне рівняння продуктивності за виробництвом енергії і її споживанням в процесі сушіння:

$$dQ_n / d\tau = dQ_6 / d\tau, \quad (2.12)$$

де $dQ_n/d\tau$ та $dQ_6/d\tau$ – відповідно вироблена за певний проміжок часу кількість енергії, що надходить в топку сушарки з синтез-газом, повітрям і утворюється при згорянні синтез-газу, та енергія, що відбирається на процес сушіння зерна.

Отже, продуктивна частина Q_n енергетичного балансу, тобто енергія, утворена при використанні синтез-газу в якості енергоносія, кДж:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 - Q_5, \quad (2.13)$$

де Q_1 – енергія, що потрапляє в топку з синтез-газом, кДж; Q_2 – енергія, утворена при спалюванні газу, кДж; Q_3 – енергія, що потрапляє в топку сушарки з повітрям, кДж; Q_4 – енергія, яку можна отримати шляхом рекуперації, кДж; Q_5 – втрати енергії при спалюванні газу в топці, кДж.

Витратна частина балансу Q_6 складається:

$$Q_6 = (Q_8 + Q_9) = (Q_6 + Q_7) / \eta_{суш}, \quad (2.14)$$

де Q_6 – енергія, що витрачається на випаровування вологи з зерна, кДж; Q_7 – енергія, необхідна для розриву зв'язку вологи з матеріалом, кДж;

Q_8 – енергія, що виноситься з топки сухою газовою сумішшю, кДж;

Q_9 – енергія, що виноситься з топки водяною парою, кДж.

Важливим елементом даної частини балансу є енергія розриву зв'язку вологи з матеріалом Q_7 , яка за даними [9, 39] змінюється під час циклу сушіння зерна і в кінці циклу, при зниженні вологості зерна, може досягати суттєвих значень. Наприклад, для зерна пшениці вологістю 10 % величина цієї складової становить 25 % корисної енергії. Складову Q_7 витратної частини балансу з метою підвищення точності розрахунків можна представити [9, 39]:

$$Q_7 = - \int_0^{m_{\text{вог}}} RT \cdot \ln \varphi \cdot dm, \quad (2.15)$$

Для зерна пшениці при зміні вологості з 19% на 13,5% можна записати відношення: $(Q_6+Q_7)/Q_6=1,07$ [15]. Для уточнення витрат енергії на процес сушіння відношення $(Q_6+Q_7)/Q_6$ введено в математичний вираз (2.14) у вигляді коефіцієнта запасу енергії $k=1,07$. Значення $(Q_6+Q_7)/Q_6$ змінюється протягом циклу, тому введено поняття коефіцієнту нерівномірності теплового потоку:

$$\psi = Q_{6 \tau=\tau} / Q_{6 \tau=0}, \quad (2.16)$$

де $Q_{6 \tau=0}$ та $Q_{6 \tau=\tau}$ – кількість корисної енергії, витраченої на сушіння зерна відповідно на початку та наприкінці циклу сушіння.

Введення коефіцієнту нерівномірності теплового потоку ψ дозволило оптимізувати показник продуктивності установки за синтез-газом, відповідно забезпечивши енергетичні потреби процесу сушіння зерна, що є змінними в часі. Енергія Q_6 , спрямована на процес сушіння зерна (випаровування вологи):

$$Q_6 = \Delta W \cdot m_{\text{зерна}} \cdot q \cdot \psi / 100, \quad (2.17)$$

Енергія, що відбирається сушильною камерою Q_6 , кДж:

$$Q_6 = 1,07 \cdot \Delta W \cdot q \cdot m_{\text{зерна}} \cdot \psi / 100 \cdot \eta_{\text{суш}}. \quad (2.18)$$

Енергія, що потрапляє в топку сушарки з синтез-газом Q_1 , кДж:

$$Q_1 = c_{22} \cdot t_{22} \cdot V_{22}. \quad (2.19)$$

Енергія, утворена при спалюванні синтез-газу з врахуванням можливих втрат в топці, $(Q_2 - Q_5)$, кДж:

$$Q_2 - Q_5 = Q_B^{zz} \cdot V_{zz} \cdot \eta_T. \quad (2.20)$$

В рівнянні (2.20) використано вищу теплоту згоряння синтез-газу. Продукти горіння газу використано для формування агенту сушіння зерна.

Енергія, що потрапляє в топку сушарки з повітрям, Q_3 , кДж:

$$Q_3 = [T_{нов} \cdot c_{нов} + (r_n + c_n \cdot T_{нов}) d_0] V_{нов} \cdot \rho_{нов} \quad (2.21)$$

В зв'язку з тим, що застосування рекуперації в досліджуваному процесі сушіння не передбачено, Q_4 не враховано. Отже, продуктивна частина енергії згідно математичних залежностей (2.13), (2.19 – 2.21):

$$Q_n = V_{zz} \cdot [c_{zz} \cdot t_{zz} + Q_B^{zz} \cdot \eta] + [T_{нов} \cdot c_{нов} + (r_n + c_n \cdot T_{нов}) d_0] V_{нов} \cdot \rho_{нов}. \quad (2.22)$$

В рівнянні (2.22) об'єм повітря $V_{нов}$ продуктивної частини поєднує в собі сумарний об'єм повітря, необхідний для спалювання синтез-газу та об'єм повітря, необхідний для формування агенту сушіння:

$$V_{нов} = V_{нод} + V_{нод2}, \quad (2.23)$$

Оскільки на горіння кілограму газу в середньому необхідно (1,8–2) кілограми повітря [19, 39], вираз для розрахунку об'єму повітря має вигляд:

$$V_{нод} = (1,8...2) V_{zz} \cdot \rho_{zz} / \rho_{нов}. \quad (2.24)$$

За нормальних умов при $T_{нов} = 20^\circ\text{C}$ питома вага повітря складає $\rho_{нов} = 1,205 \text{ кг/м}^3$, а питома вага синтез-газу $\rho_{zz} = 1,05 \text{ кг/м}^3$, отже математична залежність (2.24) запишеться наступним чином:

$$V_{нод} = (1,57...1,74) \cdot V_{zz} = k_1 \cdot V_{zz}, \quad (2.25)$$

Вміст $V_{нод2}$ в агенті сушіння складає близько 80% залежно від температури сухих топкових газів і кінцевої температури агенту сушіння, а вміст синтез-газу – 20%, отже:

$$V_{нод2} = 4 \cdot (V_{zz} + V_{нод}) = (10,28...10,96) \cdot V_{zz} = k_2 \cdot V_{zz}, \quad (2.26)$$

Отже, математичний вираз для визначення загального об'єму повітря, необхідного для горіння газу та формування агенту сушіння матиме вигляд, м^3 :

$$V_{нов} = (k_1 + k_2) \cdot V_{zz}. \quad (2.27)$$

Підстановкою виразів (2.18) і (2.22) і (2.27) в формулу (2.11) отримано:

$$\frac{\Delta V_{zz}}{\Delta \tau} = \frac{\Delta W}{\Delta \tau} \cdot \frac{(1,07 \cdot q \cdot m_{\text{зерна}}) \cdot \psi \cdot 10^{-2}}{\eta_{\text{суш}} \left[(c_{zz} \cdot t_{zz} + Q_B^{zz} \cdot \eta_T) + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot [T_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} + (r_n + c_n \cdot T_{\text{нов}}) d_0] \right]} \quad (2.28)$$

$$\int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{dV_{zz}}{d\tau} = \int_{\tau_1}^{\tau_2} \frac{(1,07 \cdot q \cdot m_{\text{зерна}}) \cdot \psi \cdot 10^{-2}}{\eta_{\text{суш}} \left[(c_{zz} \cdot t_{zz} + Q_B^{zz} \cdot \eta_T) + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot [T_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} + (r_n + c_n \cdot T_{\text{нов}}) d_0] \right]} dW, \quad (2.29)$$

де τ_1, τ_2 – відповідно початковий і кінцевий моменти сушіння зерна, год.

$$V_{zz}^{заз} \Big|_{\tau_1}^{\tau_2} = \frac{(1,07 \cdot q \cdot m_{\text{зерна}}) \cdot \psi \cdot 10^{-2}}{\eta_{\text{суш}} \left[(c_{zz} \cdot t_{zz} + Q_B^{zz} \cdot \eta_T) + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot [T_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} + (r_n + c_n \cdot T_{\text{нов}}) d_0] \right]} W \Big|_{\tau_1}^{\tau_2}, \quad (2.30)$$

де $V_{zz}^{заз}$ – об'єм синтез-газу, необхідний для висушування такої кількості зерна, яка містить кількість вологи $(W_1 - W_2) \cdot m_{\text{зерна}}$ за весь цикл роботи сушарки $(\tau_2 - \tau_1)$. Середньогодинні витрати синтез-газу на процес сушіння зерна, м³/год:

$$P_{V_{zz}} = \frac{(1,07 \cdot q \cdot m_{\text{зерна}}) \cdot \psi \cdot 10^{-2} \cdot W}{(\tau_2 - \tau_1) \cdot \eta_{\text{суш}} \left[(c_{zz} \cdot t_{zz} + Q_B^{zz} \cdot \eta_T) + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{\text{нов}} \cdot [T_{\text{нов}} \cdot c_{\text{нов}} + (r_n + c_n \cdot T_{\text{нов}}) d_0] \right]} \quad (2.31)$$

