

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-359-31>

УДК 66.047.37+66.047.57+66.047.58:661.872.953:681.518

КІРНИЙ ВЯЧЕСЛАВ

Сумський державний університет

<https://orcid.org/0009-0007-2168-3882>

e-mail: v.kirnyi@pohnp.sumdu.edu.ua

ЮХИМЕНКО МИКОЛА

Сумський державний університет

<https://orcid.org/0000-0002-1405-1269>

e-mail: m.yukhymenko@pohnp.sumdu.edu.ua

РОЗРОБКА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО СТЕНДА З СИСТЕМОЮ КОНТРОЛЮ ТА РЕГУЛЮВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ СУШІННЯ ТЕРМОЛАБІЛЬНИХ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ В ГОРИЗОНТАЛЬНОМУ АПАРАТІ КИПЛЯЧОГО ШАРУ

У статті представлено результати розробки експериментального стенда з системою контролю та регулювання параметрів процесу сушіння термолабільних дисперсних матеріалів в горизонтальному апараті киплячого шару. Обґрунтовано необхідність проведення фізичного експерименту досліджень оптимальних параметрів цього процесу. Поставлено вимоги до будови стенда, проведено обґрунтування технологічної схеми, визначено технічні характеристики обладнання, діапазон технологічних параметрів. Розглянуто конструкцію апарату, комплектацію стенда технологічним та допоміжним обладнанням.

Моделлю матеріалом обрана вологу полідисперсну суміш піску кварцового. Цільовим завданням для розробки стенда визначено вивчення кінетики процесу сушіння залізо(II) сульфат гептагідрату (залізного купоросу) до моногідратної форми.

У статті розглянуто перелік контрольованих та регульованих параметрів для проведення періодичного та безперервного процесу сушіння дисперсних матеріалів поставлено вимоги для системи контрольно-вимірювальних приладів та визначено склад елементів системи, розроблено схему з багатоканальним моніторингом. Розглянуто переваги та недоліки системи. Вирішене завдання контролю параметрів температури, вологовмісту матеріалу та сушільного агента на вході та виході з апарату, контролю витрати та тиску сушільного агента у визначених схемою позиціях. Виконано аналіз та запропоновано аналоги контрольно-вимірювальних приладів. Вирішено завдання з розробки принципової електричної системи, її складу та електричного регулювання параметрів витрати вологого матеріалу та температури сушільного агента. Надано рекомендації щодо обсягів додаткового лабораторного контролю дисперсного матеріалу. Визначено перспективи та напрямки подальшого удосконалення схеми та напрямки її автоматизації. Представлено аналіз гранулометричного складу піску (моделю матеріалу) та залізного купоросу, визначено еквівалентний діаметр матеріалів, представлені дані зміни гранулометричного складу модельного матеріалу у визначеному діапазоні швидкості зважувального агента.

Результати розробки експериментального стенда з системою контролю та регулювання параметрів процесу сушіння термолабільних дисперсних матеріалів у горизонтальному апараті киплячого шару є основою для подальшого корелювання та вдосконалення математичної моделі, а також оптимізації технологічних параметрів режимів процесу.

Ключові слова: конвективне сушіння, експериментальний стенд, система контролю.

KIRNYI VIACHESLAV, YUKHIMENKO MYKOLA

Sumy State University

DEVELOPMENT OF AN EXPERIMENTAL STAND WITH A SYSTEM FOR CONTROLLING AND REGULATING THE PARAMETERS OF THE DRYING PROCESS OF THERMOLABILE DISPERSED MATERIALS IN A HORIZONTAL FLUIDIZED BED APPARATUS

The article presents the results of developing an experimental stand with a system for controlling and regulating the drying process parameters of thermolabile dispersed materials in a horizontal fluidized bed apparatus. The necessity of conducting a physical experiment to research the optimal parameters of this process is justified. The requirements for the stand structure are defined, the technological scheme is justified and the technical characteristics of the equipment and range of technological parameters are determined. The design of the apparatus and the configuration of the stand with technological and auxiliary equipment are considered.

A moist polydisperse mixture of quartz sand was selected as the model material. The objective of developing the stand was to study the kinetics of the drying process of iron(II) sulphate heptahydrate (iron vitriol) to its monohydrate form.

The article considers a list of controlled and regulated parameters for periodic and continuous drying of dispersed materials. It sets out the requirements for the control and measurement instrumentation system and determines the composition of its elements. It also develops a multi-channel monitoring scheme and considers the system's advantages and disadvantages. The tasks of controlling the temperature and moisture content of the material and the drying agent at the inlet and outlet of the apparatus and controlling the flow rate and pressure of the drying agent at the specified positions have been solved. An analysis has been performed, and equivalents of the control and measurement instruments have been proposed. The task of developing a basic electrical system and its composition, as well as the electrical control of wet material flow parameters and drying agent temperature, has been completed. Recommendations have been made regarding the scope of additional laboratory control of the dispersed material. Prospects and directions for the further improvement and automation of the scheme have been determined. The analysis of the particle size distribution of sand (the model material) and iron sulphate was presented, and the equivalent diameters of the materials were determined. Data on the changes in the particle size distribution of the model material within a specified range of weighing agent speeds was also presented.

The results of developing an experimental stand with a system for controlling and regulating the drying process parameters of thermolabile dispersed materials in a horizontal fluidized bed apparatus form the basis for further correlation and improvement of the mathematical model, as well as optimisation of the technological process parameters.

