

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК	4
ВСТУП	6
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ СУШАРОК ...	7
1.1 Конструкції сушарок	7
1.2 Енергозбереження в процесах сушіння	13
РОЗДІЛ 2 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА	18
2.1 Мета та задачі експериментальних досліджень	18
2.2 Гідродинаміка руху дисперсного матеріалу	24
2.3 Опис експериментальної установки	33
2.3.1 Методика проведення експериментальних досліджень	38
2.3.2 Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик	39
2.3.3 Контроль та вимірювання температурно-вологісних характеристик ...	41
2.4 Обробка та обговорення результатів дослідження	42
2.5 Визначення ефективності процесу сушіння	44
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ПРОВЕДЕНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	51
3.1 Ефективність роботи ступенів поличної сушарки	51
3.2 Розроблення нових конструкцій поличних сушарок	53
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ	59
ВИСНОВКИ	70
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ	72

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАК

- A – кінетичний температурний параметр процесу;
- a_m – коефіцієнт теплопровідності, $\text{м}^2/\text{с}$;
- B – кінетичний параметр перенесення вологи;
- b – вологість сушильного агента, $\text{кг}/\text{кг}$;
- c – теплоємність, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{К})$;
- D – коефіцієнт дифузії, $\text{м}^2/\text{с}$;
- d – діаметр, м ;
- E – ефективність сушіння;
- f – площа, м^2 ;
- G – масова витрата, $\text{кг}/\text{с}$;
- g – прискорення вільного падіння, $\text{м}/\text{с}^2$;
- L – довжина, м ;
- Δp – втрати тиску, Па ;
- q, q' – питомий тепловміст сушильного агента та матеріалу, $\text{Дж}/\text{м}^3$;
- Q, Q' – тепловий потік сушильного агента та матеріалу $\text{Дж}/\text{с}$;
- S – поверхня вологоперенесення, м^2 ;
- s – питома поверхня вологоперенесення, $1/\text{м}$;
- t – температура, К ($^{\circ}\text{C}$);
- U – відносна вологість, $\text{кг}/\text{кг}$;
- V – об'ємна витрата, $\text{м}^3/\text{с}$, об'єм, м^3 ;
- W – швидкість, $\text{м}/\text{с}$;
- x – вологість матеріалу, $\text{кг}/\text{кг}$;
- z – питомі втрати тиску по довжині, $\text{Па}/\text{м}$;
- α – коефіцієнт тепловіддачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К})$;
- β – коефіцієнт масовіддачі, $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$;
- γ – кут нахилу полиці до горизонту, градус;
- ε – порізність зваженого шару, доли;
- ζ – коефіцієнт гідродинамічного опору частинки дії газового потоку;

θ', θ – параметр апроксимуючої кривої для матеріалу та повітря;

λ – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);

v – об'єм, м³;

ν – відносний об'єм, долі; кінематичний коефіцієнт в'язкості газового потоку, м²/с;

ρ – густина, кг/м³;

τ – час, с;

φ – коефіцієнт швидкості;

ψ – площа вільного перерізу полиці, %.

ВСТУП

Актуальність роботи. Однією із глобальних світових проблем сьогодення є економія енергоресурсів, залучення в сферу їх виробництва нетрадиційних джерел, впровадження енергозберігаючих технологій. Важливою стадією багатьох технологічних процесів, які застосовують у хімічній, фармацевтичній, деревообробній та багатьох інших галузях промисловості України є сушіння, на яке витрачається значна кількість енергетичних ресурсів. Тільки у хімічній промисловості необхідно сушити близько 200 тис. різноманітних продуктів (з них понад 80% становлять дисперсні матеріали), на які витрачається приблизно 15% видобутого палива та електроенергії. Як свідчить статистика, енергоємність технологічних процесів в Україні є у 3–5 разів вищою, ніж у розвинених країнах. Аналіз наявних літературних джерел показав, що в більшості випадків на процеси сушіння використовується у 2,5–3 рази більше енергії від необхідної для перетворення вологи у пару, що свідчить про недосконалість технології сушіння. В багатьох випадках технологічні режими процесу сушіння та обладнання розраховують на основі емпіричних залежностей, що призводить до значних розбіжностей між прогнозованими параметрами процесу і реальними.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ВІДОМИХ МОДЕЛЕЙ СУШАРОК

1.1 Конструкції сушарок

Найбільш широко в хімічній технології розповсюджений конвективний спосіб сушіння, який передбачає передачу тепла від теплоносія (повітря, інертні та димові гази) до поверхні вологого матеріалу під час його нагрівання.

Одним із способів конвективного сушіння є контакт матеріалу з теплоносієм у стаціонарному, напівзв'язаному або зв'язаному, який може здійснюватись в барабанних сушарках, апаратах з киплячим шаром, пневматичних трубах-сушарках та апаратах інших конструкцій [31, 32].

Сучасне виробництво потребує створення нових енергозберігаючих та ресурсозберігаючих технологій сушіння дисперсних матеріалів з метою отримання продукції високої якості, збільшення питомої потужності виробництва, зменшення габаритів обладнання, підвищення інтенсивності процесу. У зв'язку з цим перед науковцями постає досить актуальна проблема – вдосконалення способів сушіння та створення ефективних сушарок [33].

Хоча енерговитрати під час сушіння конвективним способом не є найнижчими, але за рахунок інших численних переваг для сушіння дисперсних матеріалів найчастіше використовуються саме конвективні сушарки [34, 35]. Забезпечення активного гідродинамічного режиму в сушарках даного типу сприяє інтенсифікації процесу без зниження економічної ефективності їх роботи та має такі переваги [36]:

- гідродинамічна стійкість процесу;
- збільшення відносної швидкості руху взаємодіючих фаз;
- розвинена поверхня взаємодії контактуючих фаз;
- наближення гідродинамічної моделі потоків в апараті до моделі ідеального витіснення;

- зменшення енергоємності процесу та металоємності апаратів.

Вибір типу сушарки визначається, насамперед, її продуктивністю, вартістю енергії та конструкційних матеріалів, безпекою при роботі, надійністю, можливістю контролю технологічних параметрів, надійністю експлуатації і наявністю відповідного транспортного обладнання.

На теперішній час широке застосування отримали більш ефективні сушарки, в яких матеріал висушується у зваженому або псевдозрідженому стані. Цей спосіб має великі переваги над іншими [37–40], наприклад:

- рівномірне нагрівання продукту, який дозволяє застосовувати високі температури сушильного агента;
- інтенсивний рух, близький до ідеального перемішування частинок;
- максимальна поверхня випаровування;
- малий гідравлічний опір шару продукту;
- простота конструкції і зручність експлуатації та інші.

За конструктивними ознаками сушарки зваженого шару поділяють на дві групи: одно- і багатоканерні. Найбільше поширення в застосуванні набули саме одноканерні сушарки.

Аналізом літературних джерел [2,13,41–61] визначено наступну класифікацію сушарок зваженого шару яка представлена в таблиці 1.1. В основу класифікації покладено як конструктивні ознаки обладнання, так і його основні функції (лише цільовий процес зневоднення чи його супроводження додатковими операціями), тип зваженого шару, особливості організації руху сушильного агента тощо.

Таблиця 1.1 – Класифікація сушарок зваженого шару

Функціональна ознака	Обладнання
1. За призначенням:	сушарка; циклонна сушарка; гранулятор-сушарка; сушарка-охолоджувач; сушарка-класифікатор; сушарка-подрібнювач.
2. За типом зваженого шару:	псевдозріджений; пневмотранспорт; віброкиплячий; вихровий; фонтануючий; комбінований.
3. За формою корпусу (камери):	конічний; циліндричний; циліндро-конічний; прямокутний; призматичний.
4. За напрямком руху потоків:	прямотечійний; протитечійний; перехресно-течійний; змішаний.
5. За конструктивними ознаками:	однокамерні; багатокамерні.
6. За типом газорозподільної решітки:	провальні; безпровальні (ковпачкові, двошарові, багат шарові).
7. За характером руху матеріалу:	з направленим рухом матеріалу від місця завантаження до місця розвантаження; без направлено руху матеріалу від місця завантаження до місця розвантаження.
8. За характером циркуляції теплоносія:	з природною циркуляцією; з примусовою циркуляцією.
9. За режимом роботи:	періодичної дії; безперервної дії.
10. За наявністю контактних елементів у робочому об'ємі сушарки:	поличні; ситчасті провальні; спіралеподібні та ін.

Нижче представлено опис основних конструкцій сушарок зваженого шару. Основними перевагами циклонної сушарки [41] є те, що така конструкція апарата дозволяє забезпечити нестационарні умови взаємодії фаз, тим самим

високу інтенсивність тепло- та масопередачі, гарантований час перебування продукту в апараті, достатній для реалізації процесу, компактність сушарки в порівнянні з трубою-сушаркою. Недоліками такої конструкції є те, що їх можна застосовувати лише для добре сипучих матеріалів, у яких відсутні значні адгезійно-когезійні властивості. Матеріали з такими явними властивостями можуть налипати на внутрішню поверхню циклонної камери за рахунок наявності відцентрового поля газосуспензії.

Переваги пневмотранспорної труби-сушарки [13]: наявність активного гідродинамічного режиму в апараті, відсутність відцентрового поля газосуспензії для сушіння матеріалів з явними адгезійно-когезійними властивостями (наприклад, сушіння мінеральних різних солей). Недоліки пневматичних сушарок: великі швидкості руху сушильного агента, а значить і значні затрати енергії; прямоочний рух фаз, який знижує рушійну силу процесу на виході з апарата.

Аерофонтанні сушарки [42] використовують як апарати, які здатні працювати зі значною порізністю шару і з виносом сухого матеріалу.

Переваги вихрових сушарок [41]: простота конструкції, необхідна утримувальна здатність (кількість матеріалу в об'ємі камери), яка визначає час перебування продукту у вихровій камері, низький гідравлічний опір, мала металоємність та габарити сушарки при високій інтенсивності сушіння. У вихровій сушарці-подрібнювачі

[41] відбувається сушіння з одночасною дезагрегацією або подрібненням кускових і агрегованих матеріалів.

Перевагами багатфункціональних апаратів, наприклад, для зневоднення та гранулювання розчинів солей та суспензій деяких хімічних продуктів [2] є те, що при досить невеликих матеріальних витратах вирішується питання отримання продукту у вигляді гранул, оскільки в одному апараті можна поєднати три стадії: упарювання розчину, утворення гранул продукту, сушіння готових гранул, а також подальше їх охолодження.

Одним з напрямів інтенсифікації тепломасообмінних процесів є

використання різного типу збуджень потоків, зокрема, вібрації. Вібросушарка з «киплячим» шаром фірми «Ешер Вісс» (ФРН) характеризується такими перевагами [43]: питома витрата повітря на одиницю площі газороздільної камери менша ніж в сушарках з киплячим шаром, що є важливим при сушінні крупнодисперсних матеріалів, та матеріалів, що погано зріджуються, завдяки віброкиплячому шару досягається більш чітке регулювання середнього часу перебування матеріалу у зоні сушіння, зменшене винесення пилу.

Переваги сушарки з «киплячим» шаром [13]: тривалий час перебування матеріалу в апараті, розвинута поверхня контакту фаз, інтенсивне перемішування вологого матеріалу, що заходить в апарат, з сухим матеріалом, який знаходиться на решітці, простота конструкції.

Різновидом сушарок «киплячого» шару в напрямі вдосконалення конструкції газорозподільного вузла є апарати з рухомими решітками [41]. Переваги сушарки «киплячого» шару з рухомою решіткою: даний апарат використовують для сушіння полімерів, що створюють волокна, які близькі за своїми фізико-механічними властивостями до пастоподібних матеріалів. При цьому рухома решітка виконує роль гранулятора.

Технічне рішення організованого киплячого шару у однокамерній сушарці розробила фірма «Ніро Атомайзер» (Данія) [43]. Перевагою даної сушарки є повна відсутність застійних зон, яких не можна уникнути в камерах прямокутної форми або з зигзагоподібною направляючою перегородкою, сушильна камера більш компактна. Установки такого типу використовують для виробництва полімерних матеріалів, а саме, полівінілхлориду, поліетилену, поліпропілену.

Організація направлено переміщення матеріалу, який висушується у одно- камерних сушарках, полягає у використанні призматичної форми камери. По такій схемі працюють сушарки, які випускають фірми «Бюттнер» (ФРН), «Линк-Белт» (США) [42]. Перевагами сушарок такого типу є те, що за рахунок розширення перерізу камери у верхній її частині, відбувається сепарація частинок різного розміру, більш менші частинки знаходяться у верхній частині

шару, тому менш схильні до перегріву. Також безперервне переміщення частинок вздовж камери забезпечується завдяки нахилу і деякого зменшення ширини решітки у бік вивантаження. Сушарки такого типу застосовують для сушіння вугілля, рудних концентратів, зернових продуктів.

Широке застосування на виробництві набули конвективні сушарки, різні за конструкціями та призначенням. Прикладом сушильної установки, що складається з різних за принципом дії конвективних сушарок, є комбінована аерофонтанна сушарка [41]. Перевагами сушарки є її використання для матеріалів з високим початковим вологовмістом, які мають вільну і зв'язану вологу та яскраво виражені адгезійно-когезійні властивості, простота конструкції. Значне застосування сушарок такого типу набуло у виробництві ряду барвників, полімерних матеріалів, у хіміко-фармацевтичному виробництві.

Перевагами багатокамерної прямокутної сушарки фірми системи «Турбофло» [42] є те, що одночасно в одних камерах сушарки протікає основний процес сушіння, а в інших матеріал досушується за рахунок акумульованого тепла, а потім охолоджується. Дані апарати, що характеризуються невеликою висотою і невисокою вартістю, дають змогу отримувати рівномірний по вологості продукт.

Перевагами багатокамерної сушарки з вертикальним секціонуванням за допомогою ряду полиць, на які натягнуті сітки [42] є ступінчасто-протитечійний рух теплоносія та матеріалу, що висушується, також відбувається одночасний процес сушіння та охолодження продукту. Сушарка призначена для сушіння зерна, а також може бути використана для сушіння хімічних продуктів. Недоліками даної конструкції є значні питомі витрати повітря, так як процес сушіння завершується вже у першій камері, складна конструкція.

Перевагами конічної поличної сушарки-пневмокласифікатора [13] є здатність під час сушіння знепилювати продукт, а при необхідності розділяти його за розміром на два сорти. Верхня частина апарата має конічну форму для

збільшення часу перебування дрібних частинок, що виносяться потоком.

Перевагою поличної пневматичної сушарки-пневмокласифікатора [13] є те, що її корпус складається з двох з'єднаних між собою частин – висхідної та низхідної з метою зменшення висоти апарата. За рахунок такої конструкції, а саме за наявності спільних стінок, зменшується зовнішня поверхня сушарки, а також її металоємність та вартість. Також зменшуються витрати тепла у навколишнє середовище. Недоліком апарата є складна його конструкція.

Аналіз приведених конструкцій сушарок із зваженим шаром показав наявність певних переваг та недоліків їх застосування щодо сушіння матеріалів з різними властивостями. Кожен з виділених типів обладнання характеризується різним ступенем енергетичних і матеріальних витрат та інтенсивністю проведення процесу. Для процесу сушіння у зваженому шарі найбільш перспективними є поличні апарати, які характеризуються вищою інтенсивністю та ефективністю процесу за рахунок реалізації у робочому просторі активного аеродинамічного режиму. Разом з тим ці апарати потребують більш глибокого вивчення як перспективного напрямку організації процесу сушіння дисперсних матеріалів.

1.2 Енергозбереження в процесах сушіння

Кожний із вказаних вище типів обладнання характеризується певними недоліками: барабанні сушарки та апарати з киплячим шаром мають великі габарити та значну енергоємність, пневматичні труби-сушарки не забезпечують необхідний час контакту вологого матеріалу з теплоносієм та характеризуються великою висотою [62]. Перспективним напрямком в удосконаленні сушильного обладнання є створення комбінованих конструкцій апаратів з активним гідродинамічним режимом, під час якого інтенсифікація тепломасообміну досягається з мінімальними енерговитратами на підтримку зваженого шару [63, 64]. Ефективним методом інтенсифікації процесу є організація локальних, протитечійних або комбінованих режимів взаємодії потоку сушильного агенту

з продуктом, а також підбір оптимального способу введення сушильного агента в робочий простір апарата та його вторинне застосування [65, 66].

Конвективне сушіння зв'язане з необхідністю переміщення великих об'ємів сушильного агента. Завдяки цьому виникає велика матеріальна та екологічна проблема – значні втрати теплової енергії з відпрацьованим сушильним агентом, особливо під час сушіння матеріалів з підвищеною вологістю [67, 68]. В результаті ці втрати становлять 70 % від загальних втрат під час сушіння [69]. Виникає необхідність утилізації та повторного використання тепла відпрацьованого сушильного агента [70]. Аналіз літературних даних [71, 72] показав, що енергетичний аналіз сушильної техніки потребує більш ретельного вивчення.

Три групи факторів впливають на ефективність сушіння нагрітим повітрям:

- умови навколишнього середовища;
- вид матеріалу, що піддається сушінню;
- конструкція сушарки і її робота.

Будь-яка модернізація сушарки, що дає змогу підвищити її продуктивність, у тому числі і інтенсифікувати процес, в тій чи іншій мірі сприяє зменшенню витрат палива на сушіння. Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння дисперсних матеріалів, якою слід керуватися під час реконструкції діючих або при розробці нових конструкцій сушарок [73, 74], зображена на рисунку 1.5.