При встановленому процесі газоутворення і сталих параметрах палива продуктивність газогенератора і якість отриманого синтез-газу залежать від конструкції камери газоутворення. Знаючи продуктивність газогенераторної установки $P_{V_{zz}}$ за газом математична залежність для визначення годинних витрат соломи на процес газоутворення в диференціальному вигляді:

$$\frac{dG_n}{d\tau} = \frac{1}{v_c} \cdot \frac{dP_{V_{zz}}}{d\tau} = \frac{K_1}{K_2} \cdot \frac{dP_{V_{zz}}}{d\tau}, \quad (2.32)$$

де v_c – кількість сухого газу, отримана з кілограма соломи, м³/кг.

$$v_c = K_2 / K_1. \quad (2.33)$$

$$K_1 = (CO + CO_2 + CH_4) / 1,867. \quad (2.34)$$

$$K_2 = C_o^p = C^p - C_{n,y}. \quad (2.35)$$

де – CO, CO_2, CH_4 – вміст відповідних компонентів у складі газу, % / м³; C_o^p – кількість вуглецю з кілограму палива, що перейшла в газ, % / кг палива; C^p – вміст вуглецю в паливі, % / кг; $C_{n,y}$ – сума втрат вуглецю, % / кг.

Оскільки в якості палива використовувалася солома-січка пшениці згідно [20, 22] вміст вуглецю в даній солімі коливається в межах 38,2 – 27 %.

Математичну залежність між витратами повітря на процес газотворення при незначному вмісті азоту в соломі $N_p^2=0$ та кількістю сухого синтез-газу, отриманого з кілограма соломи, представлено в диференціальному вигляді:

$$dv_{nos} / d\tau = 1,27 \cdot N_2^2 (dv_c / d\tau). \quad (2.36)$$

Вміст азоту N_2^{ca3} в газі залежить від його вмісту в соломі і в газах дуття, що надходять для забезпечення процесу газотворення. Для забезпечення придатності генераторного газу до спалювання в топці зерносушарки вміст азоту в ньому повинен бути в межах $N_2^{ca3}=0,38-0,53$ масової частки. Отже, виходячи з вище зазначеного, встановлено математичну залежність між продуктивністю газогенератора за газом та подачею газів дуття:

$$0,48 \frac{dv_c}{d\tau} \geq \frac{dv_{nos}}{d\tau} \geq 0,67 \frac{dv_c}{d\tau}. \quad (2.37)$$

Помноживши праву і ліву частини рівняння (2.37) на годинні витрати соломи G_n , отримано:

$$G_n \frac{dv_{nos}}{d\tau} = \frac{N_2^{ca3}}{0,79} \cdot \frac{dv_c}{d\tau} G_n, \quad (2.38)$$

Отже, витрати повітря на процес газотворення, м³/год:

$$\Delta\Pi_{V_{nos}} = 1,27 \cdot N_2^2 \cdot \Delta\Pi_{V_{e.g.}}. \quad (2.39)$$

Здійснимо перехід до питомого показника витрат соломи $G_{к2/м\%}$ на зниження вологості тони зерна на відсоток та питомої продуктивності зерносушарки на кілограм соломи-січки, що використовувалась в газогенераторі $\Pi_{м\%/к2}$ з метою отримання синтез-газу. Математичні залежності для визначення показників питомої продуктивності $\Pi_{м\%/к2}$ та питомої витрати соломи-січки $G_{к2/м\%}$ наступні:

$$G_{к2/м\%} = \frac{10,7 \cdot K_1 \cdot q \cdot \psi}{K_2 \cdot \eta_{суш} [c_{z2} \cdot t_{z2} + Q_B^{z2} \cdot \eta_T + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{nos} \cdot [T_{nos} \cdot c_{nos} + (r_n + c_n \cdot T_{nos}) d_0]]}; \quad (2.40)$$

$$\Pi_{м\%/к2} = \frac{1}{G_{м\%}} = \frac{K_2 \cdot \eta_{суш} [c_{z2} \cdot t_{z2} + Q_B^{z2} \cdot \eta_T + (k_1 + k_2) \cdot \rho_{nos} \cdot [T_{nos} \cdot c_{nos} + (r_n + c_n \cdot T_{nos}) d_0]]}{10,7 \cdot K_1 \cdot q \cdot \psi}. \quad (2.41)$$

Задаючись даними: q – визначається для кожного конкретного випадку за I-d діаграмою вологого повітря, кДж/кг; $\psi=0,8 - 1,05$; $K_1=17,62 - 19,4$; $K_2=24,8 - 38,7$; $\eta_{суш}=0,9$; $c_{z.z.}=1,05$ кДж/(м³·°К); $t_{z.z.}=673 - 873$ °К; $\eta_T=0,85$; $k_1=1,57 - 1,74$; $k_2=10,28 - 10,96$; $\rho_{нов}=1,2047$ кг/м³; $c_{нов}=1,01$ кДж/(кг·°К); $T_{нов}=293$ К $r_n=2260$ кДж/кг; $c_n=2,2$ кДж/(кг·°К); $d_0=0,012$ кг/кг; $Q_B^{z.z.}=f(W^p)$ побудовано графічну залежність питомої продуктивності $\Pi_{m.\%/кг}$ сушарки (рис. 3.4) та питомої витрати палива $G_{кг/м.\%}$ на процес сушіння зерна (рис. 3.3) при змінній вологості соломи-січки W^p .

За графічною залежністю (рис. 3.3) питомі витрати соломи-січки на процес сушіння зерна суттєво зростають при підвищенні її вологості, що встановлює обґрунтовані межі вологості 8–30 % соломи-січки, за яких використання газогенераторів є економічно доцільним. При вологості біомаси більшій за 30 % ефективність використання газогенераторів знижується.

За залежністю (рис. 3.3) при використанні в якості палива соломи-січки з $W^p=20$ % без попереднього підсушування питома витрата її може змінюватись в межах $G_{кг/м.\%} = 4,8 - 6,3$ кг/т·%, що забезпечує зниження витрат соломи в межах 20 % в порівнянні із її прямим спалюванням в сушарках ООО «Бриг» [21].

2.3. Визначення продуктивності сушарки за зерном

При проектуванні зерносушарки з псевдо-зрідженим шаром важливо правильно вибрати швидкість руху повітря. Занадто високі швидкості ведуть до перевитрати енергії. Сушіння зерна в псевдо-зрідженому шарі супроводжується пневмотранспортуванням. Аерований вантаж під дією сил тяжіння здатний текти з ухилом не менше 3...4°. Продуктивність при ширині B і висоті H_M потоку вантажу можна визначити за формулою [27], кг/год:

$$\Pi = 3600 \cdot \gamma \cdot F \cdot v = 3600 \cdot \gamma \cdot B \cdot H_m \cdot v. \quad (2.42)$$

Швидкість переміщення самопливного вантажу можна визначити за [23]:

$$v = \sqrt{2 \cdot g \cdot L \cdot (\sin \beta - \varepsilon_1 \cdot f \cdot \cos \beta)}, \quad (2.43)$$

В зв'язку з незначним коефіцієнтом тертя зернового матеріалу в процесі транспортування силами тертя опору можна знехтувати. Для визначення теоретичної швидкості витікання шару складаємо рівняння живих сил:

$$P \cdot L_1 = m \cdot v_0^2 / 2, \quad (2.44)$$

де $P = m \cdot g \cdot \sin \beta$, тоді провівши перетворення визначимо теоретичну швидкість витікання матеріалу, м/с:

$$v_0 = \sqrt{2 \cdot g \cdot L_1 \cdot \sin \beta}, \quad (2.45)$$

Вираз (2.45) є справедливим за умови безперервного витікання матеріалу по всій поверхні газорозподільної решітки. При переривчастому сушінні, тобто продуванні секцій по черзі, слід застосовувати поправочні коефіцієнти:

$$v = v_0 \cdot k_1, \quad (2.46)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує циклічність переміщення.

$$k_1 = \tau_1 / \tau'. \quad (2.47)$$

$$\tau_1 = L_1 / v_0 = L_1 / \sqrt{2 \cdot g \cdot L_1 \cdot \sin \beta} = \sqrt{L_1 / 2 \cdot g \cdot \sin \beta}. \quad (2.48)$$

$$v = L_1 \cdot \sqrt{n \cdot (1 - \varepsilon_1 \cdot f \cdot \operatorname{ctg} \beta)} / \tau'. \quad (2.49)$$

$$\Pi = 3600 \cdot \gamma \cdot B \cdot H_m \cdot L_1 \cdot \sqrt{n \cdot (1 - \varepsilon_1 \cdot f \cdot \operatorname{ctg} \beta)} / \tau' \quad (2.50)$$

2.4. Висновки за розділом 2

1. Виконані дослідження дозволили теоретично обґрунтувати робочий процес сушіння зерна в псевдо-зрідженому шарі з переривчастою подачею агента сушіння і визначити параметри процесу.