Keywords: convective drying, experimental stand, control system.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сушіння дисперсних матеріалів, зокрема кристалогідратів, є важливим технологічним процесом у хімічній, фармацевтичній та харчовій промисловостях. Особливу увагу науковців привертають процеси сушіння в апаратах киплячого шару, які забезпечують високу інтенсивність тепло- та масообміну завдяки інтенсивній турбулентній динаміці руху газу та частинок. Матеріал, що висушується, обдувається потоком гарячих газів, які одночасно є й теплоносієм і транспортним засобом для відведення пари вологи, що видаляється. Але киплячий шар має ряд недоліків, серед яких недостатня гідродинамічна стійкість та складна гідродинамічна модель – характеристика структури потоків в апараті, що відображає умови перемішування. Для практичних цілей застосування киплячого шару в процесі сушіння дуже важливо визначити гідродинамічні параметри (гідрравлічний опір шару, критичну швидкість потоку газу, швидкість витання (винесення), швидкості початку та закінчення стійкої роботи, а також порізність шару), що відповідають оптимальним умовам для визначеного дисперсного матеріалу.

Свою чергою перебіг процесу сушіння зокрема перенесення тепла і вологи як всередині матеріалу, так і в пограничному шарі на межі розподілу фаз буде визначатись не лише гідродинамічними параметрами киплячого шару, а й фізико-хімічними властивостями матеріалу, температурним режимом та іншими чинниками. Сушінню піддаються вологі матеріали з різними властивостями, знання яких дозволяє вірно вибрати найбільш раціональний режим. Властивості матеріалу значною мірою визначаються формами зв'язку вологи, що вони містять і значною мірою впливають на перебіг процесу сушіння в киплячому шарі. Дегідратація матеріалу з хімічно зв'язаною вологою молекулярних сполук типу кристалогідратів має певні особливості при проведенні процесу.

Особливо важко при розв'язанні задачі про теплообмін та масообмін в киплячому шарі описати граничні умови процесу, що враховують сили взаємодії частинок, що рухаються, з потоком середовища, руйнування енергії зв'язку в кристалогідратах, перенесення тепла та вологи. Єдиною можливістю зараз для отримання критеріальних залежностей теплообміну та масообміну між частинками та середовищем в киплячому шарі є експериментальні дослідження.

Аналіз досліджень та публікацій

В чималій кількості робіт представлено методики та обладнання для експериментального дослідження системи газ-тверді частинки в умовах киплячого шару. В роботі [1] представлено схему з лабораторним вертикальним реактором зі зваженим шаром для тестування хімічної реакційної здатності твердих частинок. Схема оснащена пристроями, що дозволяють змінювати газові умови в реакторі, імітуючи секцію або частину більшої системи. В роботі [2] представлено експериментальну установку з вертикальним циркулюючим зваженим шаром для дослідження характеристик горіння. В роботі [3] представлено експериментальну установку для дослідження та моделювання сушіння частинок у горизонтальному зваженому шарі. В роботі [4] описано побудову пілотної установки для дослідження винесення частинок зі зваженого шару. Для вивчення процесу випаювання вапняку у зваженому шарі багатосекційного апарату побудована експериментальна установка, представлена в роботі [5]. В ній також представлено обґрунтування вибору кількості та типу пристроїв для вимірювання температури, тиску, витрати повітря та реєстрації їх показників. Отже, кожне з цих та інших досліджень має свою специфіку процесів зважування та сушіння матеріалів, способів реалізації цих процесів в умовах лабораторних досліджень. Завдяки поєднанню теоретичних та експериментальних методів такі дослідження дозволяють не лише підтвердити фізичні закономірності процесу, а й отримати уточнені чисельні значення коефіцієнтів, необхідних для коригування математичної моделі.

Формулювання цілей статті

Мета роботи – розробка експериментального стенда з системою контролю та регулювання параметрів процесу сушіння термолабільних дисперсних матеріалів в горизонтальному апараті киплячого шару для верифікації математичної моделі та визначення оптимальних параметрів процесу.

Виклад основного матеріалу

Цільовим для розробки стенда визначено залізо(II) сульфат гептагідрат (залізний купорос) за ДСТУ 2463-94 “Купорос залізний технічний. Технічні умови”.

Залізний купорос – багатотоннажний відхід виробництва пігментного двоокису титану сульфатним методом, перероблення якого залишається проблемою, особливо для підприємств, що розташовані поодаль від природних місць, де його можна складувати або скидати [6]. Шляхи утилізації купоросу визначаються наявністю в його складі цінного компоненту – заліза. Поширеною практикою є перероблення гептогідрату заліза у тетрагідратну, моногідратну або ангідратну форми шляхом сушіння в апаратах киплячого шару. Сушіння проходить в три етапи. В дослідженні [7] зазначено, що існують три плато, що вказують на тристадійний процес дегідратації купоросу до ангідратної форми через тетра- та моногідратну форми. Остання може бути визначена вже як кінцевий продукт. Однією з технологічних проблем організації процесу є інтенсивне видалення з матеріалу значної кількості вологи на першому етапі при виділенні трьох молекул води з кристалогідрата. Це може спричинити порушення гідродинамічного режиму зваженого шару. В промислових установках ця

проблема часто вирішується змішуванням гептогідратної форми вихідного матеріалу та моно гідратної продукційної форми при подачі матеріалу в сушарку, що може призводити до додаткових енергетичних витрат.