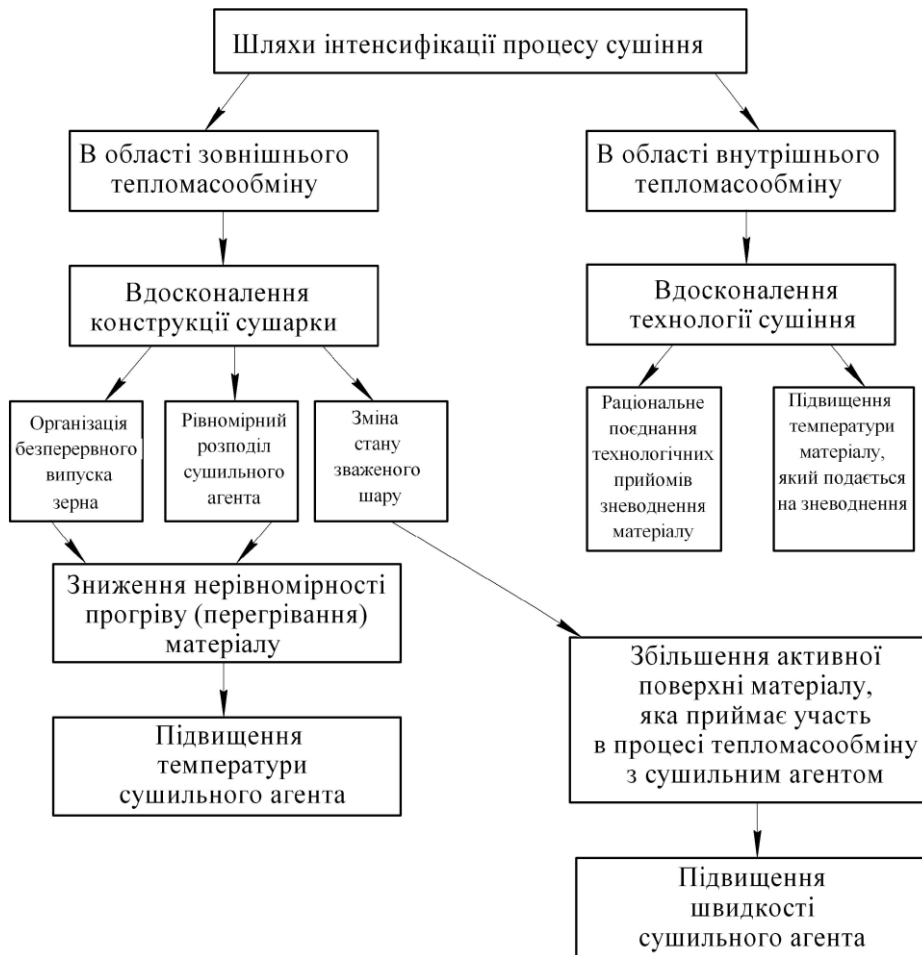


Рисунок 1.5 – Класифікація шляхів інтенсифікації процесу сушіння дисперсних матеріалів

Літературний аналіз автора [38] показав існування таких заходів, щодо зменшення енерговитрат на сушіння дисперсних матеріалів:

Для зменшення витрат теплоти на випар вологи необхідне:

- удосконалення технології сушіння дисперсних матеріалів;
- удосконалення конструкцій сушарок для дисперсних матеріалів;
- автоматизація процесу сушіння.

Для зменшення втрат теплоти із гарячим матеріалом після його сушіння необхідно:

- удосконалення процесу охолодження висушеного дисперсного матеріалу;
- удосконалення конструкції охолоджувача.

Для зменшення втрат теплоти з відпрацьованим сушильним агентом (і

повітрям), необхідно:

- повторне використання теплоти відпрацьованого сушильного агента;
- удосконалення конструкцій сушарок;
- автоматизація процесу сушіння.

Для зменшення втрат теплоти у навколишнє середовище через нагріті поверхні, у тому числі на нагрівання транспортних засобів необхідна:

- установка сушарок у металевому виконанні у теплоізольованих приміщеннях;
- теплоізоляція зовнішніх поверхонь сушильних агрегатів;
- правильний вибір вогнестійких та теплоізоляційних матеріалів;
- використання теплоти зовнішніх поверхонь топків для нагрівання повітря, яке подається у топку. Заміна громіздких топків декількома малогабаритними топками (або теплогенераторами), які безпосередньо прилягають до зон сушіння.

Для зменшення втрат теплоти від неповного згорання палива необхідно:

- контроль і автоматизація процесу згорання палива;
- правильна технічна експлуатація топків (особливо в періоди запуску і ви- ходу на потрібні режими).

Нагальним аспектом для зменшення витрат на процес сушіння є економія електроенергії для проведення процесу. Для зниження витрат електроенергії на сушіння дисперсних матеріалів необхідні заходи, які дозволяють отримати такі результати:

- удосконалення схем сушарок і коефіцієнтів ефективності їх використання;
- впровадження більш удосконаленої технології ре циркуляційної сушарки. Автор роботи [75] в своїх дослідях, які присвячені сушінню насіння кукурудзи, пропонує такі заходи щодо покращення технології процесу та вирішення питань енергозбереження:

- попереднє прогрівання качанів;
- паралельне продування камер;

- диференційований тепловий режим;
- максимально допустима температура;
- реверсування і рециркуляція агента сушіння, в тому числі відпрацьованого. Аналіз результатів дослідів автора показав, що для промислового насінництва слід застосовувати рециркуляцію агента сушіння з періодичною зміною напрямку продування сушильних камер. Цей спосіб дозволяє знизити витрати енергоносіїв на 20–26% порівняно із типовими режимами.

В конвективному сушінні дисперсних матеріалів рекуперацію тепла найбільш доцільно здійснювати такими способами [38]:

- утилізацією фізичного тепла газів, що відходять. Це досягається частковою рециркуляцією цих газів;
- утилізацією фізичного тепла газів, що відходять, з використанням проміжного теплоносія;
- утилізацією фізичного тепла висушеного продукту під дією прямого теплообміну з ним вихідного сушильного агента.

В гравітаційних поличних сушарках за рахунок багаторазового контакту дисперсного матеріалу із сушильним агентом досягається зменшення витрат енергії на одиницю видаленої вологи. Становить інтерес вивчення ефективності видалення вологи на кожному зі ступенів сушарки при різних початкових характеристиках сушильного агента і організації його руху та конструкції поличних контактів.

РОЗДІЛ 2

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА ЧАСТИНА

2.1 Мета та задачі експериментальних досліджень

Задача експериментальних досліджень полягла у встановленні впливу технологічних (витрата, швидкість руху газового потоку) та конструктивних (геометричних розмірів, конфігурації окремих елементів пристрою) параметрів на гідродинаміку потоків у робочому просторі поличної сушарки та кінетику видалення вологи з дисперсного матеріалу.

Специфічний аеродинамічний режим сушіння в поличних апаратах характеризується підвищенням локальних чисел Рейнольдса в місцях перфорації та розвантаження полиць. В прийнятій моделі простір між полицями розглядається як окремий тепломасообмінний ступінь. Слід відмітити, що на кожній з полиць в такому каскаді створюється досить ефективно перемішування з усіма перевагами протитечійного режиму.

Для проведення експериментальних досліджень використано набір поличних контактів різної довжини, які забезпечують регулювання кута їх встановлення в межах 0–45 градусів до горизонту. При цьому значення зазору між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор) може змінюватись до 0,5 довжини апарата. Поличні контакти мають різне значення площі вільного перерізу, яка має значення $\psi = 15\%$; 20% ; 25% ; 30% . В експериментальному зразку поличної сушарки встановлюється набір контактів; при цьому всі вони або мають одну конструкцію, або відрізняються довжиною і значенням вільного перерізу [145].

Під час проведення серії досліджень із кожним набором поличних контактів визначено поле швидкості руху газового потоку, траєкторію і час перебування дисперсного матеріалу в поличній сушарці.

На підставі заміру швидкості руху газового потоку та дослідження руху «мічених» частинок визначені характерні зони розподілення потоків і оцінена

рівномірність створення зваженого шару.

Для вивчення кінетики процесу видалення вологи з дисперсного матеріалу попередньо зволожений та нагрітий до визначених параметрів дисперсний матеріал подається на верхню полицю сушарки, проходить кожен зі ступенів, контактуючи з висхідним потоком повітря, який має визначену температуру і вологість. На кожному зі ступенів проводиться замір вологи і температури дисперсного матеріалу і сушильного агента.

Витрата сушильного агента складає 24,6–48 м³/год (31,7–62 кг/год), витрата матеріалу – 12–15 кг/год. Модельні матеріали – поліпропілен ($d_q = 3–3,5$ мм), аміачна селітра ($d_q = 2–2,5$ мм), суміш цих матеріалів (від 20 до 30 % аміачної селітри, залишок – поліпропілен).

Якісна картина розподілення швидкості руху газового потоку в надполичному просторі і розвантажувальному зазорі має вигляд, представлений на рисунку 2.1 а.

Довжина зони I визначається довжиною поличного контакту та кутом його встановлення. Закон розподілення швидкості в цій зоні залежить від величини вільного перерізу полиці, її довжини, кута її встановлення і витрат газового потоку. Довжина зони II визначається величиною розвантажувального зазору, закон розподілення швидкості в ній залежить від конструкції поличного контакту та витрат газового потоку [93].

Основні конструктивні розміри поличної сушарки наведено на рисунку 4.1 б.

Нижче проводиться аналіз епюр розподілення газового потоку по довжині апарата в надполичному просторі і розвантажувальному зазорі залежно від конструктивних параметрів поличного контакту (величини розвантажувального зазору, висоти та кута встановлення, вільного перерізу) та витрат газового потоку (в подальшому відношення довжини розвантажувального зазору L_{pz} до довжини апарата L_a буде позначено як величина X/L).

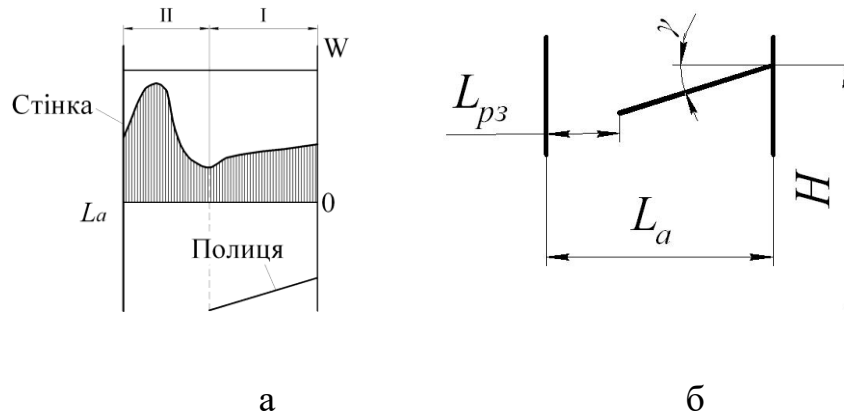


Рисунок 2.1 – Схема ступеню полицної сушарки: а – еюра розподілення швидкості руху газового потоку; б – конструктивна схема: L_{pz} – довжина розвантажувального зазору, L_a – довжина апарата, γ – кут нахилу полиці, H – висота розташування полиці

Витрата газового потоку при проведенні експериментальних досліджень гідродинаміки руху однофазного потоку складає $24,6 \text{ м}^3/\text{год}$ (окрім дослідження впливу витрати газового потоку на поле його швидкості в над полицному просторі).

При встановленні полицних контактів з різним розвантажувальним зазором еюра розподілення швидкості руху газового потоку (рисунок 2.2) має такі особливості:

- розподілення швидкості руху газового потоку має низхідний характер від стінки апарата до кінця полицного контакту. Це обумовлено різним перепадом по довжині тисків під полицним контактом і над ним;
- при зменшенні величини X/L , починаючи з середини полицного контакту, відбувається інтенсивне зниження швидкості руху газового потоку, яке обумовлене створенням вихрів в розвантажувальному зазорі. Зменшення величини розвантажувального зазору призводить до збільшення інтенсивності вихрів на кінці полицного контакту, який порушує висхідний рух газового потоку;
- значення мінімуму швидкості руху газового потоку на полицному контакті тим більше, чим менша величина розвантажувального зазору.

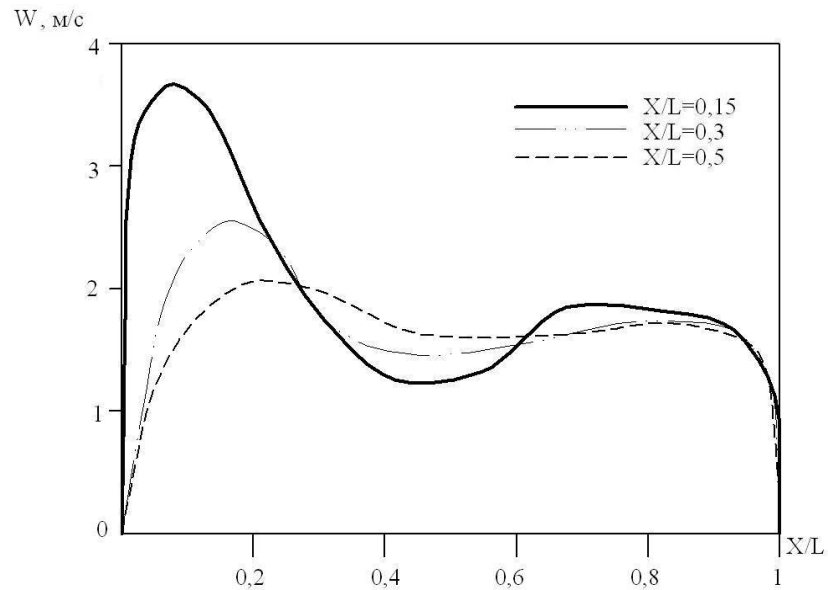


Рисунок 2.2 – Епюра розподілення швидкості руху газового потоку по довжині апарата залежно від величині зазору X/L при висоті встановлення полицного контакту $H = 0,25$ м, величині вільного перерізу полицного контакту $\psi = 15$ % та кута нахилу полицного контакту $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$

Характер розподілу швидкості газового потоку на ступені полицної сушарки при інших умовах проведення експериментальних досліджень (конструктивне виконання полиці і витрата газового потоку) якісно не змінюється. Особливості розподілу поля швидкості газового потоку залежно від початкових умов проведення експерименту наведено нижче.

Аналіз результатів експерименту стосовно розподілення швидкості руху газового потоку на різних ступенях сушарки залежно від висоти їх встановлення при однаковому конструктивному виконанні кожного ступеня показав, що:

- розподілення швидкості руху газового потоку стає більш рівномірним зі збільшенням значення розвантажувального зазору;
- епюра швидкості руху газового потоку для полицного контакту однієї конструкції кількісно змінює свій профіль. Це пояснюється перерозподілом газового потоку по перерізу сушарки за висотою, причому з висотою він стає більш рівномірним.

При встановленні в об'ємі сушарки поличного контакту з різним значенням величини вільного перерізу (збільшення величини вільного перерізу) спостерігається така картина:

- частково вирівнюється профіль швидкості руху газового потоку на поличному контакті;
- спостерігається зменшення піку швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі;
- епюра швидкості руху газового потоку в місці переходу від поличного контакту до розвантажувального зазору має більш плавний характер.

Зменшення кута встановлення поличного контакту при постійному значенні зазору X/L вносить свої особливості в епюру розподілення швидкості руху газового потоку:

- відбувається зменшення піку швидкості руху газового потоку на полиці, епюра вирівнюється;
- пік швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі зменшується;
- зона максимальної швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі розширюється з вирівнюванням епюри.

Епюра розподілення швидкості руху газового потоку зі збільшенням його витрати має однаковий якісний закон, але характеризується такими відмінними рисами:

- згладжування піку в середині поличного контакту;
- вирівнювання швидкості по довжині поличного контакту;
- пік швидкості руху газового потоку в розвантажувальному зазорі має більш яскраво виражений характер.

Епюри розподілу швидкості руху газового потоку дають можливість визначити зони гравітаційного руху дисперсного матеріалу, його витання в апараті, сепарації та можливого винесення. Для повного опису гідродинаміки руху дисперсного матеріалу, визначення траєкторії його руху та часу

перебування в об'ємі сушарки та впливу на ці параметри конструкції поличного контакту та витрати газового потоку необхідно дослідити основні режими переміщення дисперсного матеріалу.

При експериментальному вивченні гідродинамічних умов руху газового потоку в сушарці виявлено, що газовий потік частково огинає поличний контакт і частково проходить крізь його отвори. Ці результати корелюються з математичним описом зміни швидкості руху газового потоку по довжині полиці.

Спостерігається огинання полиці газовим потоком, проходження газу через отвори і через розвантажувальний зазор (рисунок 2.3). Віддаляючись від стінки (початок полиці) траєкторія руху газового потоку викривляється і все виразніше починає проходити під полицею.

Результати експериментальних досліджень корелюються з даними комп'ютерного моделювання (рисунок 2.3 в) [146, 147].

При однаковому значенні площі живого перерізу полиці, але різному діаметрі і кількості отворів огинання її газовим потоком відбувається по-різному:

- при меншому діаметрі і більшій кількості отворів огинання газовим потоком полки спостерігається чітко;
- при збільшенні діаметра отворів і зменшення їх кількості огинання газовим потоком полиці стає менш помітним, і газ переважно проходить через отвори, в меншій мірі огинаючи полицю.

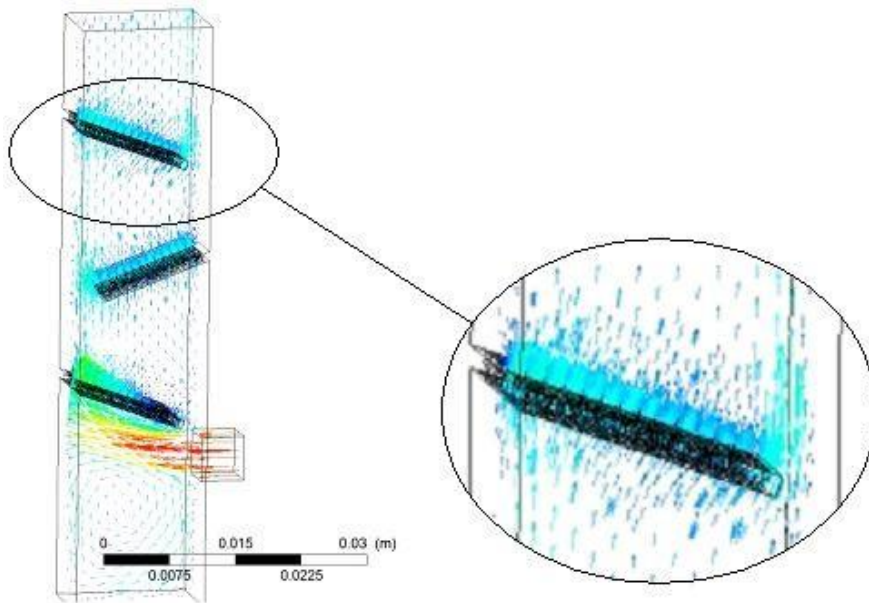


Рисунок 2.3 – Дослідження траєкторії руху газового потоку в межах контактної ступені: результати комп’ютерного моделювання (програмний продукт ANSYS)

2.2 Гідродинаміка руху дисперсного матеріалу

При проведенні експериментальних досліджень руху дисперсного матеріалу в поличній сушарці, крім зазначеного вище, стає можливим додатково визначити вплив руху пакетів частинок один на одного (зони зіткнення пакетів, вихроутворення руху дисперсного матеріалу з більшою чи меншою інтенсивністю і т.п.). Модельний матеріал: 75 % поліпропілену ($d_q = 3\text{--}3,5$ мм, $x = 1,7$ %) та 25 % аміачної селітри ($d_q = 2\text{--}2,5$ мм, $x = 0,2$ %).