2. Виходячи з рівняння енергетичного балансу зерносушарки, що працює на синтез-газі, встановлено залежності для визначення середніх витрат синтез-газу $\Pi_{V_{22}}$ на процес сушіння зерна.

3. Встановлено математичну залежність для визначення показника питомої продуктивності зерносушарки $\Pi_{m\% / \text{кг}}$ при зміні відносної вологості соломи січки пшениці W^P .

РОЗДІЛ 3

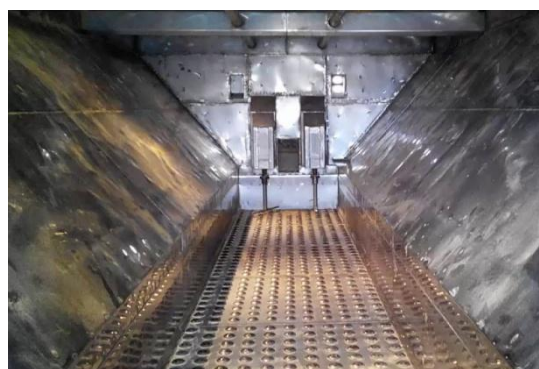
РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ЗЕРНА В СУШАРЦІ З ПСЕВДОЗРІДЖЕНИМ ШАРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ НА СИНТЕЗ-ГАЗІ З БІОМАСИ

3.1. Матеріали та методи дослідження процесу сушіння зерна в сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси

Дослідження виконано шляхом проведення багатофакторного експерименту за методикою [33]. Конструкція запропонованої сушарки (рис. 3.1, а), оснащена газогенераторною установкою (рис. 3.1, в), передбачає псевдо-зрідження зернового матеріалу не на всій поверхні зони сушіння, а послідовно по ділянкам. В кожен момент часу гарячим повітрям зерно продувається на одній ділянці зони сушіння. Тут воно знаходиться в псевдо-зрідженому стані. Протікає інтенсивне сушіння і виникає біжуча хвиля, що сприяє транспортуванню зерна вздовж камери сушіння. В цей час решта зерна знаходиться в стані спокою. Здійснюється його рівномірне прогрівання і переміщення вологи капілярами до поверхні зерна.



а)



б)



в)

Рис. 3.1. Зернова сушарка, оснащена газогенераторною установкою: а – загальний вигляд; б – робоча зона; в – загальний вигляд газогенераторної установки

Процес сушіння передбачає псевдо-зрідження шару зернового матеріалу послідовно по ділянкам, а не по всій поверхні зони сушіння. В певний момент часу зернова маса продувається гарячим повітрям лише на одній секції камери сушіння. На цій секції зернова маса знаходиться в псевдо-зрідженому стані. Протікає процес інтенсивного сушіння і виникає біжуча хвиля, що сприяє транспортуванню зернової маси вздовж камери сушіння (рис. 3.1, б). Решта зерна в цей час знаходиться в стані спокою. Зерно рівномірно прогрівання і волога, яка міститься в зернинах, капілярами піднімається до їх поверхонь.

Температуру агента сушіння визначали за допомогою термопары ТХА (тип К), яка монтувалася в газорозподільній камері сушарки зернової. Температуру зерна визначали за методикою [15]. За цією методикою вимірювали температуру раптово опущеного шару зернового матеріалу (в результаті припинення подачі агента сушіння). При такій методиці похибка вимірювання не перевищує 0,5 %. Отже, температуру зерна вимірювали під час його перебування в стані спокою. Термопару опускали в шар зернового матеріалу і значення температури фіксували в 3...4 контрольних точках. Початкову та кінцеву вологість зернової маси вимірювали електричним вологоміром, а зменшення вологи в шарі матеріалу контролювали електронними вагами ВЛКТ-500М. З цією метою камера сушіння з газорозподільним решетом була виконана знімною.

За [27] зернова маса не повинна нагріватися вище температури $T_1=45...50$ °С. Під час проведення експериментальних досліджень змінними факторами були: температура агента сушіння T_2 , тривалість продування агентом сушіння однієї секції газорозподільного решета τ' та кількість секцій n на решеті. Саме відношення часу відлежування зерна до тривалості продування зернової маси T_n/τ залежить від кількості секцій n на решеті. Зазначені параметри змінювалися в наступних діапазонах: T_2 – в діапазоні від 30 до 54 градусів; n – від 4 до 16 штук та τ' від 10 до 50 с. Кодування значень факторів було наступним: $X_1=T_2$, $X_2=n$, $X_3=\tau'$. Щоб отримати моделі процесу сушіння зерна у вигляді поліномів другого ступеню вибрано некомпозиційний план

другого порядку на кубі типу Бокса-Бенкіна [33]. Для достовірності отриманих експериментальних даних прийнято, що кількість паралельно виконаних за однакових умов дослідів рівна $k=3$. У відповідності до матриці планування виконано серію з 8 дослідів та обраховані коефіцієнти лінійної частини полінома за [33].

3.2. Результати дослідження процесу сушіння зерна в сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з біомаси

Визначивши коефіцієнти кореляційних залежностей отримано рівняння регресії експозиції сушіння (3.1) та нагрівання зернової маси (3.2):

$$\tau = 5280 - 186,02 \cdot T_2 + 168,5 \cdot n - 30,42 \cdot \tau' - 3,33 T_2 \cdot n - 0,134 n \cdot \tau' + 2,2 \cdot T_2^2 + 6,21 \cdot n^2. \quad (3.1)$$

Характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,98$; $F=19,0$; $p=1,88 \cdot 10^{-3}$.

$$\Delta T_1 = 20,66 + 0,08 T_2 - 0,0375 \cdot n + 0,025 \cdot \tau' - 0,07 T_2 \cdot n + 0,062 T_2 \cdot \tau' + 0,07 \cdot n \cdot \tau' - 0,034 T_2^2 + 0,017 \cdot n^2 - 0,025 \cdot (\tau')^2. \quad (3.2)$$

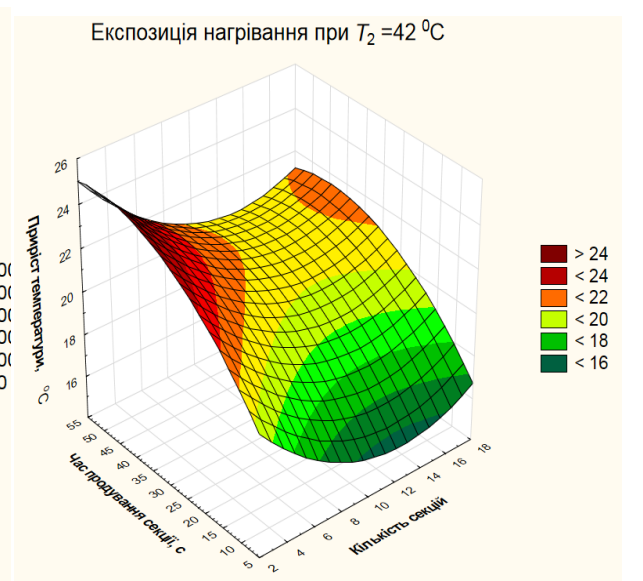
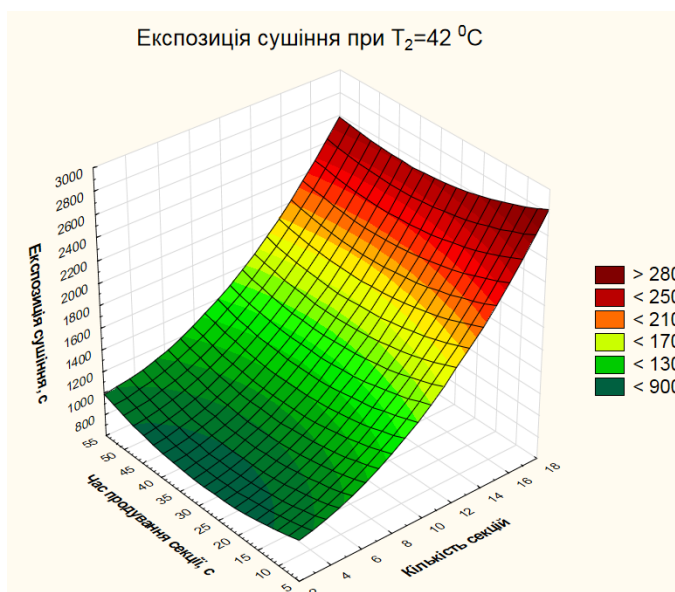
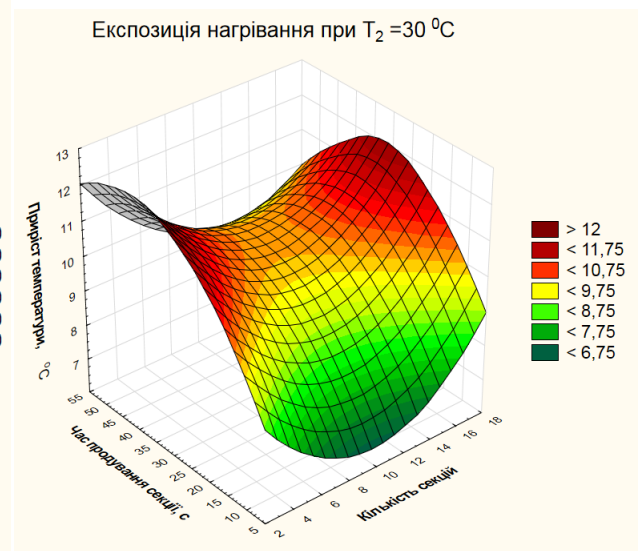
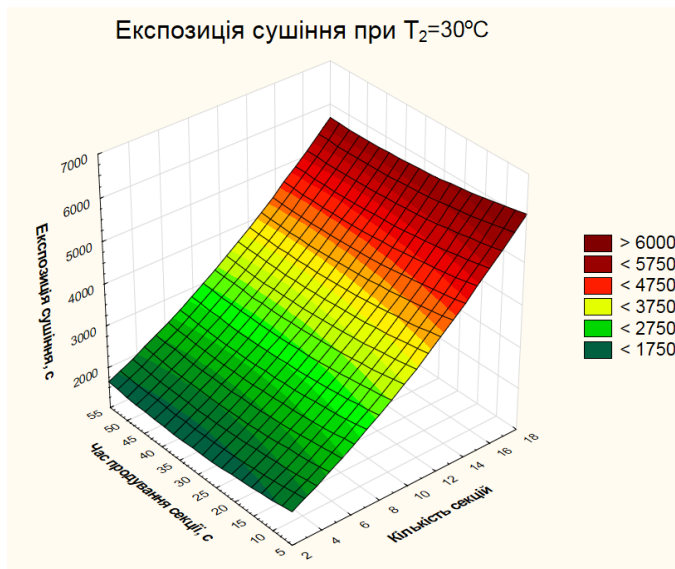
Характеристика адекватності рівняння: $R^2=0,99$; $F=18,3$; $p=2,03 \cdot 10^{-4}$.