Для дегідратації сульфату заліза широко застосовуються барабанні сушарки та горизонтальні сушарки киплячого шару. Останні мають перевагу в інтенсивності операції зневоднення та відсутності додаткової грануляції, яка призводить до уповільнення процесу. Конструкції сушарок киплячого шару поділяють на однокамерні та багатокамерні, горизонтальні або вертикальні, циліндричні або прямокутні. Горизонтальні одно- та багатокамерні сушарки знайшли широке застосування в процесах дегідратації кристалогідратів [8, 9].

Методологія дослідження процесу дегідратації залізного купоросу в киплячому шарі базується на поєднанні математичного та фізичного моделювання, що дозволяє отримати комплексне уявлення про кінетику процесу, закономірності тепло- та масообміну, а також розробити ефективні режими сушіння.

Моделювальним матеріалом в дослідженні обрано вологу полідисперсну суміш піску кварцового за ДСТУ Б.В.2 7-32-95 “Будівельні матеріали. Пісок щільний природний для будівельних матеріалів, виробів, конструкцій і робіт. Технічні умови”. Підставами для його вибору є наступні. Кварцовий пісок – інертний, термічно стабільний і не дегідратується або розкладається в робочому інтервалі температур сушіння залізного купоросу. Це дозволяє відокремити динаміку та тепло- й масообмін від дегідратаційної кінетики, які властиві на I стадії з виділенням 3 молекул води. Пісок суттєво зменшує корозійні ризики та аварійні сценарії в широкому діапазоні швидкості зважування. Також, пісок дає базу для подібності за безрозмірними критеріями та матеріальними й тепловими балансами. Крім того, підбираючи фракцію піску можна цілеспрямовано зіставити швидкості зважування з цільовими для кристалічного залізного купоросу, який у практичних фракціях має схожі фізичні характеристики частинок.

Дослідження проводиться у два основні етапи: математичне моделювання, що базується на чисельних методах розрахунку та фізичному експерименті, що реалізується через лабораторні та процесні дослідження, спрямовані на отримання емпіричних параметрів. Фізичний експеримент включає лабораторні випробування, що проводяться у контрольованих умовах та спрямовані на отримання фундаментальних характеристик сушіння дисперсного матеріалу та дозволяють моделювати процес дегідратації кристалогідратів в умовах киплячого шару. Всі випробування мають реалізовуватись в ітераційній схемі, коли результати лабораторних випробувань використовуються для коригування подальших стендових досліджень, а отримані дані застосовуються для уточнення математичної моделі процесу.

Дослідження процесу сушіння залізного купоросу в горизонтальному апараті киплячого шару було поділено на блок лабораторного контролю матеріалу та блок дослідження процесу сушіння в апараті киплячого шару лабораторної установки.

Лабораторний контроль дозволяє отримати дані про зміни фізико-хімічних та теплофізичних характеристик матеріалу до та після сушіння з метою оцінки ефективності процесу. Лабораторні вимірювання відрізняються від промислових високої точністю завдяки застосуванню більш удосконалених методів і приладів та обліку можливих похибок. У цій роботі визначено основні напрямки лабораторного контролю: оцінка гранулометричного складу (визначення розподілу часток за розмірами до та після сушіння), контроль змін морфології частинок, виявлення агломерації, деструкції або зміни форми частинок після висушування, визначення вмісту вологи, контроль залишкової вологи, оцінка змін у хімічному складі, контроль вмісту активних компонентів домішок та можливих побічних реакцій під час сушіння.

Аналіз гранулометричного складу модельного та цільового матеріалів представлено на рис. 1.