Основні режими руху дисперсного матеріалу, визначені за результатами експериментальних досліджень:

1. Режим гравітаційного падаючого шару (рисунок 2.4). Цей режим досліджено при витраті сушильного агента $24,6$ м³/год і дисперсного матеріалу 12 кг/год.



Рисунок 2.4 – Робота сушарки у режимі гравітаційного падаючого шару дисперсного матеріалу

Дисперсний матеріал рухається по поверхні полиці за рахунок сили інерції, яка зумовлена передачею йому імпульсу при завантаженні з патрубку чи при переході з попередньої полки, та сили скочування по похилій поверхні. При цьому дія сили висхідного потоку сушильного агента не чинить значного впливу на режим руху дисперсного матеріалу. В такому режимі швидкість газового потоку менше значення першої критичної швидкості газового потоку, яка відповідає режиму зваження.

2. Перший перехідний режим (рисунок 2.5): витрата сушильного агента $30 \text{ м}^3/\text{год}$, дисперсного матеріалу – $12 \text{ кг}/\text{год}$.

Дія сили висхідного потоку сушильного агента в даному режимі призводить до поступової зміни траєкторії його руху з поступальної до поступально-пульсаційної у напрямку розвантажувального зазору. При цьому дисперсний матеріал починає переходити у зважений стан, значення сили інерції компенсується силою висхідного потоку сушильного агента, поступальний напрям руху обумовлений лише силою скочування по похилій поверхні. В такому режимі швидкість газового потоку наближається до значення першої критичної швидкості газового потоку.



Рисунок 2.5 – Перший перехідний режим роботи сушарки

3. Режим зваженого шару (рисунок 2.6): витрата сушильного агента 33–45 м³/год, дисперсного матеріалу – 12–15 кг/год. Дія сили висхідного потоку теплоносія в такому режимі призводить до створення стабільного зваженого шару за рахунок компенсації сили інерції та сили скочування по похилій поверхні. Швидкість газового потоку досягає значення першої критичної та в подальшому підвищується і знаходиться в діапазоні робочої швидкості.

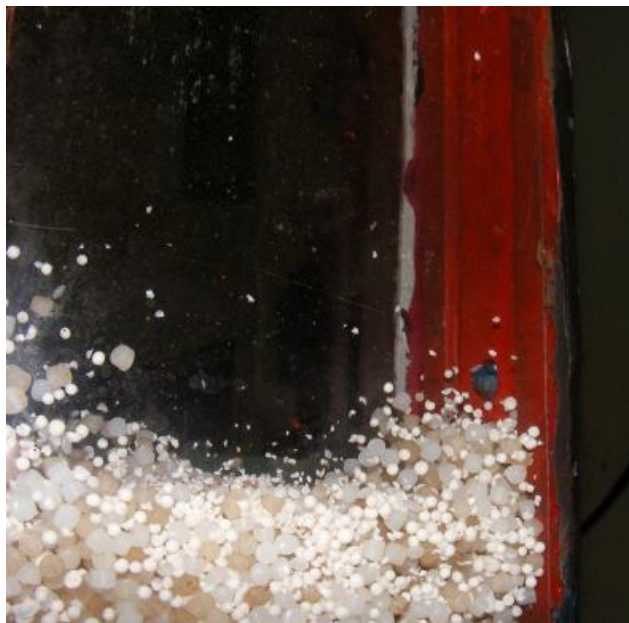


Рисунок 2.6 – Робота сушарки у режимі зваженого шару дисперсного матеріалу

В такому режимі на контактній полиці сушарки і в розвантажувальному зазорі виникає декілька характерних зон (рисунок 2.7). В зоні створення зваженого шару

1 рух дисперсного матеріалу відбувається за рахунок його поступально-пульсаційного переміщення до розвантажувального зазору; в зоні пониження інтенсивності зваженого шару 2 за рахунок зменшення швидкості руху сушильного агента внаслідок зменшення перепаду тиску по довжині полиці дисперсний матеріал втрачає частину вертикального переміщення вздовж вісі пристрою.

По мірі переміщення до кінця полиці дисперсний матеріал поступово проходить зони створення вихору 3, яка утворюється при огинанні сушильним агентом полиці, зону підвищеної швидкості руху над розвантажувальним зазором 4 і відводиться з полиці через зону 6. За умови сушіння полідисперсного дисперсного матеріалу дрібна фракція визначеного розрахунками розміру сепарується в зоні 5.



Рисунок 2.7 – Характерні зони руху дисперсного матеріалу в гравітаційному поличному апараті: 1 – зона створення зваженого шару на полиці; 2 – зона пониження інтенсивності зваженого шару; 3 – зона створення вихору; 4 – зона підвищеної швидкості руху дисперсного матеріалу над розвантажувальним зазором; 5 – зона сепарації дрібного дисперсного матеріалу; 6 – зона вивантаження дисперсного матеріалу з полиці

4 Другий перехідний режим (рисунок 2.8): витрата сушильного агента 36–47,3 м³/год, дисперсного матеріалу – 12–13,5 кг/год. Цей режим характеризується переважною дією на дисперсний матеріал сили висхідного потоку, збільшенням вертикальної складової його переміщення; при цьому частина дисперсного матеріалу починає виноситись з поверхні полиці до надходження в розвантажувальний зазор.



Рисунок 2.8 – Другий перехідний режим роботи сушарки

5 Режим винесення дисперсного матеріалу (рисунок 2.9): витрата сушильного агента 48 м³/год, дисперсного матеріалу – 12 кг/год. Він характеризується збільшенням вертикальної складової і винесенням дисперсного матеріалу товарної фракції з меж контактної полиці без переміщення на наступний ступінь сушарки. В цьому режимі сила висхідного руху сушильного агента значно перевищує суму сил інерції та скочування по похилій поверхні, які обумовлюють поступальний рух дисперсного матеріалу вздовж полиці. Швидкість газу у досліджуваному режимі досягає значення швидкості винесення частинок даного розміру з апарата.



Рисунок 2.9 – Робота сушарки у режимі винесення дисперсного матеріалу

Розглянемо особливості гідродинаміки двофазного потоку при русі його по полиці, в розвантажувальному зазорі, місці вивантаження в умовах зміни конструктивного оформлення полиці [148].

Полідисперсний матеріал після виходу із завантажувального патрубку рухається по першій третині полиці за рахунок інерції, яку він одержав при подачі в робочий простір апарата. При наближенні до центру полиці частинки створюють зважений шар внаслідок зменшення сили інерції та збільшення впливу висхідного потоку сушильного агента на їх рух. При цьому починається процес сепарації дрібних частинок, який продовжується по мірі переміщення частинок по полиці до розвантажувального пристрою.

Значення швидкості газового потоку досягає другої критичної, яка відповідає винесенню частинок заданого розміру з апарата. В зазорі між полицею та стінкою апарата відбувається остаточне відділення дрібної фракції від товарної за рахунок різкого збільшення швидкості руху сушильного агента, обумовленого зменшенням вільного перерізу його проходу. По мірі збільшення витрати сушильного агента сепарація дрібних частинок починається ближче до місця їх введення в апарат внаслідок збільшення ступеню впливу висхідного газового потоку і зменшення сили інерції частинки. Після відділення від дрібної фракції частинки товарного розміру переміщуються на наступний щабель сушарки.

Встановлення полиці під кутом $\gamma = 25^\circ$, меншим, ніж кут природного відкосу матеріалу, який дорівнює $\gamma_0 = 34\text{--}37^\circ$ [149] призводить до того, що частинки переміщуються по полиці нерівномірно, нижні та верхні шари частинок затримуються на поверхні полиці різний час, що призводить до різниці в часі контакту з сушильним агентом та можливого перегріву чи недогріву матеріалу. Рух частинок по полиці відбувається, як за рахунок сил інерції, яку вони одержують на початку полиці (введення матеріалу чи пересипання його на наступну полицю), так і завдяки дії висхідного потоку сушильного агента. При цьому частинки, які одержали більшу інерцію, можуть проскочити поверхню полиці, що зменшує інтенсивність їх контакту з сушильним агентом. Залежно від навантаження по сушильному агенту частинки переміщуються по поверхні полиці з різною швидкістю. При мінімальному навантаженні по сушильному агенту $24,6 \text{ м}^3/\text{год}$ невелика швидкість переміщення може призвести до перегріву і руйнування частинок, що є небажаним. При робочому навантаженні по сушильному агенту $35,4 \text{ м}^3/\text{год}$ (діапазон існування стійкого розвиненого зваженого шару) частинки починають не переміщуватись поверхнею полиці, а виноситись з неї в режимі пневмотранспорту. При такому варіанті встановлення полиці вихроутворення майже відсутнє.

При встановленні полиці в діапазоні кута природного відкосу матеріалу $\gamma = 34\text{--}37^\circ$ рух частинок по довжині полиці становиться рівномірним, спостерігається однорідність перемішування частинок. В цьому випадку висхідний потік сушильного агента сприяє вирівнюванню необхідного часу перебування частинки на полиці. При мінімальному навантаженні по сушильному агенту $24,6 \text{ м}^3/\text{год}$ відбувається поступове переміщення частинки до краю полиці та рівномірний провал на наступну ступінь. При робочому навантаженні по сушильному агенту $35,4 \text{ м}^3/\text{год}$ частинки інтенсивно рухаються в напрямку зони вивантаження, сила їх інерції після надходження на полицю зменшується завдяки дії висхідного потоку сушильного агента, що збільшує час перебування матеріалу на полиці. Інтенсивність вихроутворення на кінці

полиці невелика та не чинить значного впливу на рівномірність руху сушильного агента.

По мірі збільшення кута нахилу полиці за діапазон кута природного відкосу (до максимального значення, яке дорівнює $\gamma = \gamma_0 + (15-17)^\circ$) на полиці відбувається поступове збільшення швидкості руху частинок. При цьому сила інерції частинки все менше компенсується дією висхідного потоку сушильного агента, збільшується вплив сили тяжіння. На полиці внаслідок зменшення часу перебування частинок відбувається нерівномірне і недостатнє їх нагрівання, структура зваженого шару порушується, зміна витрати сушильного агента впливає лише на інтенсивність сепарації дрібної фази. При такому куті нахилу полиці збільшується вихроутворення на її кінці, створюється зона зниженого тиску, що негативно впливає на рівномірність руху сушильного агента.

При значенні зазору між полицею та стінкою апарата в межах 0,5 довжини апарата і більше, частинки на ній фактично не затримуються, час їх перебування є мінімальним і вони швидко переміщуються на наступний ступінь сушарки. Це пов'язано з тим, що частинки мають початкову силу інерції, надану їм при надходженні на полицю. Цієї сили достатньо, щоб чинити опір тертю о полиці та висхідному потоку сушильного агента. Сушильний агент в такому разі сприяє сепарації дрібних частинок і контактує з матеріалом досить короткий проміжок часу, але за рахунок того, що інтенсивність видалення вологи з матеріалу в початковий момент сушіння найбільша, то сушильний агент повністю виконує свою функцію. Пік швидкості руху потоку сушильного агента в зазорі між кінцем полиці та стінкою апарата має значення, яке дещо перевищує швидкість його руху над перфорованою полицею. Утворення вихрового потоку сушильного агента при огинанні ним кінця полиці майже не спостерігається, що забезпечує постійний перепад тисків ці майже не спостерігається, що забезпечує постійний перепад тисків і рівномірність розподілу епюри швидкості по довжині полиці.

Зменшення зазору до величини 0,25–0,35 довжини апарата (подовження полиці) крім збільшення часу перебування матеріалу в сушарці (за рахунок

гальмування частинок з початковою інерцією висхідним потоком сушильного агента) сприяє створенню рівномірного його шару по всій довжині полиці. У цьому випадку під дією сушильного агента проходить не лише сепарація дрібної фракції, але й достатнє за тривалістю нагрівання матеріалу.

Пік швидкості руху потоку сушильного агента в зазорі між кінцем полиці та стінкою апарата збільшується внаслідок зменшення площі його проходу. Утворення вихрів сушильного агента стає більш помітним, що призводить до збільшення перепаду тиску, який дещо знижує швидкість його руху в останній чверті полиці. Таким чином, на полиці утворюється дві зони: зона постійної швидкості і зона спадаючої швидкості руху сушильного агента, різниця між якими незначна.

Зменшення зазору до величини 0,15–0,2 довжини апарата крім зазначених вище переваг призводить до недоліку, а саме утворення вихрів в розвантажувальному просторі в районі кінця полиці. Останнє призводить до зменшення перепаду тиску над полицею і під нею. При цьому дві утворені зони на полиці мають більш виражений характер та перепад швидкостей. Уникнути його можливо шляхом зміни перфорації полиць (зміна за довжиною діаметра і числа отворів полиці).

Характер розподілу швидкостей газового потоку на кожному зі ступенів полицної сушарки якісно має один і той же вигляд, а кількісно дещо змінюється при переході на розташований вище ступінь. Зважаючи на постійність витрати сушильного агента в кожному з перерізів сушарки повинна виконуватись умова постійності інтегральної швидкості по площі незмінного перерізу.

По мірі переміщення сушильного агента по висоті сушарки відбувається його поступовий перерозподіл по перерізу міжполичного простору. На кожному розташованому вище ступені створюються умови для рівномірного проходження сушильного агента крізь полиці та в розвантажувальний зазор. При цьому пік швидкості у розвантажувальному зазорі зменшується (максимум піку залишається постійним по поточній координаті ширини апарата), що компенсується збільшенням швидкості сушильного агента над полицею.

В зоні введення сушильного агента та вивантаження гранул за рахунок різкої зміни траєкторії руху газового потоку та наявності полиці дисперсна фаза втягується в обертальний рух в нижній частині сушарки. Інтенсивність вихроутворення тим більша, чим ближче до місця введення газового потоку розташована полиця.

Одержані результати дозволяють визначити загальний час перебування частинки в робочому просторі сушарки залежно від кількості ступенів контакту з сушильним агентом та конструкції полиці [150].

2.3 Опис експериментальної установки

Для проведення експериментів з дослідження гідродинамічних режимних і конструктивних параметрів процесу сушіння у зваженому шарі було спроектовано та виготовлено експериментальну сушильну установку [93], схему якої наведено на рисунку 2.10. Модель установки, її монтажне креслення та фотографія експериментального стенду наведено на рисунку 2.11.

Принцип дії установки такий.

Повітря з навколишнього середовища через забірник засмоктується за рахунок створюваного розрідження вентилятором В (модель ВВД-3) та подається до електрокалорифера К, де відбувається його нагрівання до температури, передбаченої для сушіння дисперсних матеріалів. За рахунок енергії, що отримана повітрям при проходженні повітродувки, теплоносій по трубопроводу надходить до робочого простору полицної сушарки С і активно контактує з шаром матеріалу, який рухається протитечійно. Вологий дисперсний матеріал із початковою вологістю та температурою подають з бункера Є₁ через штуцер у верхню частину апарата. Висушений матеріал вивантажується через нижній штуцер в бункер Є₂ зберігання готового продукту. Відпрацьований сушильний агент поступає на очищення в циклон Ц для забезпечення рециркуляції (рециркуляційний потік на схемі не показано).