Аналіз залежностей (рис. 3.2) свідчить, що із зменшенням температури агенту сушіння експозиція сушіння зростає. При найменшій кількості секцій вона набуває мінімального значення. Зерно, в свою чергу, має тим вищу температуру, чим вища температура агенту сушіння. Температура зерна набуває найменших значень при кількості секцій 13...16. В програмі Statistica 11 рівняння (3.1) та (3.2) було оптимізовано. Також пораховано швидкість процесу сушіння та продуктивність сушарки.

За дослідженнями процес сушіння має найвищу швидкість при температурі агенту сушіння $60 \text{ }^\circ\text{C}$ і на ділянці камери сушіння з 6 до 10 секцій. Максимальна продуктивність процесу сушіння зернового матеріалу має місце при кількості секцій 14 і досягається за умови забезпечення максимальної швидкості процесу.

Шляхом випробовувань встановлено кінетичні залежності процесу сушіння, за якими можна визначити потрібний час на процес сушіння залежно

від початкової вологості зернової маси. Даний показник отримано з використанням програмного забезпечення Statistica 11 методом перебирання усіх комбінацій дослідних даних за відношенням часу відлежування τ'' до часу продування τ' . Час відлежування складає $\tau'' = \tau'(n-1)$. Залежно від температури агента сушіння найвища швидкість процесу відповідала відношенню $\tau'' \cdot (\tau')^{-1}$ в діапазоні 0...8. При подальшому зростанні температури агента сушіння мало місце явище зменшення швидкості випаровування вологи з шару зерна. Ця закономірність пояснюється явищем загартовування зернин при високих температурах агента сушіння, що ускладнює випаровування вологи з поверхні шару зернового матеріалу.



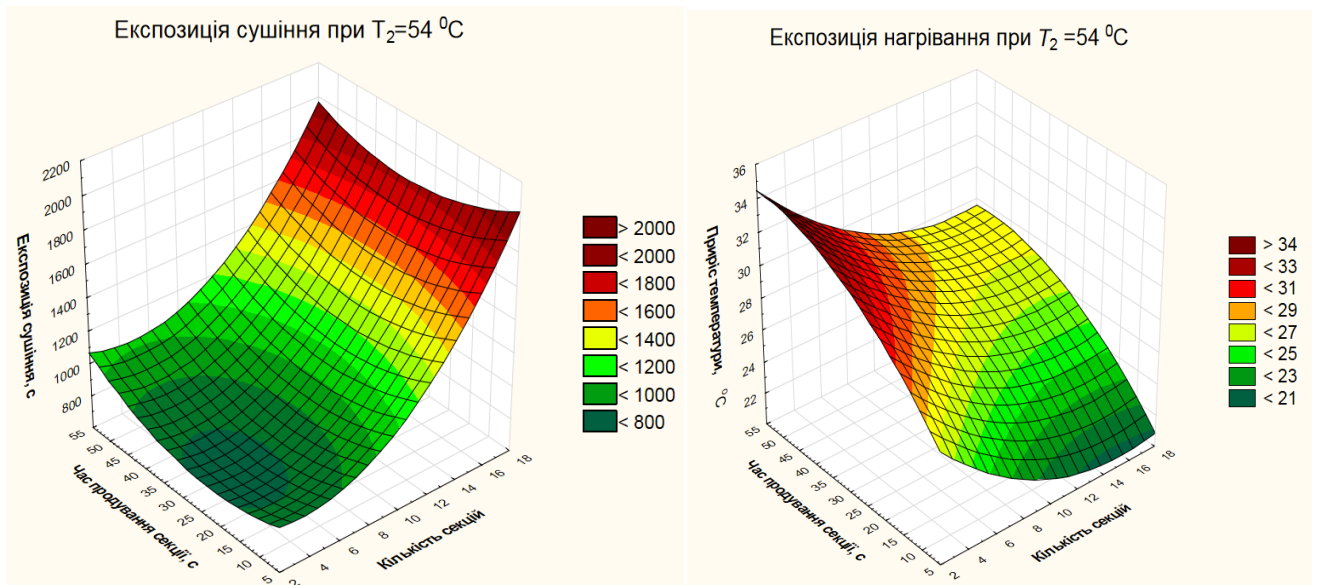


Рис. 3.2. Криві експозиції сушіння та нагрівання зернового матеріалу залежно від кількості секцій та тривалості продування при різних значеннях T_2

За результатами досліджень при збільшенні температури агента сушіння до $60\text{ }^\circ\text{C}$ продуктивність зерносушарки зростала, а далі знижувалася. Продуктивність сушарки була максимальною при температурі агента сушіння $60\text{ }^\circ\text{C}$ та співвідношенні $\tau'' \cdot (\tau')^{-1} = 13$. Слід зазначити, що хоча найвище значення швидкості сушіння та продуктивності досягаються за різних значень $\tau'' \cdot (\tau')^{-1}$, однак, із збільшенням кількості секцій на газорозподільній решітці продуктивність різко зростає, хоча швидкість випаровування вологи зменшується.

Отже, за критерієм максимальної продуктивності було спроектовано і виготовлено промисловий зразок сушарки зернової. Значення максимальної продуктивності сушарки отримано дослідним шляхом за наступних раціональних значень параметрів: $n=14$, $T_2=60\text{ }^\circ\text{C}$, $\tau'=30\text{ с}$. Техніко-економічні показники даної сушарки наступні: початкова вологість зерна – 19 %, кінцева – 13,5 %; продуктивність сушарки за зерном 1,5 т/год; температура агента сушіння $60\text{ }^\circ\text{C}$; витрати агента сушіння – $2600\text{ м}^3/\text{год}$; експозиція сушіння – 12 хв; витрати палива (солома-січка) 50...56 кг/год; питомі витрати енергії – $4,28 \cdot 10^6\text{ Дж/кг}$.

Отже, використання синтез-газу з рослинної сировини для енергозабезпечення сушарки зернової показують, що питомі витрати, в нашому випадку, соломи-січки $G_{кз/м. \%}$ на процес сушіння зерна в значній мірі залежать від вологості соломи W^p . Підвищення вологості сировини на 5 % призводить до зниження питомої продуктивності сушарки на 18 – 20 %. Отже, встановлено, що раціональним є діапазон значень вологості соломи в межах 10...30 %. Питома продуктивність сушарки знижується на 25–30 % при використанні соломи з вологістю $W^p > 30\%$. Отже, за таких умов використання синтез-газу для енергозабезпечення процесу сушіння зернової маси є недоцільним.