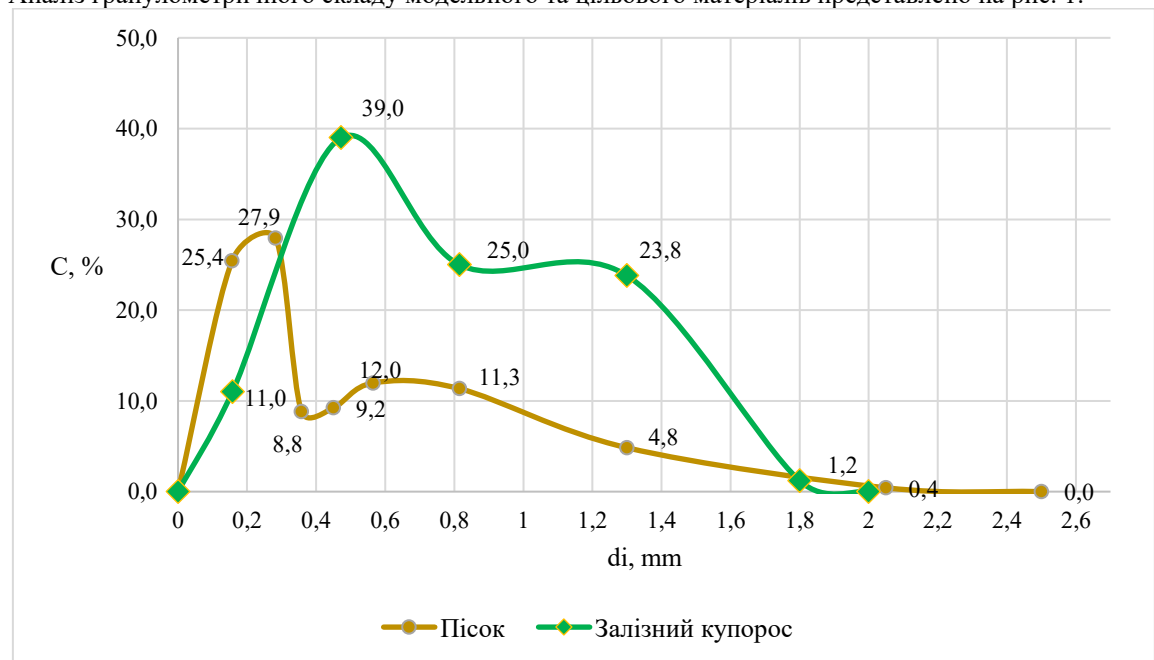


Рис. 1. Диференціальні криві розподілу частинок матеріалів

Діаметр еквівалентний, визначений як середньозважений, для піску склав 0,42 мм, залізного купоросу – 0,5 мм, вміст вільної вологи визначено для обох матеріалів на рівні 2%, кристалізаційної вологи залізного купоросу - 37%. Детальні фізико-хімічні властивості залізного купоросу наведено в роботі [10].

Перехід від результатів лабораторного контролю до лабораторних досліджень базується на необхідності перевірки результатів у складних гідродинамічних умовах киплячого шару, де мають місце колективні ефекти взаємодії часток турбулентних потоків сушильного агента та фазові перетворення з утворенням градієнтів температури та вологості.

Лабораторні дослідження на експериментальному стенді дозволяють перевірити математичну модель в умовах, наближених до реальних виробничих процесів, а саме оцінити вплив гідродинамічних параметрів киплячого шару на рівномірність дегідратації, визначити особливості розподілу температури, вологості та швидкості потоку сушильного агента у різних визначених умовах. Виходячи з обмежень лабораторних досліджень фізичний експеримент на лабораторному стенді повинен забезпечити відтворення реальних умов сушіння у киплячому шарі, вимірювання динамічних характеристик зваженого шару (висоти шару, перепаду тиску сушильного агента на шарі зваженого матеріалу), температурного поля киплячого шару, контроль та регулювання параметрів витрати матеріалу та сушильного агента.

Опис експериментального стенда. Для проведення досліджень була розроблена та виготовлена експериментальна установка, що забезпечує реалізацію необхідних режимів сушіння та контроль основних параметрів процесу.

Склад експериментального стенда: бункер вихідного матеріалу (1), гвинтовий конвеєр (2), апарат киплячого шару (3), бункер кінцевого матеріалу (4), дуттьовий вентилятор (5), електрокалорифер (6) та ступенева газоочисна система, що включає циклон з бункером пилу (7), тканевий фільтр (8), витяжний вентилятор (9) і тканевий фільтр (10). Технологічну схему стенду представлено на рис. 2.

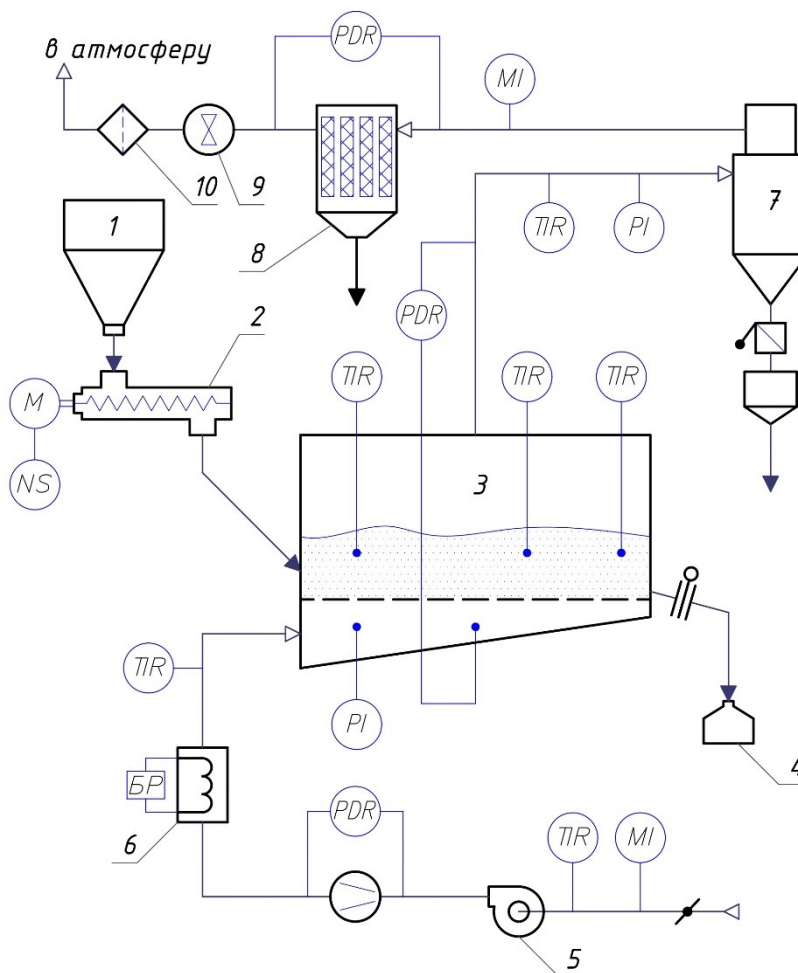


Рис.2. Технологічна схема експериментального стенду

Конструкція установки дозволяє проводити процес сушіння, змінювати параметри сушіння, забезпечувати контроль та реєстрацію параметрів процесу та створює умови для отримання достовірних експериментальних даних. Компонувальні рішення стенда представлені на рис. 3. Конструкція апарату киплячого шару складається з корпусу, газорозподільчої камери, газорозподільчої решітки 400x50мм, кришки, патрубків вводу та виводу матеріалу та сушильного агента, закладних конструкцій для контрольно-вимірювальних приладів.