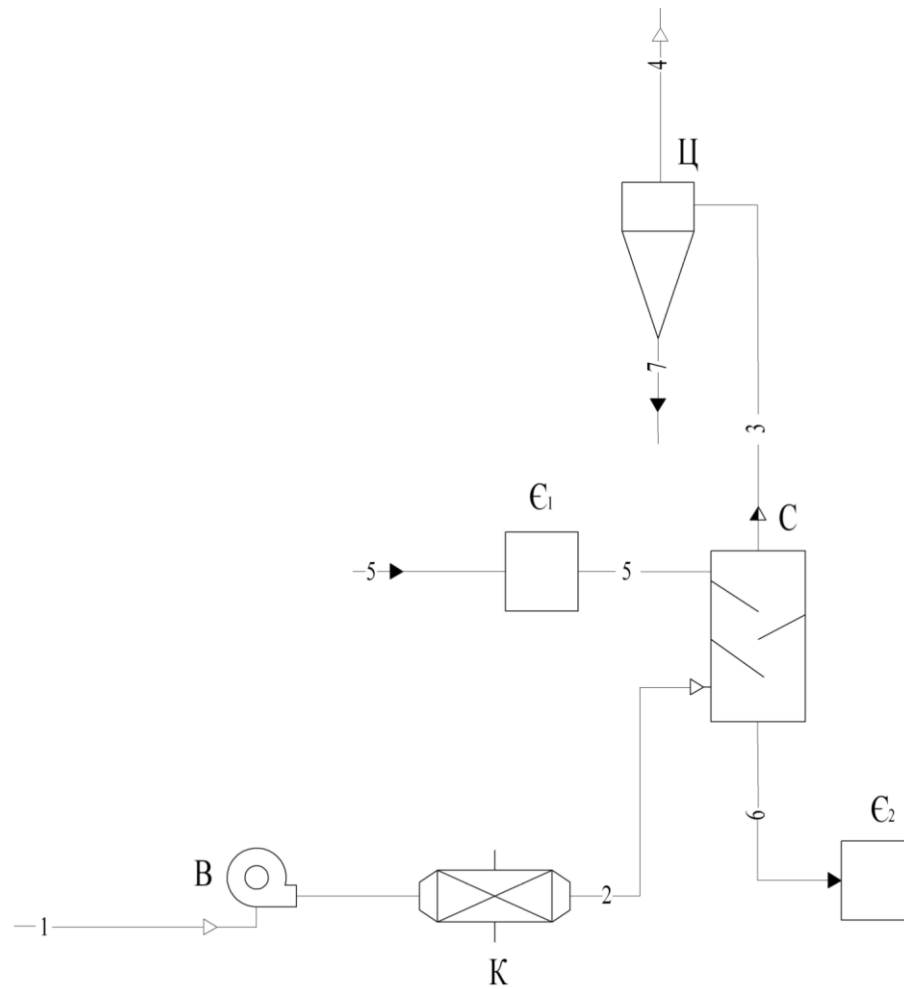
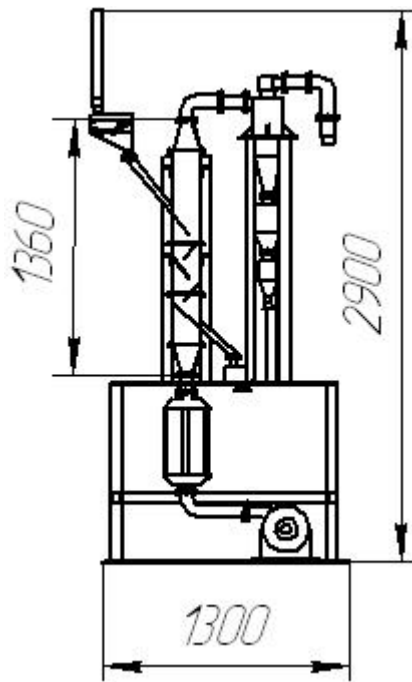


Рисунок 2.10 – Принципова схема експериментальної установки для дослідження гідродинаміки та кінетики процесу сушіння в гравітаційних поличних апаратах: В – вентилятор; К – калорифер; С – гравітаційна полична сушарка; Ц – циклон; Є₁ – ємність для вологого дисперсного матеріалу; Є₂ – ємність для висушеного дисперсного матеріалу; 1 – атмосферне повітря; 2 – нагріте атмосферне повітря; 3 – відпрацьоване повітря; 4 – очищене відпрацьоване повітря; 5 – вологий дисперсний матеріал; 6 – висушений дисперсний матеріал; 7 – дрібнодисперсний матеріал



а



б

Рисунок 2.11 – Експериментальна установка для дослідження гідродинаміки та кінетики процесу сушіння в гравітаційних поличних апаратах:

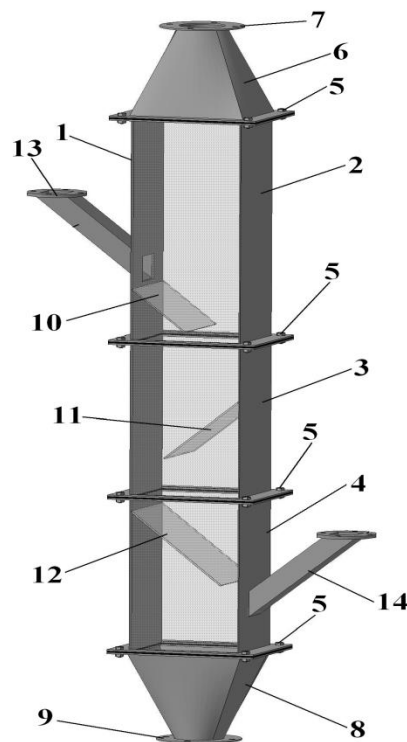


Рисунок 2.12 – Експериментальний зразок гравітаційної поличної сушарки:

Сушарка складається з корпусу 1 прямокутної форми перерізом 100x50 мм і робочою висотою біля 1 м, що містить окремі царги 2,3,4 – верхню, середню і нижню відповідно, які з'єднані між собою за допомогою кріпильних елементів 5. До верхньої царги 2 за допомогою кріпильних елементів 5 приєднана конічна царга 6, яка обладнана патрубком 7 відводу сушильного агента. До нижньої царги 4 за допомогою кріпильних елементів 5 приєднана конічна царга 8, яка обладнана патрубком 9 відводу висушеного матеріалу. Всередині корпусу 1 нерухомо закріплені щонайменше три похилі контактні полиці 10, 11, 12, верхня, середня і нижня відповідно з однаковим кутом нахилу, який на 10–15° перевищує величину кута природного відкосу матеріалу. Верхня похила контактна полиця 10 встановлена у верхній царзі 2 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,5 ширини корпусу 1. Середня похила контактна полиця 11 встановлена у середній царзі 3 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,3 ширини корпусу 1. Нижня похила контактна полиця 12 встановлена у нижній царзі 4 з зазором в горизонтальній площині між вільним кінцем полиці та стінкою корпусу 1, який дорівнює 0,15 ширини корпусу 1. Пристрій також облаштований прямокутним патрубком 13 для введення матеріалу, який буде висушуватись, і прямокутним патрубком 14 для введення сушильного агента.

Сушарка працює наступним чином.

В нижню царгу 4 через прямокутний патрубок 14 до корпусу 1 пристрою підводиться сушильний агент, який завдяки розташуванню прямокутного патрубка 14 спочатку рівномірно розподіляється по перерізу корпусу 1, а потім піднімається вгору.

По мірі руху сушильного агента вгору по корпусу 1 він послідовно проходить по перерізам нижньої царги 4, середньої царги 3 і верхньої царги 2, конічної царги 6 і відводиться з пристрою через патрубок 7.

Одночасно з введенням сушильного агента до корпусу 1 пристрою через прямокутний патрубок 13 у верхній царзі 2 на верхню похилу контактну

полицю 10 вводиться дисперсний матеріал для сушіння. На верхній похилій контактній полиці 10 під час протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента відбувається нагрівання дисперсного матеріалу та видалення дрібної фракції з метою вирівнювання значення порізності зваженого шару. Довжина верхньої похилої контактної полиці 10 забезпечує такий час перебування дисперсного матеріалу, який сприяє повному прогріванню матеріалу, сепарації дрібних дисперсних частинок та початку видалення незв'язаної вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу в періоді постійної швидкості сушіння. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком сушильного агента поступово рухається по верхній похилій контактній полиці 10, відводиться через вільний її кінець та надходить до середньої похилої контактної полиці 11 у середній царзі 3. По мірі переміщення дисперсного матеріалу по середній похилій контактній полиці 11 відбувається подальше інтенсивне видалення незв'язаної вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу в періоді постійної швидкості сушіння в результаті протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком сушильного агента поступово рухається по середній похилій контактній полиці 11, відводиться через вільний її кінець та надходить до нижньої похилої контактної полиці 12 у нижній царзі 4. По мірі переміщення дисперсного матеріалу по нижній похилій контактній полиці в результаті протитечійної взаємодії з потоком сушильного агента відбувається видалення зв'язаної вологи з глибини матеріалу в періоді спадання швидкості сушіння. Дисперсний матеріал під час сушіння потоком сушильного агента поступово рухається по нижній похилій контактній полиці 12, відводиться через вільний її кінець та надходить до патрубку 9 відводу висушеного матеріалу, який розташовано в конічній царзі 8.

В основу фізичного моделювання покладено методи теорії подібності. У досліджах на моделі змінено (порівняно з промисловими умовами) масштаб установки. Геометрична подібність дотримується рівністю констант та інваріант геометричної подібності. Також мається на увазі, що обов'язково

дотримується подібність руху відповідних частинок та їх траєкторій у натурі та в моделі.

2.3.1 Методика проведення експериментальних досліджень

Фізичний експеримент проведено шляхом експериментальних досліджень стендових зразків сушильного обладнання та виконано на базі використання математичного апарату планування експерименту та математичної статистики.

Витрата повітря контролюється за допомогою камерної діафрагми в якості первинного приладу, вимірювального перетворювача перепаду тиску та аналогового приладу. Зміна витрати повітря здійснюється за допомогою шиберної засувки, що розміщена після вентилятору.

Витрата дисперсного матеріалу контролюється за допомогою витратоміра сипких матеріалів. Зміна витрати дисперсного матеріалу здійснюється за допомогою пристрою для дозування, що розміщений на трубопроводі.

Температура повітря, яке надходить до калорифера, після калорифера, в об'ємі поличної сушарки та після неї контролювалася та реєструвалася за допомогою набору приладів термоперетворювач опору – перетворювач вимірювальний – цифровий прилад.

Температура дисперсного матеріалу на полицях сушарки контролювалася за допомогою мультиметра.

Відносна вологість повітря на вході в поличну сушарку, в апараті та на виході з нього реєструвалася за допомогою психрометра.

Вологість дисперсного матеріалу контролюється за допомогою вимірювачів вологості.

Прилади контролю та регулювання, які використовувались під час проведення експерименту, пройшли відповідні випробування згідно з методиками [94, 95]. Експериментальний стенд обладнано пультом управління пускорегулювального обладнання. Методика проведення замірів та опис замірів спираються на рекомендації [95].

2.3.2 Контроль та вимірювання гідродинамічних характеристик

Серію досліджень гідродинамічних характеристик потоків здійснено на модельній установці поличної сушарки в складі експериментальної установки конвективного сушіння.

Порядок проведення експерименту:

- дослідження гідродинаміки газового потоку;
- дослідження двофазної системи «газовий потік – тверді частинки» з визначенням режимів роботи поличної сушарки та опору зваженого шару.

Газодинамічний опір повного газового потоку, опір складових газового потоку, опір зваженого шару, повний та статичний тиск до та після контактної ступені зокрема і всього апарата взагалі – основні характеристики, що необхідно отримати для всебічного аналізу гідродинаміки робочого простору поличної сушарки. Для виміру цих характеристик у конструкції модельної установки наявні спеціальні вузли зі спарених трубок повного й статичного тиску, які введені до осі відповідних газопроводів у місцях контролю (трубки Піто-Прандтля) та з'єднані імпульсними трубками до U-подібних мікроманометрів. Як рідину в останніх використаний етиловий спирт (C_2H_5OH). Похибка вимірів повного й статичного тиску на вході повинна становити не більше 1мм спиртового стовпчика.

Динамічний тиск (швидкісний напір) $P_{дин}$, Па, обчислюється таким чином [94]:

$$P_{дин} = P - P_{ст}, \quad (2.1)$$

де $P_{ст}$ – статичний тиск

Швидкість руху газового потоку по газопроводах W_2 [94]

$$W_2 = \sqrt{\frac{2(P - P_{cm})}{\rho_2}}, \quad (2.2)$$

Витрата газу (повітря) V на модельній установці

$$V = W_2 f_{2n}, \quad (2.3)$$

де f_{2n} – площа поперечного перерізу газопроводу в точці вимірювання.

Характер розподілу складових повної швидкості руху газового потоку в робочому просторі поличної сушарки досліджувався за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда. Для цього в конструкції корпусу модельної установки передбачено вузол закріплення та переміщення зонда, який становив собою мікрокоординатник з можливістю переміщення зонда вздовж радіуса і висоти робочого простору з точністю до 0,5 мм та обертання на кут точністю до 1°. Аеродинамічний зонд імпульсними трубопроводами з'єднаний з мікроманометрами, що вели реєстрацію даних вимірювання. Для зменшення пульсацій стовпа рідини в мікроманометрі застосовуються демпфірувальні вставки в гумові шланги. Градування зонда виконано еталонною трубкою Прандтля в аеродинамічній трубці зі строгою орієнтацією потоку в просторі.

Вимірювання гідродинамічних характеристик газового потоку відбувалося за допомогою кульового 5-канального аеродинамічного зонда. Зонд з використанням мікрокоординатника встановлюється в потрібне місце заміру. Для проведення необхідних вимірювань потрібно досягти такого положення зонда, при якому вектор швидкості знаходиться в площині отворів 1, 2 та 3. Це досягається обертанням кульки навколо осі в просторі (характеристикою цього положення є кут φ) до моменту, коли тиск в отворах 4 та 5 буде однаковий. У цьому разі задача вимірювання спрощується до визначення значення вектора швидкості та його напрямку в площині 1-2-3.

При досягненні необхідних умов розміщення зонда відраховується кут за лі-мбом та визначаються показники мікроманометрів $(h_2 - h_4)$; $(h_3 - h_1)$.

Основні залежності, що використовуються для визначення напрямку (кута φ , утвореного вектором швидкості з віссю центрального отвору 2 у площині 1-2-3 отворів кульки зонда), величини швидкості газового потоку W_2 і тиску P в точці заміру [94]:

За наявності розходжень значень, розрахованих за залежностями при умові похибки 2–3 %, швидкість потрібно розраховувати як середньоарифметичну отриманих вищезазначених залежностей.

Замір всіх гідродинамічних параметрів проводився 3–5 разів для кожної з ха-рактерних точок.

2.3.3 Контроль та вимірювання температурно-вологісних характеристик

Серія експериментальних досліджень присвячена визначенню ефективності процесу сушіння залежно від конструктивних параметрів поличної сушарки, характеристик сушильного агента та способу організації руху потоку сушильного агента.

Для вимірювання вологості застосовувався дієлькометричний вологомір типу ИВДМ-2С. Дієлькометричний метод вимірювання вологості заснований на залежності діелектричної проникності матеріалу від його вологості (діелектрична проникність води у багато разів вище, ніж у більшості матеріалів, здатних поглинати вологу, тому діелектрична проникність вологого матеріалу дає достовірну інформацію про його вологість). За цим методом вимірюють ємність датчика, заповненого досліджуваним матеріалом. Вимірювана ємність є функцією діелектричної проникності, і, відповідно, вологості контрольованого матеріалу. До переваг дієлькометричних вимірювачів вологості слід віднести контроль вологості в широкому діапазоні з високою точністю, оперативність вимірів, відсутність пошкоджень на вимірюваній поверхні після вимірювань.

За результатами всіх вимірювань обчислюють середнє арифметичне значення показань вологоміра.

За градуовальної характеристики для даного матеріалу визначають середнє значення його вологості, відповідне значенню показань вологоміра.

Абсолютну похибку визначення середньої вологості проконтрольованого матеріалу у у відсотках обчислюють за формулою:

$$\tilde{\Delta}[U] = \pm \sqrt{\frac{\tilde{\Delta}_{oc}^2[U]}{3} + \frac{\tilde{\sigma}^2[\Delta(U)]}{3}} + \Delta_r^2, \quad (2.4)$$

де Δ_r – абсолютна похибка градуювання.

Для вимірювання температури газодисперсного потоку застосовувався мультиметр типу DT-838. Принцип дії мультиметра заснований на термоелектричному ефекті. Коли кінці провідника знаходяться при різних температурах, між ними виникає різниця потенціалів, пропорційна різниці температур. Коефіцієнт пропорційності називають коефіцієнтом термо ЕРС. У різних металів коефіцієнт термо ЕРС різний і, відповідно, різниця потенціалів, що виникає між кінцями різних провідників, буде різна.

2.4 Обробка та обговорення результатів дослідження

Визначення похибки вимірів та результатів розрахунку основних гідродинамічних характеристик взаємодіючих потоків у робочій зоні експериментального зразка поличної сушарки базується на загальноприйнятих методиках та рекомендаціях [96, 97] щодо проведення інженерного експерименту та обробки отриманих даних.

Для визначення оптимальної кількості дослідів та досягнення найвищого ступеня точності й достовірності отриманих результатів, а також обробки цих результатів використано методи математичної статистики [98, 99].

У ході проведення експерименту можливе виникнення помилок двох родів – випадкової та систематичної [97].

Випадкова помилка зменшує точність результатів експерименту. Аналіз такого роду помилки можливий за умов використання середньоквадратичного відхилення σ , що обчислюється за такою формулою [97]:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}}, \quad (2.5)$$

де \bar{x} – середнє арифметичне значення; x – значення одиничного параметра;
 n – число вимірів.

Найбільша можлива похибка окремого виміру визначається за правилом трьох сигм [97, 100]

$$\Delta = 3\sigma. \quad (2.6)$$

Двосторонній довірчий інтервал середнього арифметичного значення визначали за залежністю [97] за умови ймовірності його потрапляння в довірчий інтервал 95 % :

$$\varepsilon = t_p \frac{\sigma}{\sqrt{n}}, \quad (2.7)$$

де t_p – критерій Стьюдента [97, 98].

Середньоквадратична похибка непрямих вимірів [98]:

$$\sigma_y = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x} \cdot \Delta \cdot x_i \right)^2}, \quad (2.8)$$

де $y = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$

Точність отриманих рівнянь регресії визначена за методикою найменших квадратів [97].

Систематична помилка зміщає однаковою мірою всі показники величин, які контролюються в ході проведення експерименту. Для виключення помилки такого роду всі прилади, що використані в ході дослідження, пройшли

тарування за допомогою зразкових приладів в умовах проходження експерименту. Усі прилади пройшли перевірку шляхом порівняння їх точностних характеристик із заявленими в технічній документації. Зв'язок приладів вимірювання з приладами на щиті контролю забезпечено з максимальною похибкою обробки сигналів у межах 1,5 %.

2.5 Визначення ефективності процесу сушіння

Для визначення максимальної ефективності процесу на кожному зі ступенів гравітаційної поличної сушарки в експериментальному стенді створені такі умови, при яких сушіння проводилось до моменту відсутності зміни вологості дисперсного матеріалу. Відповідно до формули (2.9) можливо досягти одиниці в чисельнику при нескінченному часі перебування матеріалу на ступені. В такому разі в експериментальному стенді полиця встановлювалась горизонтально без розвантажувального зазору і проводився забір навіски дисперсного матеріалу з визначенням його вологості.

$$E_i = \frac{\Delta x}{\Delta x_{\max}} = \frac{x_{i-1} - x_i}{x_{i-1} - b_i} = \frac{1 - \exp[-B_i \tau_i (1 + G_i^{-1})]}{1 + G_i^{-1}}. \quad (2.9)$$

Враховуючи теоретичні викладення і те, що на кожному зі ступенів властивості сушильного агента є різними (вологість та температура), при постійному співвідношенні потоків дисперсного матеріалу і сушильного агента у формулі (2.9) змінюється лише чисельник. Тому доцільним є визначення відносної ефективності процесу при постійному співвідношенні потоків.