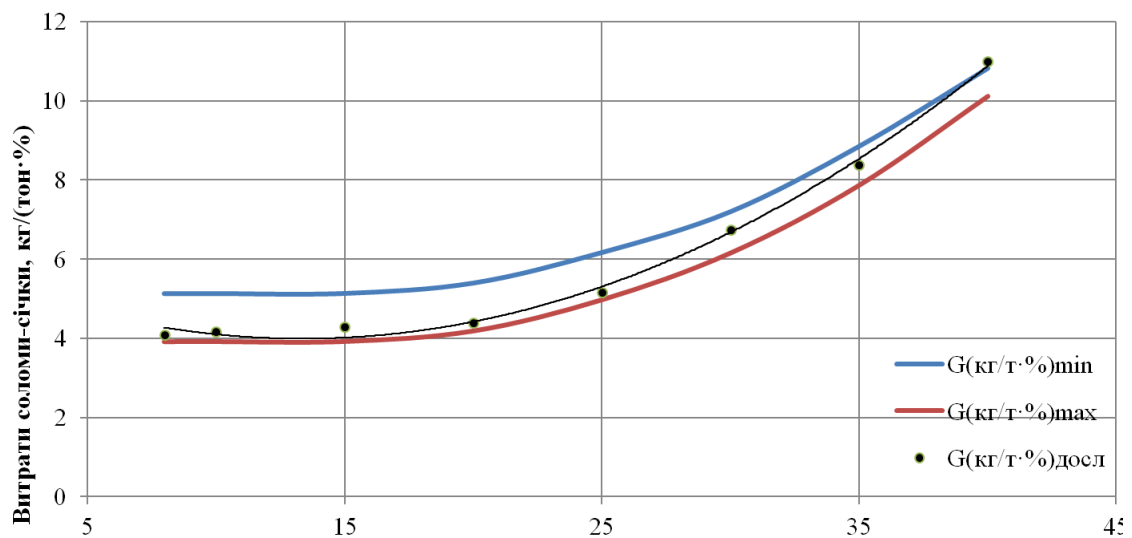


Рис. 3.3. Залежність питомої витрати соломи-січки G на процес сушіння зерна від її вологості W^p

Експериментальні дані з визначення залежності питомої витрати соломи-січки $G_{кз/м. \%}$ на процес сушіння зерна від її вологості W^p підтверджують дані, отримані шляхом математичного моделювання: математична залежність (2.40) і графічна залежність (3.3). При вологості сировини $W^p > 30\%$ застосування газогенераторних технологій з метою енергозабезпечення процесу сушіння зернових стає економічно недоцільним. Мінімальне значення питомої витрати палива $G_{кз/м. \%}$ на процес сушіння зерна досягається при значеннях відносної вологості соломи-січки $W^p \leq 10\%$ і його визначено, з коефіцієнтом детермінації $R^2 = 0,996$ за допомогою поліному другого ступеню:

$$G_{кз/м-\%} = 0,001 \cdot (W^P)^2 + 0,045 \cdot W^P + 3,678 . \quad (3.3)$$

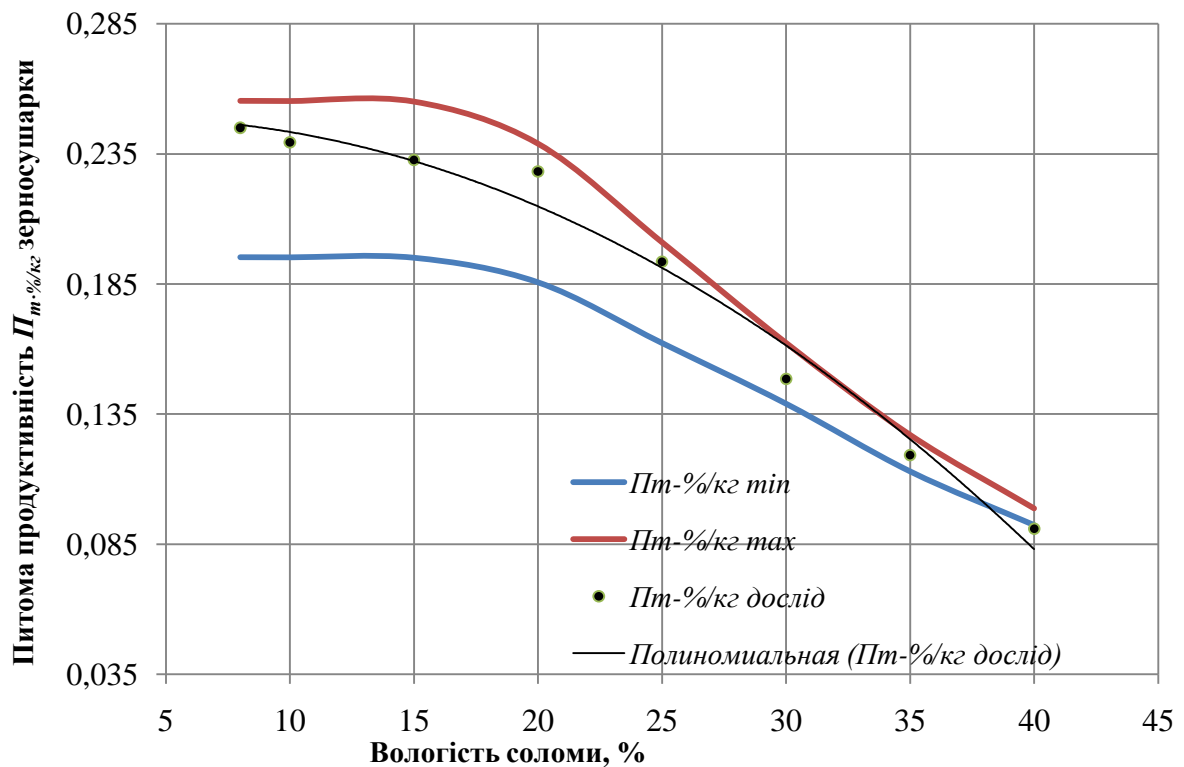


Рис. 3.4. Залежність питомої продуктивності $\Pi_{м-\%/кг}$ зерносушарки від вологості соломи-січки W^p

Аналіз графічної залежності (рис. 3.4) питомої продуктивності зерносушарки за зерном $\Pi_{м-\%/кг}$ від вологості соломи-січки W^p свідчить, що значне зниження питомої продуктивності $\Pi_{м-\%/кг}$ спостерігається вже при перевищенні значення вологості соломи-січки $W^p=20\%$. За (рис. 3.4) підвищення вологості сировини на 5% призводить до зниження питомої продуктивності $\Pi_{м-\%/кг}$ сушарки на 18–20%, а при використанні сировини з вологістю, що виходить за межі раціонального діапазону $W^p>30\%$, питома продуктивність $\Pi_{м-\%/кг}$ сушарки може знизитися до 25–30%. При використанні сировини з вологістю $W^p=30\%$ можна висушити 0,16 тон зерна на 1% вологості. Максимальне значення питомої продуктивності сушарки $\Pi_{м-\%/кг}$ досягається при вологості сировини $W^p \leq 10\%$ і його визначено поліноміальною залежністю, з коефіцієнтом детермінації $R^2=0,992$:

$$\Pi_{м-\%/кг} = 0,000032 \cdot (W^P)^2 - 0,0051 \cdot W^P + 0,282 . \quad (3.4)$$

3.3. Висновки до розділу 3

1. Методом проведення багатофакторного експерименту з подальшим аналізом даних встановлено раціональні конструктивно-технологічні параметри спроектованої сушарки зернової: максимальна продуктивність сушарки досягається при температурі агента сушіння 60 °С та співвідношенні часу продування до часу відлежування зерна 13; кількість секцій – 14 з тривалістю продування однієї секції 30 с.

2. Використання синтез-газу з рослинної сировини для енергозабезпечення зернових сушарок є доцільним і забезпечує високі показники економічної, енергетичної та екологічної ефективності при використанні соломи з вологістю 10...30 %. Збільшення відносної вологості соломи на 5 – 10 % спричиняє додаткові витрати теплоти на випаровування цієї вологи на 7...15 %. Використання соломи з вологістю понад 30 % знижує питому продуктивність сушарки на 25 – 30 %.

3. Використання представленої конструкції зернової сушарки знижує питомі витрати на післязбиральну обробку зерна до 30%.

ВИСНОВКИ

Експериментальні дослідження, математичний опис і численні моделювання процесу сушіння зернового матеріалу в сушарці з псевдо-зрідженим шаром, що працює на синтез-газі з рослинної сировини, дозволяють зробити наступні висновки:

1. Запропоновано математичну модель процесу конвективного сушіння зерна у псевдо-зрідженому стані, розроблену на основі матеріального та теплового балансів продукту та агенту сушіння. Однак, дана модель потребує подальшого удосконалення, оскільки не повністю враховує співвідношення температур агенту сушіння в об'ємі шару зерна та на виході з нього, можливий характер руху зернин в шарі матеріалу та витрати теплоти на неорганізований повітрообмін (втрати внаслідок газопроникності стін та ін.).