Рис.3.Компоновка експериментального стенда

Контрольно-вимірювальні прилади та реєстратори.

Гетерогенна структура вологого дисперсного середовища, що досліджується, фазові перетворення в матеріалі та локальні градієнти температури потребують застосування сучасних контрольно-вимірювальних приладів, реєстраційних систем та пристроїв регулювання, які мають забезпечити точний аналіз процесу та коригування режимів сушіння. Контрольно-вимірювальні прилади забезпечують моніторинг ключових параметрів сушіння, зокрема температури, вологості, тиску та швидкості потоків матеріалу та сушильного агента.

Контроль та реєстрація температури.

Температурний режим суттєво впливає на кінетику дегідратації оскільки визначає інтенсивність випаровування хімічно зв'язаної води та впливає на стан зваженого шару, кінцеву якість висушеного продукту. Контроль температури є критично важливим для забезпечення стабільності сушильного процесу, оптимізації енергоспоживання, запобігання температурному пошкодженню термочувливих матеріалів, забезпечення рівномірного висушування матеріалу. Вимірювання температури у ключових точках апарату дозволяє отримати температурний профіль потоків у киплячому шарі. Визначено доцільним вимірювання температури в експериментальній установці в шести місцях (рис. 1): на повітро-забірному трубопроводі дуттьового вентилятора, під газорозподільною решіткою апарату, три точки над газорозподільною решіткою на висоті середини киплячого шару, на виході газу з апарату. Окрім цього лабораторними методами контролюється температура на вході матеріалу та на виході матеріалу з апарату.

Для безперервного контролю процесу застосовані датчики температури – термопари хромель-копель (максимальна температура вимірювання до $+600^{\circ}\text{C}$, що мають переваги у високій точності вимірювання $\pm 0,5\%$, хімічній стійкості, короткому часу відклику. Недоліком у використанні термопар хромель-копель в рамках експерименту є можлива похибка вимірювань через удари частинок матеріалу у киплячому шарі та неоднорідний розподіл температури киплячого шару в зоні встановлення датчиків через нестабільність температурного поля та високу турбулентність киплячого шару. Похибка в оцінці температури матеріалу в киплячому шарі також пов'язана з теплообміном між термопарою та потоком газу – гарячий сушильний агент інтенсивно впливає на термопару, що може призводити для переоцінки температури в зоні киплячого шару. Для підвищення точності та автоматизації контролю температури матеріалу також доцільно застосовувати платинові термометри опору (Pt100). Базовими способами зниження похибки у подальшій перспективі вдосконалення стенда є використання термопар у захисних кожухах для зменшення механічного впливу,

встановлення датчиків на різній висоті для отримання усереднених значень температури, використання засобів цифрової обробки сигналу для згладжування коливань температури.

Для контролю температури матеріалу до та після сушіння на стенді використано термометр ТЛ-2, що призначений для точного вимірювання температури в процесі лабораторних досліджень в діапазоні вимірювань 0-360°C. Вибір обґрунтовано безпекою у відношенні до хімічно-активного середовища в бункері вихідного матеріалу та стійкістю в широкому діапазоні температур, що відповідає вимогам експерименту. Для реєстрації температури в експериментальній установці передбачено прилад автоматичного слідкуючого врівноваження КСП-4И.

Контроль та реєстрація витрати повітря.

Основним завданням контролю витрати повітря є забезпечення стабільності роботи киплячого шару, підтримка визначеного гідродинамічного режиму для рівномірного сушіння частинок, оптимізація енергоспоживання, мінімізація надмірних витрат теплової енергії, контроль та корекція подачі повітря для досягнення заданих параметрів вологості кінцевого продукту.

Схемою передбачено витратомірний вузол на базі камерної витратомірної установки, що відповідає ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 "Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звукувальних пристроїв". Переваги камерної витратомірної установки: простота конструкції, довговічність, стійкість до агресивного середовища, можливість роботи з високими температурами. Недоліки - залежність точності від гідродинамічного режиму потоку.

Альтернативними, з вищою точністю вимірювання або більш бюджетними, є варіанти з ультразвуковими, вихровими, масовими термоанемометричними витратомірами.

Контроль тиску в системі.

Контроль тиску в системі апарата киплячого шару є критично важливим для забезпечення стабільності процесу сушіння. В схемі застосовано двотрубні U-подібні манометри. Використання U-подібних манометрів для вимірювання тиску в різних точках системи є традиційним і широко застосованим методом у промисловості. Перевагами U-подібних манометрів є простота конструкції та експлуатації, надійність та довговічність, низька вартість. U-подібні манометри не потребують складного обслуговування, показання легко зчитуються дослідником, відсутність рухомих частин знижує ймовірність механічних поломок та забезпечує тривалий термін служби приладу. U-подібні манометри є ефективним і недорогим рішенням для експериментальних досліджень, проте їх неможливо інтегрувати в автоматизовані системи. Вони мають обмежену точність вимірювань, похибки, пов'язані з людським фактором при зчитуванні показань.

Контроль вологості повітря сушильного агента.

У процесах конвективного сушіння контроль вологості сушильного агента є важливим для оцінки інтенсивності процесу в масоперенесення. Вологість повітря на вході в апарат киплячого шару впливає на кінетику сушіння та енергетичні витрати та якість кінцевого продукту. Для вимірювання вологості повітря на забірному повітропроводі лабораторного стенда застосовано термогідрометр TROTECBZ05. Контроль вологості повітря на виході з апарату киплячого шару контролюється датчиком вологості та температури GY-21 HTU21. На відміну від деяких електронних приладів, GY-21 HTU21 не потребує частого калібрування, що спрощує їх обслуговування.