Результати обрахунку максимальної різниці вологостей матеріалу, які на кожному ступені сушарки відповідають максимальній ефективності, наведено в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 - Максимальна різниця вологостей матеріалу, яка відповідає

максимальній ефективності ступеню сушарки

Номер ступеню (по ходу матеріалу)	Максимальна різниця вологостей
1	0,083
2	0,076
3	0,063

Відповідно до порядку проведення експерименту досліджено вплив на ефективність таких конструктивних характеристик гравітаційної поличної сушарки:

- кут нахилу полиці до горизонту (γ);
- зазор між кінцем полиці та стінкою сушарки (розвантажувальний зазор) (X/L);
- площа вільного перерізу полиці (ψ);
- діаметр отворів перфорації в полиці ($d_{отв}$).

Експериментальні дослідження проводились при зміні одного з параметрів, який досліджується, зі збереженням значення інших параметрів ($\gamma = \gamma_0 + (3-5)^\circ$; $X/L = 0,3$; $\psi = 20 \%$; $d_{відн} = d_{отв}$ ($d_{відн}$ – діаметр, віднесений до фіксованого діаметра отворів поличного контакту $d_{отв}$); $G_{суш}/G_M = 2$, $x_{поч} = 13 \%$). Відповідно до експериментальних досліджень значення кінцевої вологості матеріалу $x_{кін}$ залежить від технологічних і конструктивних характеристик сушарки та коливається від 5 до 8 %.

Також встановлено закон зміни вологості та температури дисперсного матеріалу і сушильного агента на ступенях каскаду полиць залежно від початкової температури сушильного агента, організації його руху та співвідношення витрат сушильного агента і дисперсного матеріалу.

Результати досліджень по кожній конструктивній характеристиці гравітаційної поличної сушарки, температурі сушильного агента і інших показників представлені у вигляді графічних залежностей, що відображають зміну вологості і температури дисперсного матеріалу та сушильного агента. За

результатами порівняння експериментально одержаних значень вологості дисперсного матеріалу на кожному ступені сушарки з даними таблиці 2.1 побудовано графічні залежності, які відображають ефективність ступенів залежно від конструкції апарата.

Проаналізуємо вплив зміни кожного конструктивного елемента поличної сушарки на характер зміни параметрів дисперсного матеріалу та сушильного агента [152].

Зміна кута нахилу полиці до горизонту впливає на перерозподіл складових сили тяжіння: збільшення його призводить до збільшення скочуючої складової сили тяжіння і навпаки. При цьому необхідно враховувати, що кут нахилу полиці може мати мінімальне значення, яке відповідає куту природного відкосу матеріалу. Цей випадок було розглянуто, але внаслідок того, що в такому разі відбувалось руйнування матеріалу внаслідок перегріву, розрахунок ефективності не проводився. При такому значенні кута нахилу матеріал висушувався з ефективністю, яка наближалась до одиниці, але його руйнування не дає можливості для застосування в якості товарного продукту.

При зменшенні кута нахилу полиці у вказаному на графічних залежностях діапазоні час перебування дисперсного матеріалу поступово збільшується, що призводить до більш тривалого його контакту з потоком сушильного агента. Внаслідок цього відбувається більш повне видалення вологи з матеріалу і крутизна кривої, яка показує зміну вологи в ньому, збільшується зі зменшенням кута нахилу полиці (рисунок 2.10), відповідно, збільшується крутизна кривої, яка показує зміну вологи сушильного агента по ступеням сушарки (рисунок 2.11). Внаслідок збільшення часу контакту з сушильним агентом зменшення його температури і збільшення температури матеріалу відбувається інтенсивніше (рисунок 2.12, 2.13).

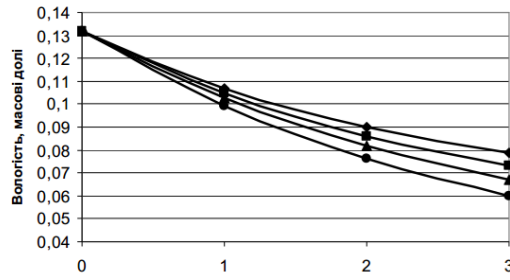


Рисунок 2.10 – Вплив кута нахилу полиці на зміну вмісту вологи в дисперсному матеріалі ($X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

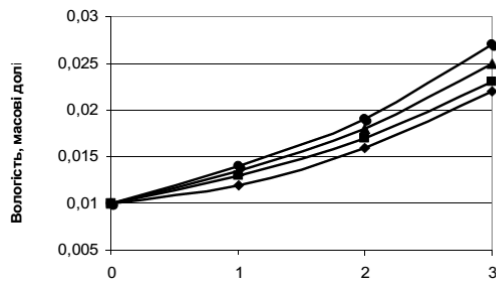


Рисунок 2.11 – Вплив кута нахилу полиці на зміну вмісту вологи у сушильному агенті ($X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

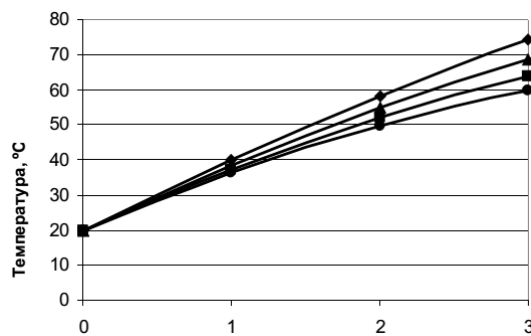


Рисунок 2.12 – Вплив кута нахилу полиці на зміну температури дисперсного матеріалу ($X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

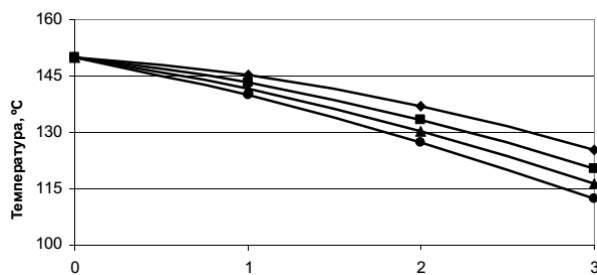


Рисунок 2.13 – Вплив кута нахилу полиці на зміну температури сушильного агента ($X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{отв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

Загальна ефективність ступенів при зміні кута нахилу полиці відносно кута природного відкосу матеріалу, одержана за результатами аналізу даних зміни вологості дисперсного матеріалу, наведена на рисунках 2.10-2.13.

Температурно-вологісні характеристики дисперсного матеріалу та сушильного агента змінюються за одним законом, але з різною інтенсивністю. Зважаючи на те, що цільовою функцією є кількість видаленої вологи i , як наслідок, ефективність ступенів сушарки, в подальшому представлення результатів експериментальних досліджень обмежимо лише характером зміни ефективності ступенів сушарки зі різних початкових умов (конструкція сушарки, характеристики сушильного агента та організація його руху).

Зміна величини зазору між краєм полиці та стінкою сушарки більш істотно впливає на зміну характеристик потоків та ефективності ступенів. Збільшення зазору призводить до того, що час контакту дисперсного матеріалу з сушильним агентом скорочується внаслідок зменшення довжини відстані руху матеріалу по полиці. В цьому разі дія скочуючої складової швидкості руху дисперсного матеріалу триває менший проміжок часу та в кінці полиці змінюється дією повної сили тяжіння. Таким чином, матеріал переміщується вниз і лише сила дії висхідного газового потоку чинить опір її падінню. Ефективність ступенів сушарки з урахуванням цього зменшується більш стрімко.

Аналіз результатів експериментальних досліджень стосовно впливу величини площі вільного перерізу полиці на ефективність процесу сушіння показав наступне. В рамках обраного діапазону площ вільного перерізу, які забезпечують витання дисперсного матеріалу без його винесення з меж полиці висхідним потоком сушильного агента, спостерігається стійка тенденція до збільшення ефективності при зменшенні цього параметру.

Це пояснюється тим, що зменшення площі вільного перерізу полиці призводить до збільшення швидкості висхідного руху сушильного агента в отворах. В такому випадку дія висхідного потоку сушильного агента пригальмовує поступальний рух дисперсного матеріалу на полиці, компенсуючи скочуючу складову його сили тяжіння. При цьому поступальна

складова переміщення дисперсного матеріалу зменшується і траєкторія змінюється на поступально-пульсаційну. Довжина траєкторії руху дисперсного матеріалу збільшується, час його контакту з сушильним агентом подовжується, що стає причиною підвищення ефективності каскаду ступенів гравітаційної поличної сушарки.

Аналіз даних експерименту показав, що зі зменшенням діаметру отворів перфорації ефективність видалення вологи дещо збільшується. Це можна пояснити тим, що в такому випадку відбувається збільшення впливу сили дії висхідного потоку сушильного агента, при якій поступальна складова траєкторії руху дисперсного матеріалу зменшується, а пульсаційна – збільшується.

Таким чином, довжина траєкторії руху дисперсного матеріалу збільшується і час контакту з сушильним агентом подовжується. Слід зазначити, що при подальшому зменшенні діаметру отворів перфорації дія висхідного потоку сушильного агента починає значно переважати дію скочуючої складової сили тяжіння. Це призводить до утворення другого перехідного режиму та режиму винесення в роботі поличної сушарки

Початкова температура сушильного агента не чинить великого впливу на зміну його показників та інтенсивність видалення вологи з дисперсного матеріалу. Це можна пояснити тим, що сушильний агент вводиться під нижній ступінь сушарки, на якому з дисперсного матеріалу вже видалено поверхневу вологу і лімітуючою стадією процесу є лише час перебування дисперсного матеріалу на ступені.

Організація руху сушильного агента та співвідношення витрати сушильного агента до витрати дисперсного матеріалу, який піддається зневодненню, може істотно впливати на показники якості висушеного матеріалу та властивості сушильного агента. З цією метою проведено ряд експериментальних досліджень, результати яких відображено на рисунках 4.23–4.26. Їх аналіз дозволяє провести підбір способу організації руху сушильного агента, який буде найменш енергоємним та забезпечить необхідну

повноту видалення вологи з дисперсного матеріалу.

Аналіз проведених експериментальних даних показує, що зміна характеристик дисперсного матеріалу та сушильного агента відбувається за одним законом; при цьому кожна з конструктивних характеристик поличної сушарки та технологічних показників сушильного агента по-різному впливає на інтенсивність збільшення або зменшення параметрів. З рисунків видно, що екстремум функції на графічних залежностях відсутній, що пояснюється закономірностями кінетики конвективного сушіння – зміна параметрів контактуючих потоків у кожному з періодів відбувається монотонно з різною інтенсивністю на окремих ділянках залежно від умов проведення зневоднення.

РОЗДІЛ 3

АНАЛІЗ ПРОВЕДЕНИХ ТЕОРЕТИЧНИХ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Ефективність роботи ступенів поличної сушарки

В даному розділі наведено порівняльні графічні залежності, які одержані за даними теоретичних розрахунків та експериментальних досліджень. Аналіз закону гідродинамічних характеристик сушильного агента, вологості і температури потоків, обчислених теоретично та одержаних за даними експериментальних досліджень, показав, що за різних початкових умов в характері теоретичних та експериментальних кривих простежується одна і та ж якісна закономірність, але кількісна характеристика дещо не збігається. Значення гідродинамічних та кінетичних характеристик, отриманих за результатами аналітичного розв'язання, та експериментальні дані мають високий ступінь відповідності. Відмінність в кількісній характеристиці для всіх випадків пояснюється ідентичними причинами, тому аналіз та зіставлення одержаних результатів буде проводитись при дослідженні впливу зміни довільно обраного параметра.

Зіставлення результатів математичного моделювання та експериментальних досліджень показало, що інтенсивність зневоднення дисперсного матеріалу (зволоння сушильного агента) та його нагрівання (охолодження сушильного агента) вища у випадку теоретичного розрахунку. Це обумовлено такими чинниками:

- втрати тепла крізь теплоізоляцію поличної сушарки;
- відмінність експериментальних полів швидкості сушильного агента на окремих полицях каскаду при їх однаковому конструктивному виконанні.

Порівняння даних теоретичного розрахунку та експериментальних досліджень стововно ефективності ступенів сушарки на прикладі впливу кута нахилу полиці представлено на рисунку 3.1.



Рисунок 3.1 – Вплив кута нахилу по-лиці на ефективність процесу сушіння ($\gamma = \gamma_0 + (15-17)^\circ$, $X/L = 0,3$; $\psi = 20\%$; $d_{відн} = d_{омв}$; $G_{суш}/G_M = 2$)

Аналіз результатів опису гідродинаміки одно- та двофазного потоків, а також закону зміни температури і вологості взаємодіючих потоків дозволив відпрацювати наступний алгоритм обчислення необхідного часу перебування дисперсних частинок в межах гравітаційної поличної сушарки:

Результати аналізу даних математичного моделювання та експериментальних досліджень дозволили побудувати криву сушіння для модельного матеріалу (рисунок 3.2).

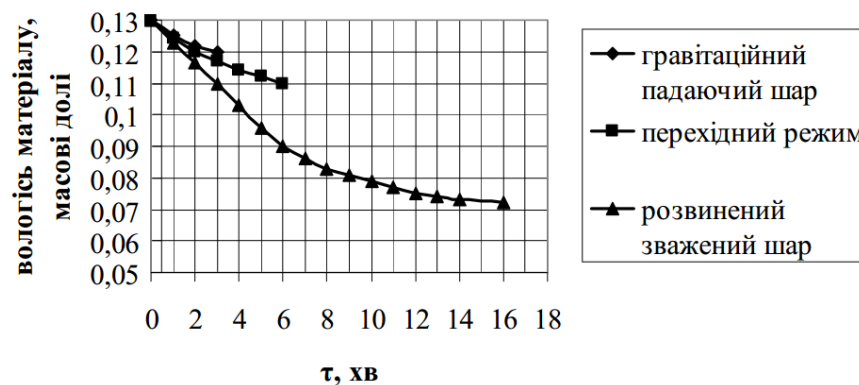


Рисунок 3.2 – Крива сушіння поліпропілену: $t_{суш} = 140\text{ }^\circ\text{C}$; $L_{пол} = 0,12\text{ м}$; $\gamma = \gamma_0 + (11-13)^\circ$; $\psi = 25\%$; $X/L = 0,3$; $d_{відн} = d_{омв}$

Аналіз кривих, побудованих для різних гідродинамічних режимів роботи сушарки, дозволяє виділити періоди постійної та падаючої швидкості сушіння, які відрізняються характером кривих та розділені критичною точкою.

Подібні криві стає можливим побудувати за інших конструктивних

характеристик сушарки. За результатами побудови таких кривих можна визначити оптимальне конструктивне виконання сушарки.

3.2 Розроблення нових конструкцій поличних сушарок

Завдяки можливості обладнання гравітаційної сушарки різними типами поличних контактів процес видалення вологи на кожному зі ступенів може проходити з різною інтенсивністю та тривалістю у часі.

Вдосконалення конструкції поличних контактів є актуальним завданням з огляду на можливість підвищення ефективності видалення вологи на кожному зі ступенів гравітаційної сушарки. Експериментально встановлено, що ефективність видалення вологи із дисперсного матеріалу на кожному зі ступенів є різною. Крім того, відбувається зменшення цього показника на кожному нижче розташованому поличному контакті. Для підвищення показника ефективності сушіння та вирівнювання його значення на всіх поличних контактах необхідним є вдосконалення конструкції ступенів сушарки.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень встановлено, що в загальному випадку епіюра швидкості руху сушильного агента над полицею по довжині гравітаційної сушарки має вигляд, зображений на рисунку 3.3.

Слід виділити три характерні зони швидкості руху сушильного агента [155]:

- зона I – рівномірне розподілення швидкості руху сушильного агента (деяке зниження швидкості обумовлене опором тертя по довжині полиці);
- зона II – інтенсивне зниження швидкості руху сушильного агента;
- зона III – підвищення швидкості руху сушильного агента в розвантажувальному зазорі.

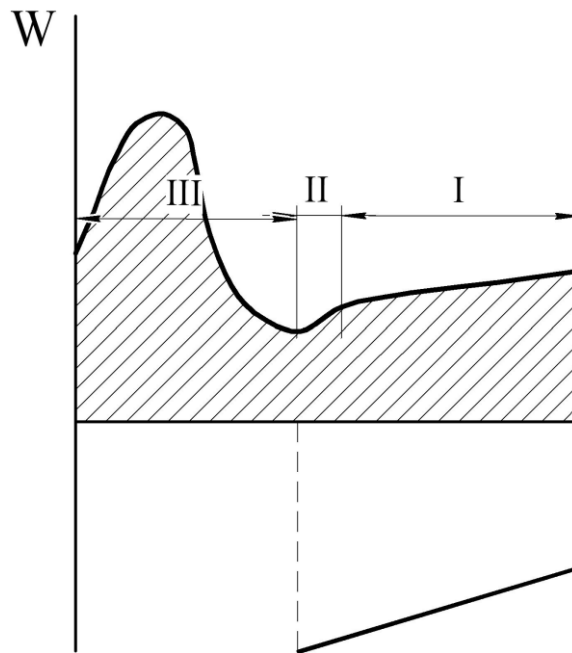


Рисунок 3.3 – Епюра розподілення швидкості руху сушильного агента над полицею в гравітаційній сушарці

В зоні I та II дисперсний матеріал знаходиться у зваженому стані, але, враховуючи нерівномірність розподілення швидкості в зоні II, по довжині полиці зважений шар має нерівномірну структуру. Такий гідродинамічний стан призводить до того, що час перебування дисперсного матеріалу на полиці може значно коливатись. Наслідком цього може бути як недогрівання матеріалу, так і його перегрівання з наступним руйнуванням (в разі зневоднення термолабільних матеріалів).