2. Методом проведення багатофакторного експерименту з подальшим аналізом даних встановлено раціональні конструктивно-технологічні параметри спроектованої сушарки зернової: максимальна продуктивність сушарки досягається при температурі агента сушіння 60 °С та співвідношенні часу продування до часу відлежування зерна 13; кількість секцій – 14 з тривалістю продування однієї секції 30 с.

3. Використання синтез-газу з рослинної сировини для енергозабезпечення зернових сушарок є доцільним і забезпечує високі показники економічної, енергетичної та екологічної ефективності при використанні соломи з вологістю 10...30 %. Збільшення відносної вологості соломи на 5 – 10 % спричиняє додаткові витрати теплоти на випаровування цієї вологи на 7...15 %. Використання соломи з вологістю понад 30 % знижує питому продуктивність сушарки на 25 – 30 %.

4. Використання представленої конструкції зернової сушарки знижує питомі витрати на післязбиральну обробку зерна до 30%.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Aboltins A. Mathematical model of deep-bed grain layer drying by ventilation. *Progress in industrial mathematics at ECMI 96*. B. G. Teubner : Stuttgart, 1997. P. 143–149.
2. Aboltins A. Theoretical study of material drying coefficient. “*Engineering for Rural Development*” : Proceedings of 12th International Scientific Conference, May 23-24. 2013. Latvia : Jelgava, 2013. P. 153–158.
3. Azmir J., Hou Q., Yu A. Discrete particle simulation of food grain drying in a fluidised bed. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 238–249.
4. Darvishi H., Khoshtaghaza M. H., Minaei S. Effects of fluidized bed drying on the quality of soybean kernels. *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*. 2015. Vol. 14, Issue 2. P. 134–139. doi:10.1016/j.jssas.2013.09.002
5. Golub G. A., Kukharets S. M., Yarosh Y. D., Kukharets V. V. Integrated use of bioenergy conversion technologies in agroecosystems. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2017. Vol. 51, Issue 1. P. 93–100.
6. Giglou A., Rafiee Sh., Kh. Khanali M. Model development for shelled corn drying in a plug flow fluidized bed dryer. *Engineering in Agriculture, Environment and Food*. Vol. 11, Issue 1. 2018. P. 1–8.
7. Liu Y., Peng J., Kansha Y., Ishizuka M., Tsutsumi A., Jia D., Sokhansanj S. Novel fluidized bed dryer for biomass drying. *Fuel Processing Technology*. 2014. Vol. 122. P. 170–175. doi:10.1016/j.fuproc.2014.01.036
8. Menth J., Maus M., Wagner K. G. Continuous twin screw granulation and fluid bed drying: a mechanistic scaling approach focusing optimal tablet properties. *Internat. Journal of Pharms*. 2020. doi:10.1016/j.ijpharm.2020.119509
9. Patra T. K., Sheth P. N. Biomass gasification models for downdraft gasifier: A state-of-the-art review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015. Vol. 50 (C). P 583–593. [doi: 10.1016/j.rser.2015.05.012](https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.05.012)
10. Pavlenko M., Chuba V., Tsyvenkova N., Tereshchuk M. An experimental study on biomass air-steam gasification effectiveness in a downdraft

gasifier. “*Engineering for Rural Development*” : Proceedings of 19th International Scientific Conference, May 23-24. 2020. Latvia : Jelgava, 2020. P. 1831–1839.

11. Sivakumar R., Saravanan R., Elaya Perumal A., Iniyani S. Fluidized bed drying of some agro products – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 61. P. 280–301. doi:10.1016/j.rser.2016.04.014

12. Susastriawan A. A. P., Saptoad H., Purnomo. Small-scale downdraft gasifiers for biomass gasification: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017. Vol. 76(C). P. 989–1003. doi: 10.1016/j.rser.2017.03.112

13. Tsyvenkova N. M., Golubenko A. A., Kukharets S. M., Biletsky V. R. The research of downdraft gas producer heat productivity on straw. *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara*. 2016. Vol. 15, Issue 3. P. 213–218.

14. Tsyvenkova N., Kukharets S., Kukharets V., Savchenko N. Experimental study of influence of a tuyere belt design on thermal conditions of gasification chamber operation. “*Engineering for Rural Development*” : Proceedings of 19th International Scientific Conference, May 23-24. 2020. Latvia : Jelgava, 2020. P.1248–1254. <http://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2020/Papers/TF302.pdf>

15. Tsyvenkova N., Nezdvetskaya I., Yarosh Ya., Chuba V. Results of laboratory studies of grain drying in fluidized bed dryer. “*Engineering for Rural Development*” : Proceedings of 17th International Scientific Conference, May 23-25. 2018. Latvia : Jelgava, 2018. P. 1644–1652.

16. Yahya M., Fahmi H., Fudholi A., Sopian K. Performance and economic analyses on solar-assisted heat pump fluidised bed dryer integrated with biomass furnace for rice drying. *Solar Energy*. 2018. Vol. 174. P. 1058–1067.

17. Аграрний сектор України у 2005 році / Мельник Ю. Ф. та ін. ; за ред. Ю. Ф. Мельника. К., 2006. 88 с.

18. Алейников В.И. Исследование процесса и разработка режимов сушки зерна пшеницы с предварительным подогревом : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.20.01 / Одесса, 1969. 24 с.

19. Альтернативна енергетика : навч. посібник / М. Д. Мельничук та ін. Київ : Аграр. Медіа Груп, 2011. 612 с.

20. Біологічні ресурси і технології виробництва біопалива ; монографія / Я. Блюм та ін. Київ : «Аграр Медіа Груп», 2010. 408 с.
21. Виробництво і використання генераторного газу з сільськогосподарської рослинної сировини : монографія / Я. Д. Ярош та ін. Житомир : ЖНАЕУ, 2020. 224 с.
22. Гелетуха Г. Г., Железная Т. А. Обзор технологи сжигания соломы с целью выработки тепла и электроэнергии. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 1998. № 6. С. 3–12.
23. Ткаченко С. Й. Співак О. Ю. Сушильні процеси та установки : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2007. 76 с.
24. Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Москва : Пищ. пром-сть, 1973. 528 с.
25. Гришин М. А., Атаназевич В. И., Семенов Ю. Г. Установки для сушки пищевых продуктов : справочник. Москва : Агропромиздат, 1989. 215 с.
26. Гуляев Г. А. Автоматизация процессов послеуборочной обработки и хранения зерна. Москва : Агропромиздат, 1990. 240 с.
27. Дмитрук Є. А. Проблеми зберігання та використання зерна. *Зберігання і переробка зерна*. 1999. № 3. С. 54–57.
28. Есаков В. Г. Двухступенчатая энергосберегающая сушка зерна на предприятиях агропромышленного комплекса : автореф. дис. ... техн. наук : спец. 05.20.01 / Москва, 1986. 17 с.
29. Жемела Г. П., Шемавньов В. І., Олексик О. М. Технологія зберігання і переробки продукції рослинництва. Полтава. 2003. 420 с.
30. Атаманюк В. М. Зовнішній тепло масообмін під час фільтраційного сушіння. *Промислова теплотехніка*. 2006, Т. 28, №5. С. 47–54.
31. Маньківський А. Я., Скалецька Л. Ф., Подпретов Г. І., Сеньків А. М. Технологія зберігання і переробки сільськогосподарської продукції. Ніжин : ВКП «Аспект», 2009. 384 с.
32. Мерко І. Т., Морчун В. О. Наукові основи і технологія переробки зерна : підручник. Одеса : Друк, 2011. 348 с.

33. Мельников С. В., Ацелкин В. Р., Роцин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов. Ленинград : Колос, 1980. 168 с.
34. Плановский А. Н., Рамм В. М., Каган С. З. Процессы и аппараты химической технологии. Москва : Химия, 1968. 847 с.
35. Справочник по качеству зерна / под ред. Г. П. Жемелы. Киев : Урожай, 1988. 3-е изд. 216 с.
36. Стручаєв М. І. Розрахунок термодинамічних процесів у потоку повітря. *Праці ТДАТА*. 2002. Вип. 9. С. 88–92.
37. Стручаєв М. І. Визначення тривалості процесу сушки сінажу. *Праці ТДАТА*. 2015. Вип. 33. С. 46–49.
38. Кіндзера Д. П., Ханик Я. М., Атаманюк В. М. Гідродинамічні особливості при сушінні дисперсних матеріалів у щільному шарі. *Науковий вісник УкрДЛТУ : Збірник наук.-техн. праць*. Львів. 2003, Вип. 13.1. С. 126–133.
39. Токарев Г. Г. Газогенераторные автомобили. Москва : Машгиз, 1955. 207 с.
40. Харченко Є. І., Шаран А. В., Янюк Т. І. Інноваційні технології галузі : Конспект лекцій для студ. спец. 7.05170101, 8.05170101 «Технології зберігання і переробки зерна» денної та заочної форм навчання. К. : НУХТ, 2014. 94 с.
41. Чурсінов Ю. Порівняльний огляд технічних засобів сушіння зерна. *Пропозиція*. 2016. № 1. С. 122–124.
42. Чернобыльский И. И. Тананайко Ю. М. Сушильные установки химической промышленности. Киев : Техника, 1969. 279 с.