Регулювання параметрів.

Регулювання подачі матеріалу в апарат. Дозування вологого матеріалу в апарат має на меті максимально ефективно використати сушильний об'єм, визначити максимальну продуктивність установки та запобігти порушенню режиму зважування. В експериментальній установці застосовано гвинтовий конвеєр із приводом на основі асинхронного електродвигуна змінного струму, напруга живлення якого регулюється автотрансформатором.

Регулювання температури сушильного агента. Для нагріву сушильного агента обрано електричний спосіб. В лабораторних експериментах це обумовлено його простотою, точністю регулювання та можливістю легко змінювати параметри процесу без складних механічних модифікацій установки. Електрокалорифери не потребують складних теплообмінних систем і можуть бути легко вбудовані у невеликі експериментальні установки, вони забезпечують миттєвий запуск і точну зміну температури, що дозволяє оперативно коригувати параметри експерименту.

Для регулювання температури сушильного агента, що подається в апарат, застосована ступенева система підключення в електричну схему трубчастих електронагрівників (ТЕНів), змонтованих в конструкції електрокалорифера. Ступеневе регулювання означає, що ТЕНи вмикаються або вимикаються окремими групами, залежно від необхідної потужності. Для більш точного налаштування температури в електричній схемі живлення додатково лабораторний автотрансформатор, що дозволяє плавно змінювати напругу температуру сушильного агента у визначеному температурному діапазоні.

Регулювання витрати сушильного агента. Для реалізації функції регулювання витрати сушильного агента в експериментальній установці використано дросельні заслонки, встановлені на вході дугтьового вентилятора ВВД-5 і витяжного вентилятора відведення відпрацьованих газів.

Прийняті технічні рішення забезпечили роботу стенда у визначених діапазонах: подачі матеріалу в апарат (в середньому по вологому піску) до $5 \cdot 10^{-3}$ кг/с, температури сушильного агента в діапазоні 0-200 °C, регулювання витрати сушильного агента в діапазоні 0-0,05 м³/с. Наприклад, для модельного матеріалу проведено дослідження гідродинамічних характеристик зважування за різних швидкостей сушильного агента.

На рис. 4 представлено залежність коефіцієнта унесення модельного матеріалу від швидкості дисперсійного середовища. Представлено середньозважені еквівалентні діаметри частинок в продукті, що вивантажений з апарату та частинок, винесених з апарату в аспіраційну систему.

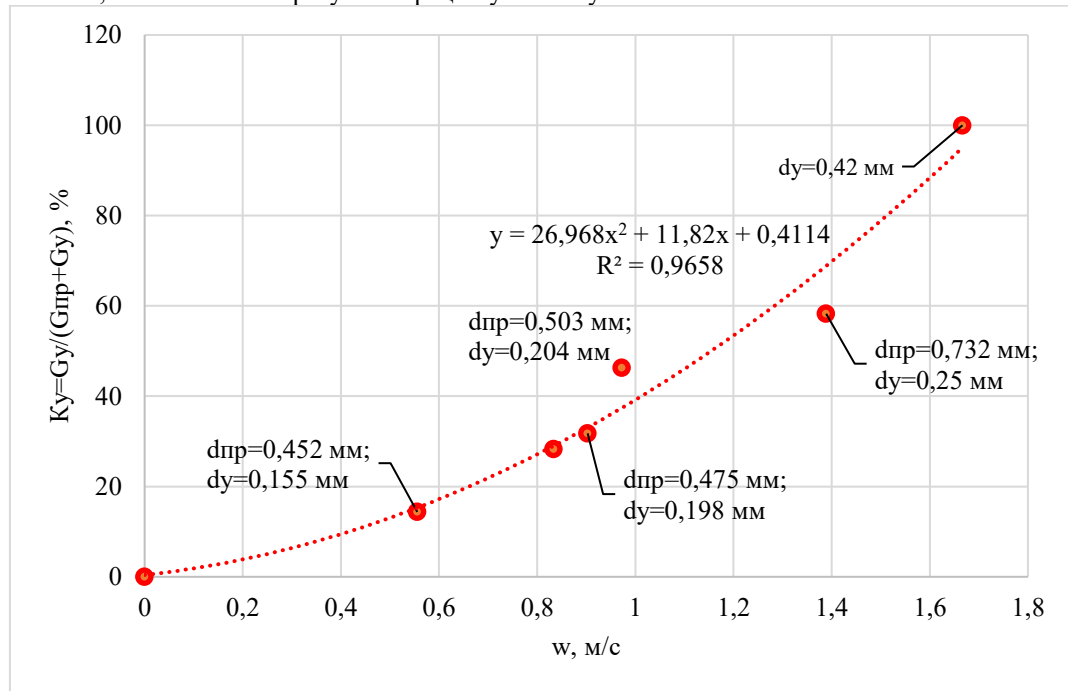


Рис. 4. Залежність коефіцієнта унесення матеріалу від швидкості зважування

Зі зростанням швидкості сушильного агента відбувається більш інтенсивне винесення дрібної фракції. Така поведінка є типовою для системи «газ-тверді частинки», коли швидкість потоку газу перевищує критичне значення, за якого сили аеродинамічного опору переважають сили тяжіння. Особливу увагу слід привернути на характер кривої: на початковому етапі збільшення швидкості залежність має майже лінійний вигляд, що відповідає режиму стабільного зважування матеріалу, де переважає рівномірна циркуляція частинок. Подальше зростання швидкості супроводжується різким підвищенням коефіцієнта унесення, що вказує на руйнування структури зваженого шару та перехід до режиму, близького до пневмотранспорту.