В основу розроблених конструктивних рішень [100–101] поставлено завдання удосконалення пристрою для сушіння дисперсних матеріалів шляхом зміни конструкції контактних полиць, що забезпечує збільшення рівномірності контакту сушильного агента з потоком дисперсного матеріалу та створення покращеної гідродинаміки руху потоків з метою збільшення часу контакту дисперсного матеріалу з сушильним агентом.

Запропоновано наступні вдосконалення конструкції ступенів сушарки:

- встановлення поличних контактів з різним розвантажувальним зазором по висоті сушарки (рисунок 3.4 а);

- використання поличного контакту зі змінною перфорацією (рисунок 3.4 б);
- виконання збірного поличного контакту, кожна з частин якого має різний кут нахилу до горизонту (рисунок 3.4 в).

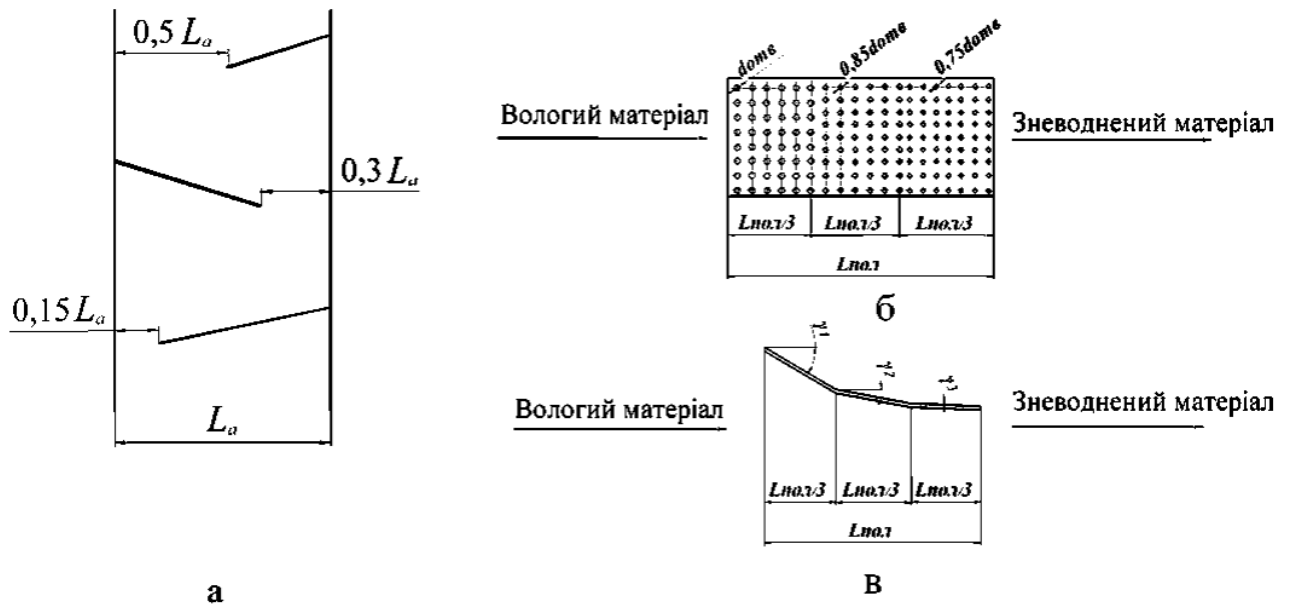


Рисунок 3.4 – Конструкції полиць багатоступеневої гравітаційної поличної сушарки: а – полиця з різним зазором по висоті сушарки; б – секціонована полиця зі змінною перфорацією секцій; в – секціонована полиця з постійною перфорацією секцій та змінним кутом їх нахилу; γ_i – кут нахилу секції полиці до горизонту

Встановлення в об'ємі пристрою похилих контактних полиць з різним по висоті зазором (рисунок 3.4 а) сприяє підвищенню ефективності сушіння в період видалення вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу та з глибини матеріалу після його нагрівання.

На верхній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (нагрівання) де величина зазору має максимальне значення, довжина полиці є мінімальною, що забезпечує мінімально необхідний час контакту фаз та повне нагрівання без перегрівання дисперсного матеріалу, що може негативно впливати на процес при сушінні термолабільних матеріалів. В цей же час на ній відбувається видалення дрібної

фракції, тобто верхня похила контактна полиця виконує роль сепаратора, що позитивно впливає на формування зваженого шару на наступних полицях контакту завдяки вирівнюванню значення порізності. На середній похилій контактній полиці, де величина зазору є меншою, при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з поверхневого шару) час перебування дисперсного матеріалу та контакту з сушильним агентом збільшується внаслідок збільшення довжини контактної полиці, що сприяє інтенсивному видаленню незв'язаної вологи; при цьому час перебування дисперсного матеріалу на полиці відповідає необхідному значенню часу сушіння в цьому періоді (період постійної швидкості сушіння). На нижній похилій контактній полиці при контакті дисперсного матеріалу з сушильним агентом (видалення вологи з глибини матеріалу), де величина зазору має мінімальне значення, довжина полиці є максимальною, що забезпечує ефективне видалення зв'язаної вологи з глибини матеріалу та максимально необхідний час контакту фаз в цьому періоді (період спадання швидкості сушіння).

Перфорація похилої контактної полиці отворами різного діаметру (рисунок 3.4 б) дозволяє створити на ній таку гідродинамічну ситуацію, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агента по довжині полиці, його дія по всій довжині залишається постійною. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій контактній полиці, його рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом [17].

Зважаючи на постійність витрати сушильного агента в кожному з перерізів пристрою, наявність в ньому зазору між кінцем похилої контактної полиці і стінкою, а також різним вільним перерізом проходу сушильного агента в окремих частинах пристрою, встановлення похилих контактних полиць з зазначеною перфорацією буде зменшувати перепад швидкості руху сушильного агента по довжині похилої контактної і в зазорі між кінцем похилої контактної

полиці і стінкою. Це сприяє підвищенню рівномірності контакту сушильного агенту з дисперсним матеріалом.

Зазначена конструкція похилих контактних полиць сприяє зменшенню інтенсивності процесу вихроутворення внаслідок компенсації сил, які утворюють вихор при огинанні кінця похилої контактної полиці, збільшенням сили дії висхідного потоку сушильного агенту.

Встановлення в об'ємі пристрою похилих контактних полиць при дотриманні визначеної перфорації сприяє підвищенню ефективності сушіння в період видалення вологи з поверхневого шару дисперсного матеріалу та з глибини матеріалу після його нагрівання.

Виконання похилої перфорованої контактної полиці збіркою з окремих частин зі змінним кутом нахилу до горизонту (рисунок 5.8 в) дозволяє створити на ній таку гідродинамічну ситуацію, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агенту по довжині похилої перфорованої контактної полиці, його дія по всій довжині залишається постійною. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій перфорованій контактній полиці, його рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом.

Зазначена конструкція похилих перфорованих контактних полиць сприяє зменшенню інтенсивності процесу вихроутворення внаслідок компенсації сил, які утворюють вихор при огинанні кінця похилої контактної полиці, збільшенням сили дії висхідного потоку сушильного агенту.

Використання похилих перфорованих контактних полиць наведених конструкцій дозволяє створити на кожному ступені сушарки такої гідродинамічної ситуації, при якій відбувається вирівнювання епюри швидкості руху сушильного агенту по довжині полиці, його дія залишається постійною на всіх ділянках полиці. Це обумовлює процес компенсації дії на дисперсний матеріал сил інерції та скочування по похилій поверхні, гальмування дисперсного матеріалу на похилій перфорованій контактній полиці, його

рівномірний рух у зваженому шарі і довготривалий контакт з сушильним агентом.

Запропоновані конструкції полиць дозволяють зменшити величину зони II за довжиною полиці, а також більш рівномірно розподілити швидкість руху сушильного агента в ній.

Порівняльні епюри розподілення швидкості руху сушильного агента по довжині апарата при різному конструктивному виконанні полиць подана на рисунку 3.5.

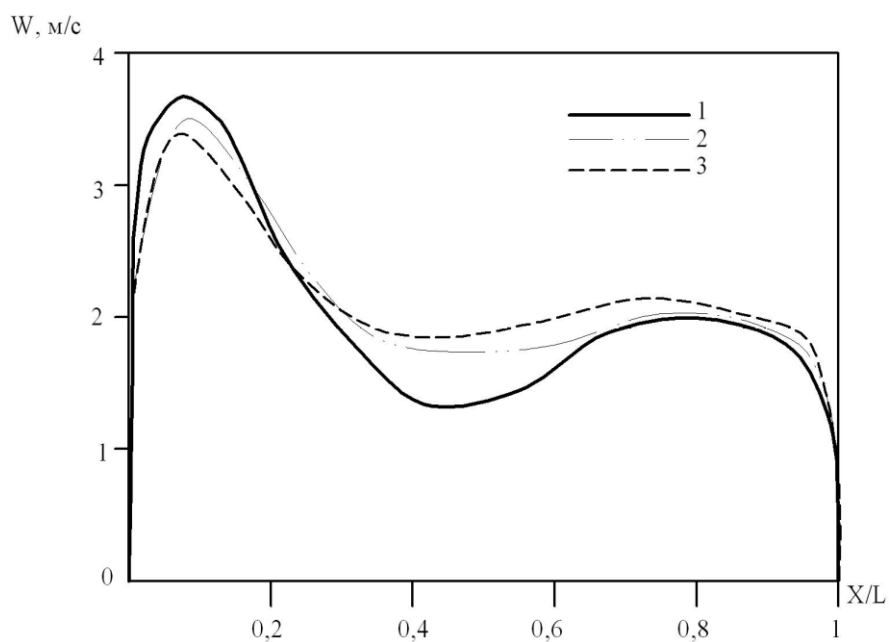


Рисунок 3.5 – Епюра розподілення швидкості руху газопотоку по довжині апарата при $X/L = 0,15$; $\psi = 15\%$; $H = 0,25$ м: 1 – полиця з постійною перфорацією по довжині; 2 – секціонована полиця зі змінною перфорацією секцій; 3 – секціонована полиця з постійною перфорацією секцій та змінним кутом їх нахилу

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

На підприємствах створюються служби охорони праці відповідно до вимог Типового положення про службу охорони праці, затвердженого наказом Державного комітету України з нагляду за охороною праці від 15.11.2004 N 255, зареєстрованого у Міністерстві юстиції України 01.12.2004 за N 1526/10125 (далі - НПАОП 0.00-4.21-04), і служби пожежної безпеки згідно з вимогами Типового положення про службу пожежної безпеки, затвердженого наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 29.09.2003 N 369, зареєстрованого у Міністерстві юстиції України 10.12.2003 за N 1121/8442 (далі - НАПБ Б.02.010-2003).

На кожному підприємстві розробляються інструкції з охорони праці відповідно до вимог Положення про розробку інструкцій з охорони праці, затвердженого наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 29.01.98 N 9, зареєстрованого в Міністерстві юстиції України 07.04.98 за N 226/2666 (далі - НПАОП 0.00-4.15-98).

Не допускаються особи молодші 18 років до роботи на посадах, зазначених у Переліку важких робіт і робіт із шкідливими та небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці неповнолітніх, затвердженому наказом Міністерства охорони здоров'я України від 31.03.94 N 46, зареєстрованому в Міністерстві юстиції України 28.07.94 за N 176/385.

Піднімання та переміщення важких речей неповнолітніми дозволяється тільки у межах Граничних норм підймання і переміщення важких речей неповнолітніми, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 22.03.96 N 59, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 16.04.96 за N 183/1208.

Не допускаються жінки до виконання робіт, зазначених у Переліку важких робіт та робіт із шкідливими і небезпечними умовами праці, на яких забороняється застосування праці жінок, затвердженому наказом Міністерства охорони здоров'я України 29.12.93 N 256, зареєстрованому в Міністерстві юстиції України 30.03.94 за N 51/260, а також до підймання та переміщення вантажів відповідно до Граничних норм підймання і переміщення важких речей жінками, затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 10.12.93 N 241, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 22.12.93 за N 194.

Проведення розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві здійснюється відповідно до вимог Порядку розслідування та ведення обліку нещасних випадків, професійних захворювань і аварій на виробництві, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 25.08.2004 N 1112 (далі - НПАОП 0.00-6.02-04).

При обслуговуванні просочувально-сушильного устаткування для виробництва дубльованих гумотехнічних матеріалів та виробів з них на працівників впливають відповідно до класифікації ГОСТ 12.0.003-74 "ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация" небезпечні і шкідливі виробничі фактори, які за природою дії поділяються на фізичні, хімічні, психофізіологічні. Зокрема, сюди належать:

незахищені рухомі елементи машин і механізмів;

транспортні засоби, що рухаються;

деталі, заготовки, матеріали, що рухаються;

гострі краї, шорсткість поверхонь деталей, заготовок, обладнання;

несприятливий мікроклімат робочої зони;

підвищений рівень електромагнітного випромінювання;

підвищена напруженість магнітних і електричних полів;

підвищений рівень інфрачервоного випромінювання;

підвищений або знижений рівень ультрафіолетового випромінювання;

підвищена температура поверхонь устаткування і матеріалів;

підвищена або знижена температура повітря робочої зони;
підвищений рівень шуму на робочому місці;
підвищений рівень ультразвуку та інфразвуку;
підвищений рівень статичної електрики;
відсутність або недостатність природного освітлення;
підвищений рівень вібрації (загальної і локальної);
знижена освітленість робочого місця;
пожежо- та вибухонебезпека;
хімічні фактори загальнотоксичного, дратівливого, канцерогенного впливу на організм працівника;
нервово-психічні перевантаження, що пов'язані з важкістю, напруженістю та монотонністю праці.

Джерелами небезпечних і шкідливих чинників також можуть бути нерегламентовані режими роботи технологічного устаткування, транспортні засоби, вантажопідіймальне обладнання, устаткування, що працює під тиском, електрифіковане устаткування та інструменти, інженерні комунікації.

Небезпечні хімічні речовини, що використовуються для виробництва дубльованих гумотехнічних матеріалів та виробів з них і за певних умов можуть негативно впливати на здоров'я працівників, повинні підлягати гігієнічній регламентації відповідно до Положення про гігієнічну регламентацію та державну реєстрацію небезпечних факторів, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 13.06.95 N 420.

Терміни та визначення, що вживаються у Правилах, визначені відповідно до Закону України "Про охорону праці", Державного стандарту ДСТУ 2293-99 "Охорона праці. Терміни та визначення основних понять" (далі - ДСТУ 2293-99).

Об'ємно-планувальні, конструктивні рішення, а також санітарно-технічне обладнання виробничих будівель і споруд мають відповідати вимогам СНиП 2.09.02-85* "Производственные здания", затверджених постановою Держбуду СРСР від 27.09.88 N 196, СНиП 2.11.01-85* "Складские здания", затверджених

постановою Держбуду СРСР від 30.12.85 N 280, СНиП 2.04.05-91 "Отопление, вентиляция и кондиционирование", затверджених постановою Держкоммістобудування України від 28.12.94 N 106 (далі - СНиП 2.04.05-91), СН 245-71 "Санитарные нормы проектирования промышленных предприятий", ГОСТ 12.4.021-75 "ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования" (далі - ГОСТ 12.4.021-75), ДБН В.1.1-7-2002 "Захист від пожежі. Пожежна безпека об'єктів будівництва", затверджених наказом Держбуду України від 03.12.2002 N 88 (далі - ДБН В.1.1-7-2002), ДБН В.2.5-28-2006 "Інженерне обладнання будинків і споруд. Природне і штучне освітлення", затверджених наказом Держбуду України від 15.05.2006 N 168, та цих Правил.

Питання забезпечення пожежної безпеки на підприємствах з виробництва дубльованих гумотехнічних матеріалів та виробів з них під час експлуатації, проектування, нового будівництва, розширення, реконструкції, технічного переоснащення та капітального ремонту необхідно здійснювати відповідно до чинних нормативно-правових актів з питань пожежної безпеки.

Виробничі будівлі та споруди мають бути обладнані засобами пожежогасіння, автоматичними установками пожежогасіння та пожежної сигналізації відповідно до вимог ДБН В.2.5-13-98* "Інженерне обладнання будинків і споруд. Пожежна автоматика будинків і споруд", затверджених наказом Держбуду України від 28.10.98 N 247, та ГОСТ 12.4.009-83 "ССБТ. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание".

Засоби зв'язку та сигналізації повинні утримуватися в справному стані та забезпечувати в будь-який час доби прийом і передачу сигналу про виникнення пожежі.

Територія підприємства, а також будівлі, споруди, приміщення забезпечуються відповідними знаками безпеки згідно з вимогами ГОСТ 12.4.026-76 "ССБТ. Цвета сигнальные и знаки безопасности" (далі - ГОСТ 12.4.026-76) та ДСТУ ISO 6309:2007 "Противопожечный захист. Знаки безпеки. Форма та колір".

Територію, будівлі та споруди необхідно забезпечувати вогнегасниками відповідно до Типових норм належності вогнегасників, затверджених наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій та у справах захисту населення від наслідків Чорнобильської катастрофи від 02.04.2004 N 151, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 29.04.2004 за N 554/9153 (далі - НАПБ Б.03.001-2004).

Вогнегасники, що знаходяться у виробничих приміщеннях підрозділів, та засоби виклику пожежної охорони передаються під відповідальність (збереження) керівників цих підрозділів або осіб, які їх заміщують.

Виробничі будівлі і споруди необхідно оглядати двічі на рік з метою визначення можливості їх подальшої експлуатації відповідно до вимог Правил обстежень, оцінки технічного стану та паспортизації виробничих будівель і споруд, затверджених наказом Державного комітету будівництва, архітектури та житлової політики України, Державного комітету України по нагляду за охороною праці від 27.11.97 N 32/288, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 06.07.98 за N 423/2863.

Для виконання ремонтних або опоряджувальних робіт будівель та приміщень, очищення або ремонту дахів, ліхтарів, освітлювальної арматури, застосування вікон потрібно використовувати спеціальні механізми, устаткування і пересувні пристрої для робіт на висоті (вишки, майданчики), що забезпечують безпеку робіт.