ДОДАТКИ

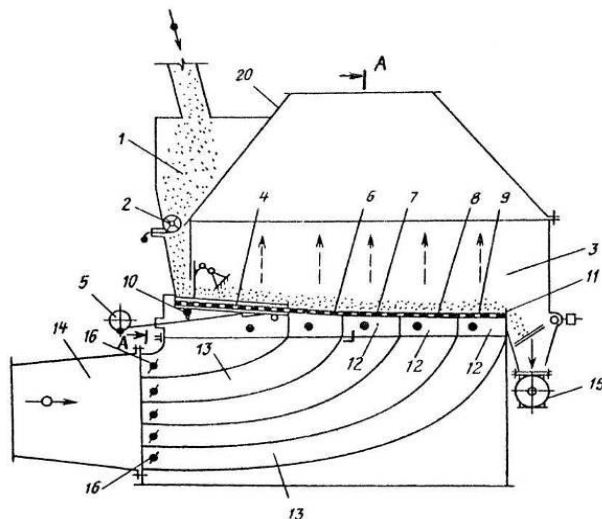


Рис. 1. Зернова сушарка з псевдо-зрідженим шаром для сипких матеріалів [11]

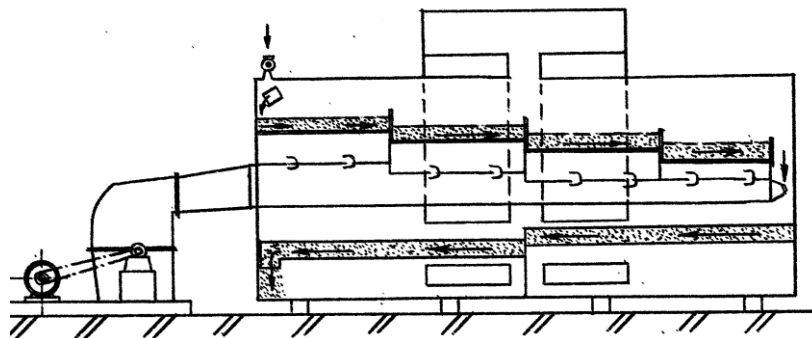


Рис. 2. Установка фірми «Петрі і Мак Наут» з киплячим шаром [12]

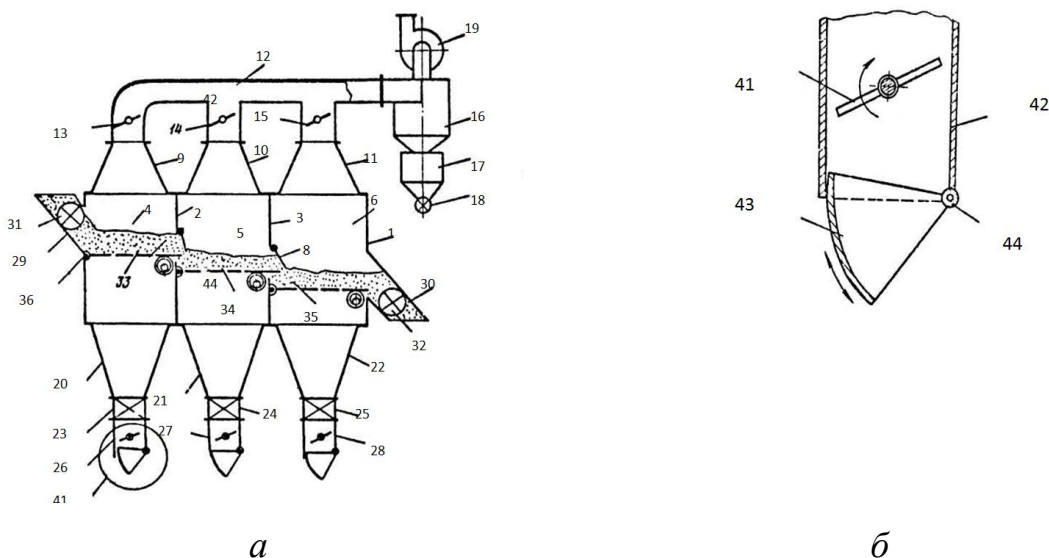


Рис. 3. Установка для сушки зернового матеріалу з пульсатором [13]: *а* –
схема установки; *б* – пульсатор

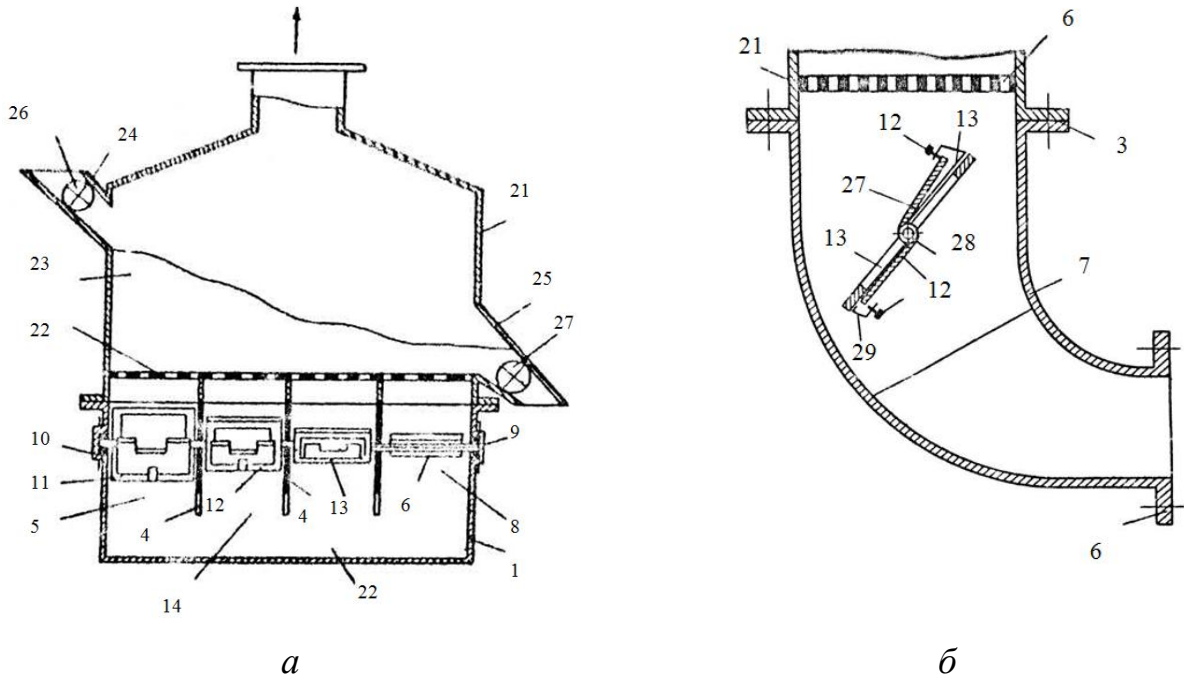


Рис. 4. Установка для сушіння зернового матеріалу [14]: *a* – схема установки; *б* – пульсатор камери киплячого шару