На рис. 5 представлено диференціальні криві розподілу частинок продукційної фракції та винесеної фракції модельного матеріалу при швидкості сушильного агента 1 м/с.

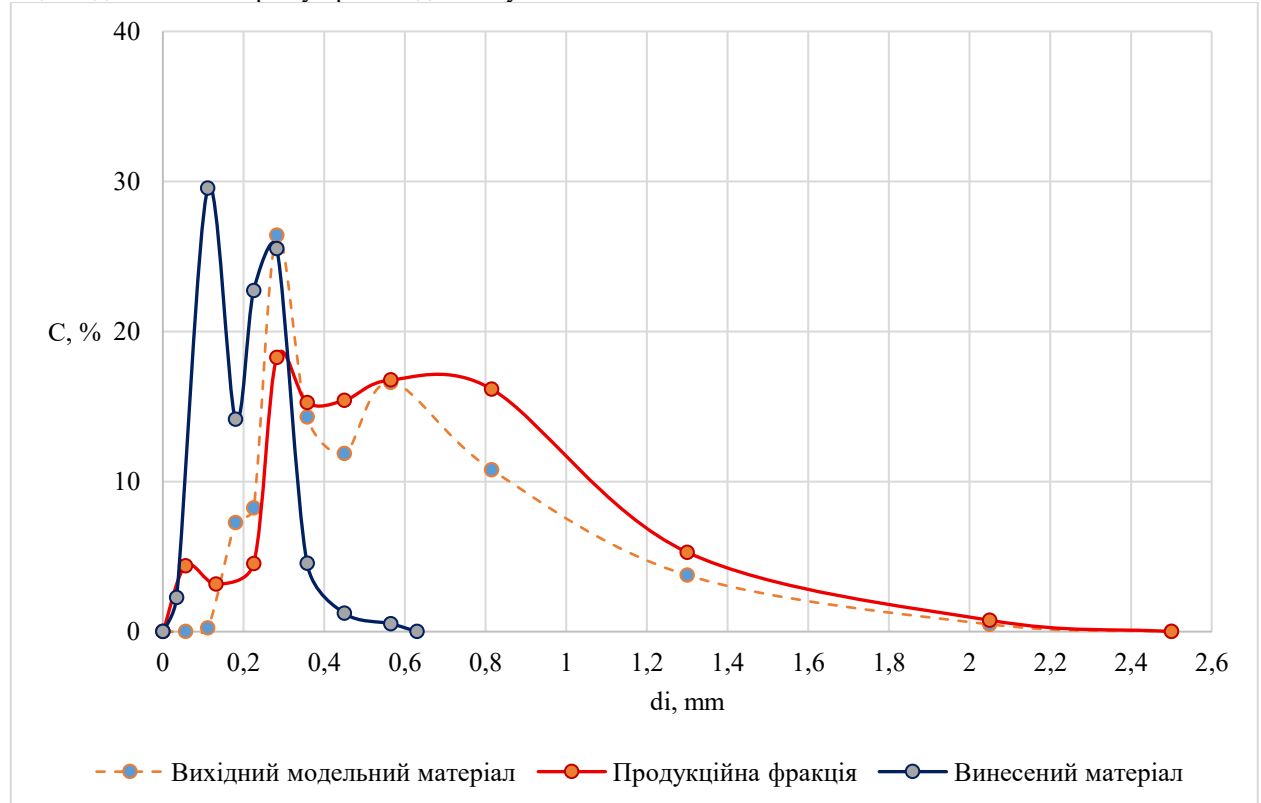


Рис. 5. Диференціальні криві розподілу частинок модельного матеріалу (1м/с)

На рис. 5 видно, що криві мають суттєво різний характер. Для продукційної фракції розподіл близький до вихідного матеріалу, тоді як для винесеної фракції спостерігається виражене зміщення в бік дрібних частинок. відповідає Ефект сепарації дрібної фракції в процесі сушіння має подвійне значення. По-перше, оскільки після процесу сушіння в апараті залишаються частинки більш однорідної гранулометрії, він покращує якість продукційного матеріалу без застосування в технологічній схемі додаткового сортувально-класифікуючого обладнання. Цей висновок збігається з дослідженнями в роботі [4]. По-друге, наявність дрібної фракції, особливо в діапазоні 0,005-0,016 мм модельного матеріалу, потребує розробки ефективної системи аспірації.

Таким чином, аналіз кривих на рис 4, 5, як окремий приклад, підтверджує доцільність використання розробленого лабораторного стенду для вивчення закономірностей режиму сушіння дисперсних матеріалів в горизонтальному апараті киплячого шару.

Перспективи автоматизації технологічного процесу.

Одним із викликів до автоматизації процесу сушіння є динамічна зміна властивостей дисперсного матеріалу в процесі обробки, що ускладнює прогнозування його поведінки. Додатково процес може ускладнитися при дегідратації кристалогідратів. На початкових етапах дегідратації, за втрати значної частини вологи, змінюються розміри частинок, їх щільність, теплопровідність, можливо утворення агломератів і нерівномірний прогрів. Це унеможливує застосування традиційних методів регулювання, таких як просте підтримання температури теплоносія або швидкості газового потоку. Необхідна адаптивна система керування, що враховує не лише вихідні параметри процесу, а й поточний стан матеріалу.