Виробничі, допоміжні будівлі й приміщення мають бути обладнані природною і припливно-витяжною вентиляцією, а також системою опалення відповідно до СНиП 2.04.05-91.

Застосування вентиляції повинно забезпечувати повітрообмін, температуру та стан повітряного середовища відповідно до вимог Державних санітарних норм мікроклімату виробничих приміщень, затверджених постановою Головного державного санітарного лікаря України від 01.12.99 N 42 (далі - ДСН 3.3.6.042-99), Правил пожежної безпеки в Україні, затверджених наказом Міністерства України з питань надзвичайних ситуацій від 19.10.2004 N

126, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 04.11.2004 за N 1410/10009 (далі - НАПБ А.01.001-2004), та ГОСТ 12.1.005-88 "ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны" (далі - ГОСТ 12.1.005-88). Усі вентиляційні пристрої мають підлягати планово-попереджувальному огляду і ремонту, а також періодичному технічному випробуванню.

У виробничих, побутових приміщеннях повинна підтримуватися встановлена нормами температура відповідно до вимог ДСН 3.3.6.042-99. Перед початком опалювального сезону всі системи і прилади опалення повинні бути перевірені і за потреби відремонтовані. У разі зниження температури зовнішнього повітря нижче $+8^{\circ}\text{C}$ кожне відчинення воріт повинно бути заблоковане з автоматичним вмиканням повітряної теплової завіси.

Експлуатація водопровідних, каналізаційних споруд і мереж повинна здійснюватись відповідно до вимог ГОСТ 12.3.006-75 "ССБТ. Эксплуатация водопроводных и канализационных сооружений и сетей. Общие требования безопасности".

Працівники повинні забезпечуватись питною водою, яка відповідає вимогам ДСанПіН "Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання", затверджених наказом Міністерства охорони здоров'я України від 23.12.96 N 383, зареєстрованих в Міністерстві юстиції України 15.04.97 за N 136/1940 (далі - ДСанПіН N 383-96).

У приміщеннях, де застосовуються токсичні речовини, установлювати питні установки не дозволяється. Питні фонтанчики, бачки для питної води, сатураторні установки з підсоленою водою необхідно розміщувати у безпечних санітарних зонах не далі 75 м від робочого місця і забезпечувати одноразовими стаканами. Якість води для душових, умивальних, охолодження повітря в кондиціонерах повинна відповідати вимогам ГОСТ 2874-82 "Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством".

Виробничі приміщення, проходи, сходові марші потрібно утримувати в чистоті, сміття і відходи збирати в урни і при наповненні їх на 2/3 об'єму

вносити з приміщень в кінці робочої зміни. Обов'язковим є проведення щодобового вологого прибирання виробничих приміщень з використанням промислових пирососів. Генеральне прибирання виробничих приміщень, металоконструкцій, поверхонь повітропроводів вентиляційних систем, іншого устаткування, а також миття вікон, очищення скла світлоаераційних ліхтарів від пилу і бруду необхідно проводити не рідше одного разу на місяць. Очищення заскленої поверхні світлоаераційних ліхтарів необхідно виконувати з площадок обслуговування.

Адміністративні, санітарно-побутові приміщення (гардеробні, переддушові, душові, умивальні, убиральні, кімнати для паління, обробки, зберігання та видачі спецодягу) та приміщення для сушіння, знепилення, знешкодження робочого одягу повинні відповідати вимогам СНиП 2.09.04-87 "Административные и бытовые здания", затверджених постановою Держбуду СРСР від 30.12.87 N 313.

Хімічне чищення спеціального одягу, спеціального взуття та інших засобів індивідуального захисту працівників слід проводити, дотримуючись вимог ГОСТ 12.4.169-85 "ССБТ. Общие требования к процессу химической чистки средств индивидуальной защиты".

Побутові приміщення вибухопожежонебезпечних виробництв слід розташовувати в окремих будівлях або на перших поверхах виробничих приміщень, але не ближче 20 м від приміщень вибухопожежних виробництв відповідно до вимог Загальних правил вибухобезпеки для вибухопожежонебезпечних хімічних, нафтохімічних і нафтопереробних виробництв, затверджених Держгіртехнаглядом СРСР 06.09.88 (далі - НПАОП 0.001.41-88).

Цехи для виготовлення клеїв, лаку, герметиків, паст з використанням вибухопожежонебезпечних розчинників, підготовки сировини і виготовлення гумових сумішей, склади сировини і готової продукції в разі необхідності можуть сполучатися з основними виробничими корпусами переходами через протипожежні тамбур-шлюзи 1-го типу відповідно до класифікації

протипожежних перешкод, визначеної ДБН В.1.1-7-2002. Вхід до переходів слід здійснювати через протипожежні двері 2-го типу.

У проектах будівництва нових підприємств не дозволяється підземне розміщення емностей і безканальна прокладка в землі технологічних трубопроводів з легкозаймистими і горючими рідинами, а також заглиблені насосні для перекачування цих рідин.

Розміщення складів пом'якшувачів, розчинників, інших горючих легкозаймистих рідин необхідно здійснювати згідно з вимогами НАПБ Б.03.002-2007. При розміщенні в одному виробничому приміщенні різних за шкідливістю виробничих ділянок повинні бути передбачені заходи, що виключають розповсюдження хімічних речовин по виробничому приміщенню.

Для речовин, що використовуються у виробництві дубльованих гумотехнічних матеріалів та виробів з них, слід визначати показники пожежної небезпеки згідно з вимогами ГОСТ 12.1.044-89 "ССБТ. Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения".

Не дозволяється захаращення робочих місць і проїздів сировиною, напівфабрикатами і готовими виробами. Відходи виробництва повинні збиратись у виділених для цього місцях та в кінці зміни вивозитися з цеху.

Для витримки гумових сумішей, обгумовування корду та інших напівфабрикатів у цехах необхідно передбачати спеціальні місця. Кількість матеріалів, що підлягають витримці в цеху, не повинна перевищувати добової потреби.

Приміщення розподільних пристроїв керування технологічним процесом повинні мати повітряне опалення, поєднане з припливною вентиляцією.

У приміщеннях підготовки сировини, приготування гумових сумішей і в інших приміщеннях за наявності технологічних процесів з виділенням пилу нагрівальні прилади водяного опалення повинні мати гладку поверхню, що дозволяє легко видаляти з них пил.

У цехах, де виділяються шкідливі речовини I, II, III, IV класів небезпеки відповідно до ГОСТ 12.1.005-88, необхідно проводити періодичний контроль повітряного середовища на вміст у ньому шкідливих речовин за графіками, узгодженими з районною або міською санітарно-епідеміологічною станцією, затвердженими у встановленому на підприємстві порядку.

Обладнання, при експлуатації якого можливе виділення шкідливих речовин і пилу в повітря робочої зони, повинно бути облаштовано укриттями з місцевим відсмоктуванням. Місцеве відсмоктування необхідно виконувати у вигляді суцільного укриття на зразок витяжної шафи з періодично або постійно відкритим прорізом для виконання робіт. При неможливості облаштування суцільних укриттів слід передбачати парасолі. Пуск місцевого відсмоктування для видалення небезпечних хімічних речовин, що відповідають класифікації ГОСТ 12.1.007-76 "ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности", а також вибухонебезпечних речовин повинен бути заблокований з пуском технологічного обладнання.

Дільниці просіювання і розважування інгредієнтів, цех приготування гумових сумішей, інші виробничі дільниці із значним виділенням пилу повинні мати установки для механічного прибирання пилу.

У приміщеннях приготування клеїв, термостатування виробів з гуми, а також в інших місцях, де в результаті розгерметизації технологічного обладнання і порушення перебігу технологічного процесу можливе раптове надходження шкідливих та небезпечних речовин або вибухонебезпечних газів у повітря робочої зони, необхідно передбачати пристрій аварійної витяжної вентиляції.

Кратність повітрообміну для приміщень категорій А, Б і В, а також для виробничих приміщень, у яких виділяються шкідливі речовини, встановлюється відповідно до вимог СНиП 2.04.05-91.

Прокладання повітропроводів загальнообмінної і місцевої витяжної вентиляції дільниць термостатування виробів, при якому можливе виділення шкідливих газів, а також повітропроводів припливної і витяжної вентиляцій

приміщень виробництв категорій А і Б через приміщення інших категорій не дозволяється.

У приміщеннях і на ділянках, де можливе утворення вибухонебезпечних сумішей горючих парів і газів з повітрям, необхідно встановлювати промислові газоаналізatori або сигналізатори довибухових концентрацій горючих парів і газів у вибухонебезпечних зонах, що належать до 0, 1, 2 класів.

Пробовідбірні пристрої газоаналізаторів для вимірювання ГДК шкідливих речовин необхідно встановлювати в робочій зоні на висоті 1 - 1,5 м над рівнем підлоги або площадки в місцях постійного або тимчасового перебування обслуговуючих працівників. При цьому на кожні 200 м² площі приміщення необхідно встановлювати не менше одного пробовідбірного пристрою і одного датчика на приміщення відповідно до вимог чинного законодавства.

При спрацьовуванні газоаналізаторів і сигналізаторів повинна бути забезпечена одночасна подача світлового і звукового сигналів в операторну, загазоване приміщення при постійному перебуванні в ньому працівників і на табло на вході в приміщення при періодичному перебуванні в ньому працівників.

Пуск аварійної вентиляції повинен здійснюватись автоматично при спрацьовуванні газоаналізатора або сигналізатора і за допомогою ручного пристрою, розташованого біля основних входних дверей ззовні приміщення.

Не дозволяється облаштовувати входи у вентиляційні камери із складських приміщень, а також з виробничих приміщень з вибухонебезпечними виробництвами або такими, що характеризуються значними виділеннями пилу і шкідливих речовин відповідно до вимог НАПБ Б.03.002-2007.

Огляд, випробування, обстеження машин, механізмів, устаткування вибухонебезпечних виробництв необхідно проводити відповідно до Порядку проведення огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки, затвердженого постановою Кабінету Міністрів України від 26.05.2004 N 687, і вимог ГОСТ 12.4.021-75.

Установлення світильників у зонах і накриттях місцевої витяжної вентиляції, що призначається для видалення від машин та агрегатів вибухонебезпечних і пожежонебезпечних газів, парів і пилу, не дозволяється. При необхідності такого розміщення світильники повинні бути у вибухобезпечному виконанні, що відповідає категорії і групі вибухонебезпечної суміші і класу вибухонебезпечної зони.

Технологічне обладнання і комунікації необхідно розміщувати з урахуванням забезпечення технологічного потоку виробництва, а також вільного доступу для їх безпечного обслуговування і ремонту.

Обладнання, яке працює під тиском, повинно відповідати вимогам чинного законодавства.

Усі рухомі частини машин, механізмів і технологічного обладнання (маховики, вали, муфти, передачі), розміщені на висоті менше 3 м від підлоги або площадки обслуговування, місця набігання стрічки на барабани і ланцюгів на зірочки конвеєрів, а також вантажі натяжних станцій конвеєрів повинні бути огорожені.

Для обслуговування обладнання, приладів, арматури і механізмів на висоті 1,8 м і вище від підлоги потрібно влаштовувати спеціальні площадки.

Справність пристроїв для аварійної зупинки валкових машин і зачочувально-розчочувальних пристроїв, транспортерних стрічок повинна перевірятись працівником у присутності чергового електрика і майстра відповідно до вимог Правил безпечної експлуатації електроустановок споживачів, затверджених наказом Комітету по нагляду за охороною праці Міністерства праці та соціальної політики України від 09.01.98 N 4, зареєстрованих у Міністерстві юстиції України 10.02.98 за N 93/2533 (далі - НПАОП 40.1-1.21-98). Результати перевірки записуються до журналу обліку захисних засобів з підписами працівника, чергового електрика і майстра. Запис проводиться на кожну одиницю перевіреного обладнання. Робота на обладнанні з несправними захисними пристроями не дозволяється.

ВИСНОВКИ

1. На підставі літературного огляду існуючих конструкцій різних типів сушарок зваженого шару та порівняльного аналізу їх ефективності доведено, що використання багатоступневих гравітаційних поличних сушарок є перспективним та енергоефективним напрямом технології конвективного сушіння.

2. Запропонована фізична модель руху взаємодіючих потоків, що взаємодіють, яка дає можливість визначити періоди сушіння дисперсного матеріалу щодо особливостей проведення даного процесу в гравітаційній поличній сушарці.

3. Створено математичну модель, що дозволяє визначати час нагрівання та зневоднення дисперсного матеріалу, гідродинамічний час перебування дисперсної фази в робочому просторі сушарки в режимі вільного і стисненого руху, температурно-вологісні характеристики потоків, що взаємодіють, та ефективність кожного ступеня сушарки з урахуванням гідродинаміки робочого простору апарата, конструкції полиць, характеристик і способу організації руху сушильного агента.

4. Експериментально визначено три основних (режим гравітаційного падаючого шару, режим зваженого шару, режим винесення дисперсного матеріалу) та два перехідних режими роботи сушарки залежно від навантаження за потоками та часу перебування дисперсної фази в апараті в кожному з режимів. У режимі зваженого шару, який визначено найбільш ефективним для сушіння, час перебування матеріалу на полиці під час його стисненого руху за різних умов проведення експерименту становить від 25 до 120 с.

6. Експериментальним шляхом досліджено вплив конструкції полиці та організації руху сушильного агента на гідродинамічні показники руху потоків у робочому просторі гравітаційної поличної сушарки та інтенсивність зневоднення дисперсного матеріалу. За різних умов проведення експерименту

визначено діапазон ефективностей окремих ступенів сушарки в межах 0,12–0,47.

7. Проведено порівняння результатів теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки робочого простору гравітаційної поличної сушарки, температурно-вологісних характеристик потоків, що взаємодіють, та ефективності ступенів сушарки. Похибку результатів оцінено на рівні 4–7 %. Розроблено механізми управління часом перебування вологого матеріалу в гравітаційній поличній сушарці та методи підвищення ефективності сушіння окремих ступенів апарата.

8. Виконана оцінка енергоефективності процесу сушіння дисперсних матеріалів.

9. Запропоновано нові конструкції пристроїв для сушіння дисперсних матеріалів, захищених патентами України.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Kudra T. *Advanced Drying Technologies* / T. Kudra, A. S. Mujumdar – New York: Marcel Dekker, 2002. – 459 p.
2. Сажин Б. С. *Основы техники сушки* / Сажин Б. С. – М.: Химия, 1984. – 320 с.
3. Воробьёв А. М. Сушильные аппараты с активным гидродинамическим режимом / А. М. Воробьёв, Г. С. Кормильцин, А. А. Горелов, С. П. Рудобашта // *Вестник ТГУ*. – 2001. – Т. 6, вып. 2. – С. 227–229.
4. Гельперин Н. И. *Основы техники псевдооживления* / Гельперин Н. И., Айнштейн В. Г., Кваша В. Б. – М.: Химия, 1967. – 664 с.
5. Беранек Я. *Техника псевдооживления* / Я. Беранек, Д. Сокол.; пер. с чешск. В. Г. Айнштейна; под ред. Н. И. Гельперина. – М.: Гостоптехиздат, 1962. – 157 с.
6. Донат Е. В. *Разработка и исследование аппаратов взвешенного слоя для интенсификации технологических процессов* / Е. В. Донат, Н. П. Юхименко // *Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки*. – 2001. – №9(30)–10(31). – С. 16–21.
7. Забродский С. С. *Гидродинамика и теплообмен в псевдооживленном слое* / Забродский С. С. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 488 с.
8. Протодьяконов И. О. *Явления переноса в химической технологии* / Протодьяконов И. О., Марцулевич Н. А., Марков А. В.; под ред. Романкова П. Г. – Л.: Химия, 1981. – 264 с.
9. Boyadjiev Chr. V. *Non-linear mass transfer and hydrodynamic stability* / Chr. V. Boyadjiev, V. N. Babak – Amsterdam: Elsevier Science B. V., 2000. – 500 p.
10. *Обезвоживание растворов в кипящем слое* / [Тодес О. М., Каганович Ю. Я., Налимов С. П., Гольцикер А. Д., Себалло В. А., Фридман Д. И.]. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.
11. Разумов И. М. *Псевдооживление и пневмотранспорт сыпучих материалов* / Разумов И. М. – М.: Химия, 1972. – 240 с.

12. Wen-Ching Yang. Fluidization, solids handling, and processing / Wen-Ching Yang.
– Westwood: Noyes Publications, 1998. – 890 p.
13. Бараков А. В. Моделирование гидродинамики и теплообмена в перемещающемся псевдооживленном слое: дисс. ... доктора техн. наук: 05.14.04 / Бараков Александр Валентинович. – Воронеж, 2005. – 235 с.
14. Мухленов И. П. Расчеты аппаратов кипящего слоя: Справочник / Мухленов И. П., Сажин Б. С., Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1986. – 352 с.
15. Берд Р. Явления переноса / Берд Р., Стьюарт В., Лайтфут Е. – М.: Химия, 1974.– 688 с.
16. Юхименко Н.П. Охлаждение и пневмокласификация гранулированных и зернистых материалов в гравитационном полочном аппарате: дис. ... кандидата техн. наук: 05.17.08 / Юхименко Николай Петрович. – М., 1988. – 193 с.
17. Муштаев В. И. Сушка в условиях пневмотранспорта / Муштаев В. И., Ульянов В. М., Тимонин А. С. – М.: Химия, 1984. – 232 с.
18. Сокольский А. И. Термическая обработка дисперсных материалов в аппаратах с вихревыми двухфазными потоками: дисс. ...докт. техн. наук: 05.17.08 / Со- кольский Анатолий Иванович. – Иваново, 2005. – 320 с.
19. Лыков А. В. Теория сушки. / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1968. – 472 с.
20. Романков П. Г. Массообменные процессы химической технологии / Романков П. Г., Рашковская Н. Б., Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1975. – 336 с.
21. Голубець В. М. Теплообмін у процесі сушіння сипучих матеріалів з деревини у кипячому шарі / В. М Голубець, І. М. Озарків, Й. Л. Ацбергер // Науковий вісник. – 2003. Вип. 13.1. – С. 93–100.
22. Левина Н. С. Исследование кинетики нагрева и сушки пористых материалов / Н. С. Левина // Ползуновский вестник. – 2008. – № 1-2. – С. 49–52.
23. Липин А. В. Кинетика конвективной сушки многокомпонентных фармацев- тических смесей / А. В. Липин // МИТС-НАУКА: международный

научный вестник. – 2006. – № 3. – С. 1–6.