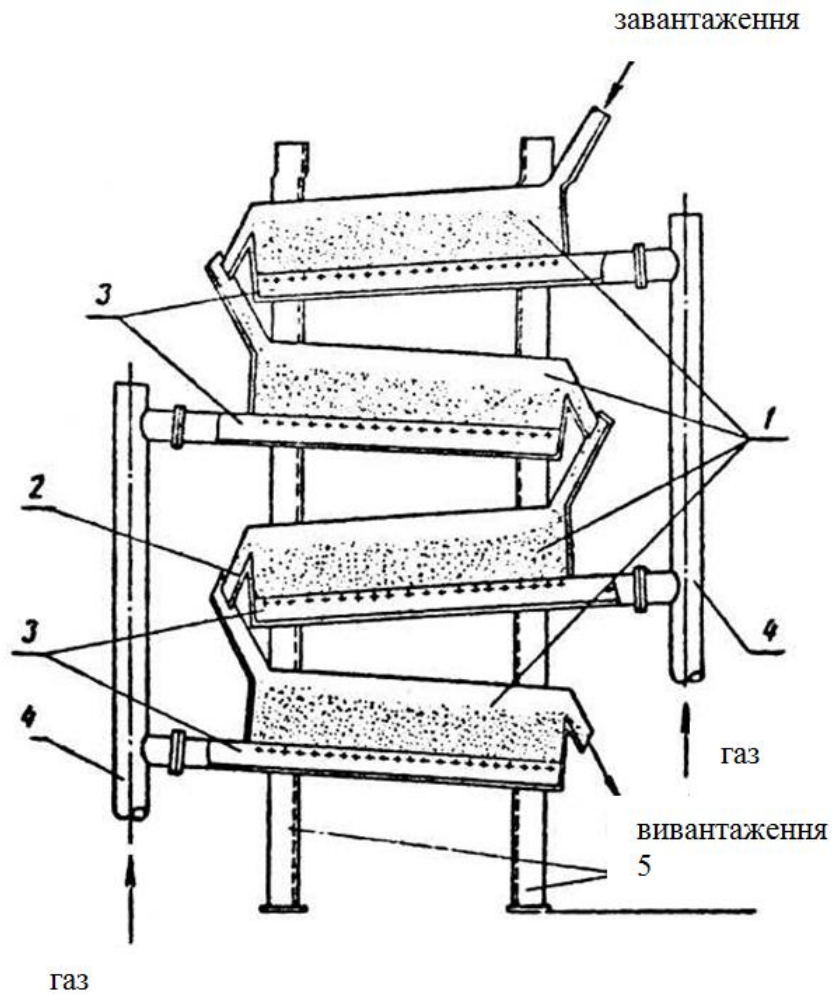


Рис. 5. Лоткова піч для сушіння зерна у псевдо зрідженому шарі [15]

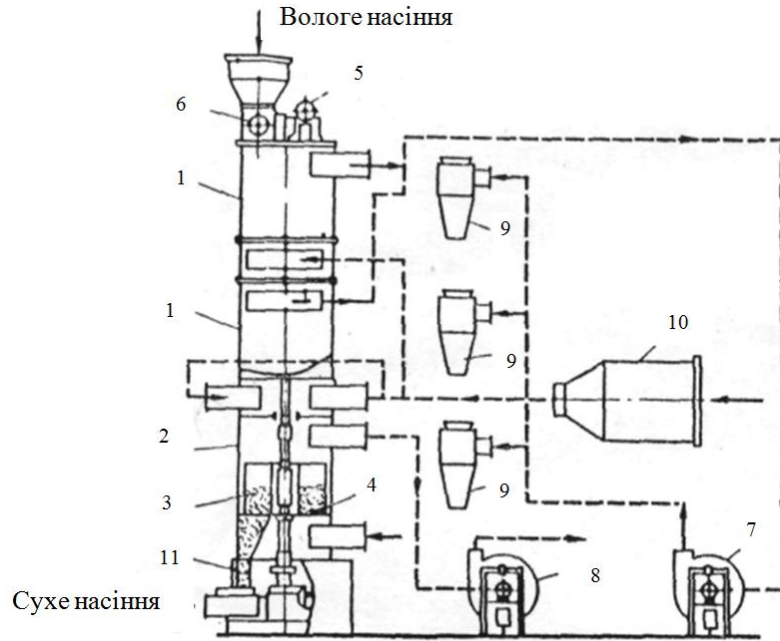


Рис. 6. Схема ротатійної сушарки [16].

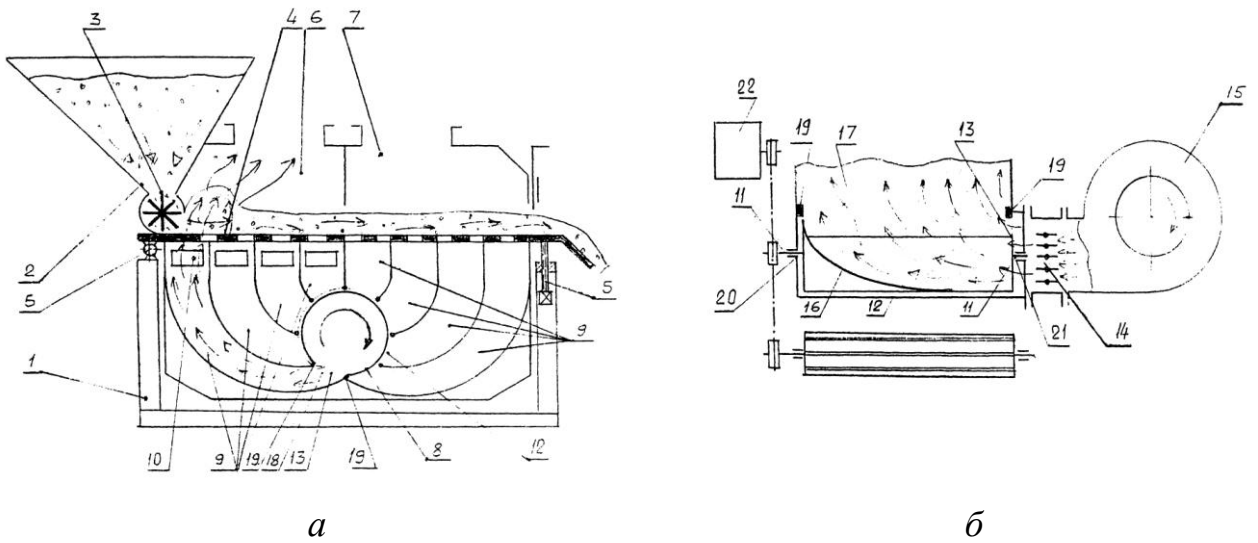


Рис. 7. Сушарка зерна з пульсатором барабанного типу [17]: *а* – схема сушарки; *б* – пульсатор

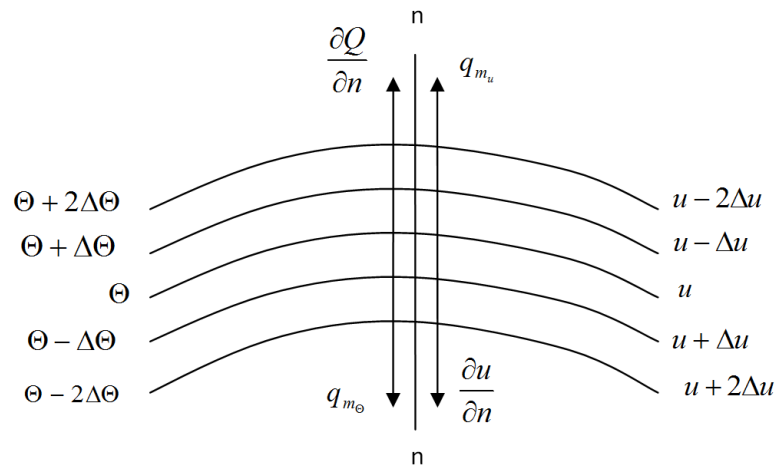


Рис. 1. Розподіл вологовмісту і температури зерна в процесі сушіння

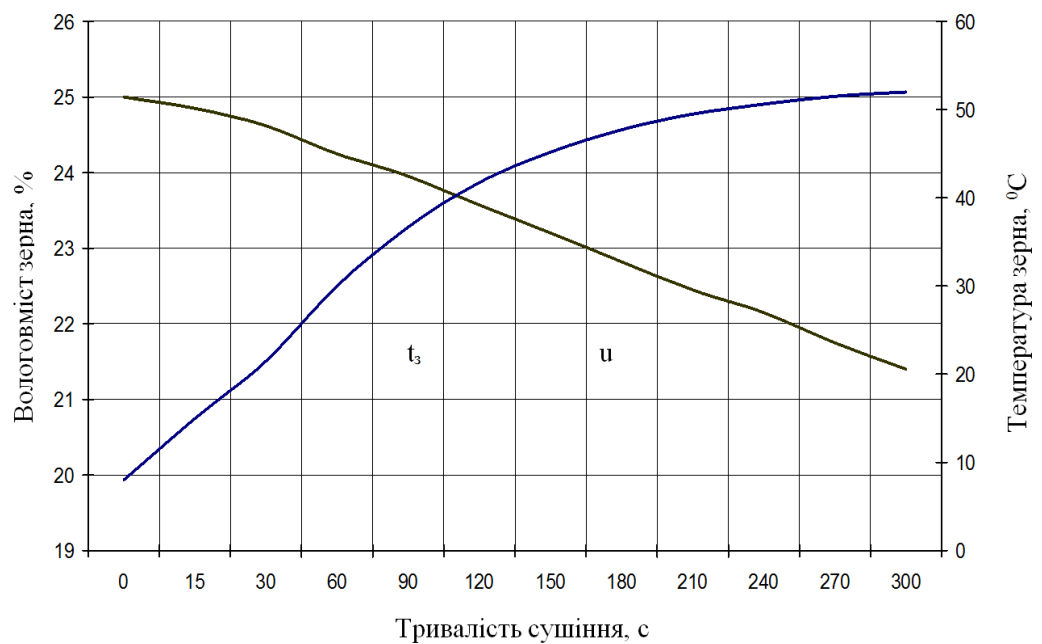


Рис. 2. Залежності вологовмісту (u) і температури зерна (t_3) за умов безперервного сушіння