24. Дмитриев В. М. Кинетика и аппаратурно-технологическое оформление процесса конвективной сушки гранулированных и плёночных полимерных материалов: дисс. ...докт. техн. наук: 05.17.08 / Дмитриев Вячеслав Михайлович. – Тамбов, 2003. – 460 с.

25. Атаманюк В. М. Теплообмін під час фільтраційного сушіння осажденного і гранульованого поліакриламиду / В. М. Атаманюк, М. С. Мальований // Науковий вісник НЛТУ України. – 2010. – Вип. 20.6. – С. 113–121.

26. Mujumdar A. S. Handbook of Industrial Drying / Mujumdar Arun S. – Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2006. – 1280 p.

27. Карнаушенко Ю. В. Пути развития основных способов сушки и методы их интенсификации / Ю. В. Карнаушенко // Рыбне хозяйство Украины. – 2010. – № 1. – С. 26–28.

28. Поперечний А. М. Аналіз конструктивних особливостей сушарок із псевдозрідженим шаром і перспективи їх удосконалення / А. М. Поперечний, І. В. Жданов // Обладнання та технології харчових виробництв. – 2009. – № 20. – С. 44–52.

29. Шолдаев И. С. О закономерностях конвективной сушки (по экспериментальным данным) / И. С. Шолдаев, С. А. Ильина, А. П. Соловьева // Вестник АГТУ. – 2008. – № 2 (43). – С. 215–217.

30. Муштаев В. И. Сушка дисперсных материалов / В. И. Муштаев, В. М. Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.

31. Перепадя К. В. Анализ возможности применения псевдооживленных слоев в судовых теплообменных аппаратах / К. В. Перепадя, Д. К. Перепадя // Вісник СевДТУ. – 2009. – Вип. 95. – С. 155–157.

32. Сажин Б. С., Чувпило Е. А. Типовые сушилки со взвешенным слоем материала. Обзор. Информ. Сер. ХМ-1 / Б. С. Сажин, Е. А. Чувпило. – М.: ЦИНТИ-химнефтемаш, 1975. – 72 с.

33. Романков П. Г. Сушка во взвешенном состоянии / П. Г. Романков,

Н. Б. Рашковская. – Л.: Химия, 1979. – 272 с.

34. Плановский А. Н. Сушка дисперсных материалов в химической промышленности / Плановский А. Н., Муштаев В. И., Ульянов В. М. – М.: Химия, 1979. – 288 с.

35. А. с. 1308810 СССР, МКИ F 26 В 17/12, F 26 С 3/16. Теплообменный аппарат для термообработки сыпучих материалов / Н. П. Юхименко, Е. В. Донат (СССР). – № 3964963/24–06; заявл. 14.10.85; опубл. 07.05.87, Бюл. № 17.

36. А. с. 1343219 СССР, МКИ F 26 В 17/12. Рециркуляционная сушилка для сыпучих материалов / В. М. Вирченко (СССР). – № 4088119/24–06; заявл. 11.05.86; опубл. 07.10.87, Бюл. № 37.

53. А. с. 1173137 СССР, МКИ F 26 В 17/12, F 28 С 3/16, F 27 D 9/00. Теплообменный аппарат для термообработки сыпучих материалов / Е. В. Донат, В. М. Вирченко, Ю. А. Педосенко (СССР). – № 3712385/24–06; заявл. 21.03.84; опубл. 15.08.85, Бюл. № 30.

54. Пат. 82104 Україна, МПК (2006) F 26 В 17/12, F 26 В 3/02. Сушарка-грохот / Федоров Г. Д., Агеєнко С. Б., Вінниченко В. І., Бабінцев А. В.,

55. Котляренко В. В.; заявник та патентовласник Харківський державний технічний університет будівництва та архітектури. – № а200600048; заявл. 03.01.2006; надрук. 11.03.2008.

56. Пат. 8738 Україна, МПК (2006.01) F 26 В 17/12. Утановка для сушіння сипучого матеріалу, переважно зерна / Євженко В. О., Міхалевич В. П., Березняк Л. І.; заявник та патентовласник Євженко В. О., Міхалевич В. П., Березняк Л. І. – № u200501504; заявл. 18.02.2005; надрук. 15.08.2005, Бюл. № 8.

57. Юхименко Н. П. Сушка термолабильных порошкообразных материалов в аппаратах взвешенного слоя / Н. П. Юхименко // Матеріали науково-технічної конференції викладачів, співробітників, аспірантів і студентів інженерного факультету: конференція присвячена Дню науки України та 60-річчю СумДУ. – Суми, 2008. – Ч. 1. – С. 51–52.

58. Шандыба Н. А. Эффективная технология противоточной сушки

термолабильных материалов / Н. А. Шандыба, Н. П. Юхименко // Научное творчество и интеллектуальный потенциал : опыт и перспективы развития: сб. докл. Междунар. науч.-практ. конф. специалистов послевузовской подготовки.– Усть-Каменогорск, 2011. – Ч. 1. – С. 3–4.

59. Шандыба Н. О. Застосування методів оптимізації в енергозберігаючих технологіях / Н. О. Шандыба, М. П. Юхименко, В. О. Герасименко // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2009. – № 1 (20). – С. 125–128.

60. Шандыба Н. О. Структурний аналіз втрат в технологічних процесах переробки сільськогосподарської продукції / Н. О. Шандыба, М. П. Юхименко // Проблеми енергоефективності та якості в процесах сушіння харчової сировини : збірник тез доповідей Всеукраїнської науково-практичної конференції. – Харків, 2011. – С. 101–102.

61. Бурдо О. Г. Пути повышения энергетической эффективности при сушке дисперсных продуктов / О. Г. Бурдо, Ю. А. Казмирук // Проблемы региональной энергетики. – 2008. – № 1. – С. 1–7.

62. Бурдо О. Г. Сушити горох варто за економними технологіями / О. Г. Бурдо, І. В. Безбах, В. І. Донкоглов, Ю. О. Казмірук // Зерно і хліб. – 2007. – № 1. – С. 46–47.

63. Малин Н. И. Энергосберегающая сушка зерна / Малин Н. И. – М.: Колос, 2004. – 240 с.

64. Артюхова Н. О. Багатоступеневе сушіння дисперсних матеріалів у зваженому шарі в апаратах поличного типу / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – Суми, 2012. – Ч. 2. – С. 148–149.

65. Кирпа М. Я. Прийоми енергозбереження в технології сушіння насіння кукурудзи / М. Я. Кирпа, Н. О. Пащенко // Агроном : Науково-виробничий журнал. – 2011. – № 3. – С. 86–89.

66. John S. Roberts. Drying kinetics of grape seeds / John S. Roberts, David

R. Kidd, Olga Padilla-Zakour // *Journal of Food Engineering*. – 2008. – № 89. – P. 460–465.

67. Обезвоживание растворов в кипящем слое / [Каганович Ю. Я., Налимов С. П., Гольцинкер А. Д. и др.]; под ред. Тодеса О. М. – М.: Металлургия, 1973. – 288 с.

68. Rudobashta S. P. Investigation of the heat- and mass transfer at convective drying of capillary porous materials in a stationary layer / S. P. Rudobashta,

A. G. Zlobin // *Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*.

– 1997. – P. 335–341.

69. Нагорнов С. А. Разработка методов расчёта процессов и создание оборудования для переработки изделий в псевдооживленных и циркуляционных средах: дисс. ...доктора. техн. наук: 05.17.08 / Нагорнов Станислав Александрович. – Тамбов, 2004. – 424 с.

70. Кирсанов В. А. Научные основы и принципы совершенствования процессов и аппаратов каскадной пневмоклассификации сыпучих материалов: дисс. доктора техн. наук: 05.17.08 / Кирсанов Виктор Александрович. – Новочеркасск, 2005. – 391 с.

71. Barsky E. Master curve of separation processes / E. Barsky, M. Barsky // *Physical Separation in Science in Engineering*. – 2004. – Vol. 13, № 1. – P. 1–13.

72. Артюхова Н. О. Гравітаційні поличні апарати для сушіння зернистих матеріалів / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко, М. О. Кочергін // *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. – 2012. – № 17 (188). – С. 234–239.

73. Юхименко Н. П. Производство калийных минеральных удобрений. Сушка и обеспыливание хлорида калия / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // *Хімічна промисловість України*. – 2014. – № 3. – С. 59–61.

74. Юхименко Н. П. Сушка термолабильных пищевых и зерновых продуктов в аппаратах взвешенного слоя / Н. П. Юхименко // *Вісник Сумського*

національного аграрного університету. Серія "Механізація та автоматизація виробничих процесів". – 2008. – № 3 (19). – С. 107–111.

75. Юхименко Н. П. Аммонизированный суперфосфат. Основные направления энергосбережения при классификации и охлаждении / Н. П. Юхименко, С. В. Вакал // Хімічна промисловість України. – 2009. – № 6. – С. 50–52.

76. Донат Е. В. Аппарат с наклонными перфорированными полками для обеспыливания подсыпочных материалов / Е. В. Донат, В. Д. Вернидуб, В. А. Кирсанов и др. // Цветные металлы. – 1977. – № 4. – С. 44–46.

77. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження гідродинаміки руху потоків на каскаді полиць у багатоступінчастих гравітаційних сушарках / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2013. – № 1. – С. 42–51.

78. Пен Р. З. Планирование эксперимента в Statgraphics / Пен Р. З. – Красноярск: СибГТУ – Кларетианум, 2003. – 246 с.

79. Бэйнз А. Организация исследований в химической промышленности. Условия, цели и стратегия / Бэйнз А., Бредбери Ф., Саклинг С.; пер. с англ. В. Воронина – М.: Химия, 1974. – 336 с.

80. Батунер Л. М. Математические методы в химической технике / Л. М. Батунер, М. Е. Позин. – Л.: Химия, 1971. – 824 с.

81. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента / Шенк Х.; пер. с англ. Коваленко Е.Г. – М.: Мир, 1972. – 381 с.

82. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке. Методы планирования эксперимента / Н. Джонсон, Ф. Лион; пер. с англ. Э. К. Лецкого, Е.В. Марковой. – М.: Мир, 1972. – Т.2. – 516 с.

83. Винарский М. С. Планирование эксперимента в технологических исследованиях / М. С. Винарский, М. В. Лурье. – К.: Техніка, 1975. – 168 с.

84. Манасян С. К. Принципы конвективной сушки зерна / С. К. Манасян // Вестник КрасГАУ. – 2008. – № 6. – С. 145–150.

85. Лыков А. В. Теория переноса энергии и вещества / А. В. Лыков, Ю. А.

Ми- хайлов. – Минск: Издательство АН БССР, 1959. – 332 с.

86. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.

87. Шандиба Н. Методика рекуррентного розрахунку поличної гравітаційної сушарки сипких матеріалів / Н. Шандиба, М. Юхименко // Тринадцята наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2011». – Львів, 2011. – С. У39.

88. Артюхова Н. О. Математична модель кінетики сушіння зернистих матеріалів у гравітаційних поличних апаратах / Н. О. Артюхова, М.П. Юхименко // I Міжнародна науково-технічна конференція «Хімічна технологія: наука та виробництво»: збірник тез доповідей. – Шостка, 2012. – С. 99.

89. Лыков А. В. Тепломассобмен: Справочник / Лыков А. В. – М.: Энергия, 1972. – 560 с.

90. Фролов В. Ф. Моделирование сушки дисперсных материалов / Фролов В. Ф. – Л.: Химия, 1987. – 208 с.

91. Иванов В. Е. Сушка дисперсных материалов в сушилке кипящего слоя не- прерывного действия: дисс. ...канд. техн. наук: 05.17.08 / Иванов Виталий Ев- геньевич. – Иваново, 2010. – 121 с.

92. Юдаев Б. Н. Теплопередача / Юдаев Б. Н. – М.: Высшая школа, 1981. – 319 с.

93. Лыков А. В. Теория тепло- и массопереноса / А. В. Лыков, Ю. А. Михайлов. – М.; Л.: Госэнергоиздат, 1963. – 536 с.

94. Шрайбер А. А. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твёрдым поли- дисперсным веществом / Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. – К.: Наукова думка, 1980. – 252 с.

95. Годес О. М. Аппараты с кипящим зернистым слоем: Гидравлические и теп- ловые основы работы / О. М. Годес, О. Б. Цитович – Л.: Химия, 1981. – 295 с.

96. Нигматулин Р. И. Динамика многофазных сред / Р.И. Нигматулин. –

М.: Наука, 1987. – Ч.1 – 464 с.

97. Годунов С. К. Элементы механики сплошных сред и законы сохранения / С. К. Годунов, Е. И. Роменский – М.: Научная книга, 1998. – 280 с.

98. Артюхова Н. О. Визначення аеродинамічних характеристик гравітаційної поличної сушарки / Н. О. Артюхова // Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів». – 2012. – № 6 (24). – С. 76–81.

99. Шандиба Н. О. Методика рекурентного розрахунку гравітаційної поличної сушарки / Н. О. Шандиба, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – Вип. 39, Т. 2. – С. 44–48.

100. Романков П. Г. Экстрагирование из твердых материалов / П. Г. Романков, М. И. Курочкина – Л.: Химия, 1983. – 256 с.

101. Артюхова Н. О. Застосування температурно-вологісної апроксимації в розрахунках багатоступеневих сушарок / Н. О. Артюхова // Таврійський державний агротехнологічний університет. – 2013. – Вип. 13, Т. 1. – С. 87–95.

102. Шандиба О. Б. Оптимізація технологічних характеристик багатоступеневої гравітаційної сушарки / О. Б. Шандиба, Н. О. Артюхова // VIII Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення». – Алушта 2012. – Т. 2. – С. 282–285.

103. Артюхова Н. А. Повышение эффективности обработки зернистых материалов во взвешенном слое / Н. А. Артюхова, А. Е. Артюхов // Инновационные технологии в производстве, науке и образовании: сборник трудов II Международной научно-практической конференции. – Махачкала, 2012. – Ч. 2. – С. 49–55.

104. Артюхова Н. О. Визначення оптимальної конструкції та раціонального режиму роботи гравітаційних поличних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Хімічна промисловість України. – 2013. – № 3 (116). – С. 62–67.

105. Володин В. П. Экструзия профильных изделий из термопластов /

Володин В. П. – Спб.: Профессия, 2005. – 480 с.

106. Artyukhova N. Simulation of the particle motion in devices with vertical sectioning of workspace / N. Artyukhova, M. Yuhimenko, O. Shandyba, A. Artyukhov // Ukrainian Food Journal. – 2014. – Vol. 3, issue 3. – P. 446–453.

107. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів / В. М. Атаманюк, Я. М. Гумницький. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 276 с.

108. Артюхова Н. О. Експериментальне дослідження кінетики видалення вологи з зернистих матеріалів в багатоступеневій гравітаційній поличній сушарці / Н. О. Артюхова // Наукові праці ОНАХТ. – 2014. – Вип. 45, Т. 3. – С. 146–149.

109. Артюхова Н. О. Вдосконалення гідродинаміки руху потоків в гравітаційних поличних сушарках / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2013. – Вип. 43, Т. 1. – С. 94–97.

110. Пат. 74070 Україна, МПК F 26 В 3/02, F 26 В 17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхова Н. О., Юхименко М. П., Артюхов А. Є., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет.– № u201205954; заявл. 16.05.2012; надрук. 10.10.2012, Бюл. № 19.

111. Пат. 81720 Україна МПК F 26 В3/02, F 26 В17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхова Н. О., Юхименко М. П., Артюхов А. Є., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет.– № u201300468; заявл. 14.01.2013; надрук. 10.07.2013, Бюл. № 13.

112. Пат. 92423 Україна, МПК F 26 В 3/02, F 26 В 17/12. Пристрій для сушіння дисперсних матеріалів / Артюхов А. Є., Артюхова Н. О., Шандиба О. Б.; заявник та патентовласник Сумський державний університет. – № u201403403; заявл. 03.04.2014; надрук. 11.08.2014, Бюл. № 15.

113. Артюхова Н. О. Вдосконалення конструкції поличних контактів багатоступеневих гравітаційних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали III Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції. – Суми, 2014. – Ч. 2. – С. 91.

114. Артюхова Н. О. Розробка методики інженерного розрахунку гравітаційних поличних сушарок / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // XIV Наукова конференція «Львівські хімічні читання – 2013». – Львів, 2013. – С. У83.

115. Артюхова Н. О. Обґрунтування методики визначення енергоефективності гравітаційної поличної сушарки для зернистих матеріалів / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2014. – Т. 3. – С. 95–99.

116. Артюхова Н. О. Оптимізація процесу взаємодії дисперсних потоків в гравітаційних тепломасообмінних апаратах / Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко // Технологія 2012 : матеріали міжнародної науково-технічної конференції. – Севе- родонецьк, 2012. – С. 159–160.

117. Артюхова Н. А. Оценка энергетической эффективности многоступенчатой конвективной сушки концентратов и минерального сырья / Н. А. Артюхова, А. Б. Шандыба, А. Е. Артюхов // Научный вестник Национального горного университета. – 2014. – № 1. – С. 92–98.

118. Артюхова Н. А. Опытнo-промышленное внедрение гравитационных полоч- ных сушилок зернистых материалов / Н. А. Артюхова, Н. П. Юхименко // Ма- териалы Международной научно-практической конференции молодых уче- ных.– Горки, 2013. – Ч. 1. – С. 232–234.

119. Артюхова Н. О. Вплив організації руху сушильного агента на якість сушіння матеріалів у гравітаційних поличних апаратах / Н. О. Артюхова, М. П. Юхименко // Наукові праці ОНАХТ. – 2012. – Вип. 41, Т. 2. – С. 233–237.