Одним із методів розв'язання цієї проблеми є застосування цифрових двійників – математичних моделей, інтегрованих у систему керування, які прогнозують зміну параметрів процесу на основі експериментальних даних та алгоритмів машинного (інтелектуального) навчання. Такі моделі враховують кінетику дегідратації, теплофізичні характеристики матеріалу, гідродинамічні особливості зваженого шару та ефективність масоперенесення. У результаті система керування може коригувати параметри технологічного режиму в реальному часі, адаптуючись до зміни властивостей матеріалу та забезпечуючи стабільність процесу.

Особливу увагу слід приділити алгоритмам регулювання температури теплоносія. Традиційні PID-регулятори, що працюють на основі зворотного зв'язку, можуть виявитися недостатньо ефективними через інерційні системи та швидкі флуктуації температури у зваженому шарі. Важливим аспектом є також регулювання швидкості газового потоку. Висока швидкість може призвести до виносу дрібнодисперсних частинок із робочої камери, що знижує ефективність сушіння та спричиняє втрати матеріалу. З іншого боку недостатня швидкість може призвести до нерівномірного розподілу температури та агломерації частинок, локальної або повної руйнації киплячого шару. Оптимальне регулювання має забезпечуватись інтеграцією системи контролю перепаду тиску в різних зонах апарату, що дозволяє автоматично коригувати швидкість потоку та підтримувати стабільний стан зваженого шару.

За наявних рекомендацій та практичного досвіду контроль кінцевої вологості матеріалу має реалізовуватись шляхом лабораторного контролю.

Розвиток автоматизації передбачає створення інтегрованих систем керування на базі промислових контролерів, що забезпечують синхронізацію всіх етапів процесу. Використання SCADA-систем дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг та керування роботою сушильною установкою аналізувати параметри процесу у реальному часі та здійснювати діагностику відхилень.

Висновки з даного дослідження

Наукова новизна роботи полягає у створенні лабораторного стенда з багатоканальною системою контролю та регулювання параметрів процесу сушіння в горизонтальному апараті киплячого шару, що має на меті забезпечення верифікації математичної моделі сушіння дисперсних матеріалів, зокрема дегідратації кристалогідратів. В роботі розроблено схему експериментального дослідження процесу, визначено ключові параметри, що підлягають контролю, реєстрації та регулюванню, а також сформульовано вимоги до технічного забезпечення експериментальної установки.

Запропоновано методику дослідження з використанням модельного матеріалу – кварцового піску, що дозволяє відокремити вплив гідродинамічних параметрів від кінетики дегідратації.

Проведено аналіз і обґрунтування вибору контрольно-вимірювальних приладів, необхідних для точного моніторингу стану киплячого шару, температурного режиму, вологості, динамічних характеристик потоків матеріалу та теплоносія. Обґрунтовано необхідність використання сучасних методів реєстрації параметрів, зокрема цифрових датчиків температури, вологомірів, манометрів і витратомірів, що дозволяють проводити безперервний контроль процесу.

Наведено принципові підходи до автоматизації процесу сушіння, визначено основні напрямки реалізації системи управління. Запропоновано структуру автоматизованої системи контролю та регулювання, яка базується на застосуванні програмованих логічних контролерів та програмних алгоритмів адаптивного регулювання параметрів процесу.

Отримані результати можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення експериментальної установки, розширення фізичного експерименту на інші матеріали, оптимізації технологічних процесів сушіння. Впровадження рішень сприятиме підвищенню ефективності досліджень, зниженню похибок вимірювань та забезпеченню високої відтворюваності експериментальних даних. Практична

значущість полягає у можливості застосування результатів для оптимізації процесів сушіння термолабільних дисперсних матеріалів та підвищення ефективності промислових апаратів киплячого шару.

Література

1. Leion H. Experimental method and setup for laboratory fluidized bed reactor testing / Henrik Leion, Volkmar Frick, Fredrik Hildor // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, no. 10. – P. 2505. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102505>.
2. Ji Z. Experimental study on the combustion and emission characteristics of thermal storage-assisted load reduction in a circulating fluidized bed / Zengcai Ji, Guoliang Song, Haiyang Wang // *Fuel processing technology*. – 2025. – Vol. 276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108263>.
3. Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed / Kaicheng Chen [et al.] // *Particuology*. – 2017. – Vol. 34. – P. 134–146. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.02.003>.
4. Study of particle discharge from a fluidized bed: experimental investigation and comparative modeling analysis / Aisel Ajalova [et al.] // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, no. 2. – P. 562. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020562>.
5. Solar calcination at pilot scale in a continuous flow multistage horizontal fluidized bed / Thibaut Esence [et al.] // *Solar energy*. – 2020. – Vol. 207. – P. 367–378. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.098>.
6. A review of the commercial uses of sulphate minerals from the titanium dioxide pigment industry: the case of huelva (spain) / Manuel Jesús Gázquez [et al.] // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11, no. 6. – P. 575. – DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060575>.
7. Wang T. Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate / Tong Wang, Kenneth A. Debelak, John A. Roth // *Thermochimica Acta*. – 2007. – Vol. 462, no. 1-2. – P. 89–93. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.07.001>.
8. *Fluid bed dryers / revolutionize drying methods* / ANDRITZ [Electronic resource] // ANDRITZ GROUP. – Mode of access: <https://www.andritz.com/separation-en/insights/fluid-bed-dryers-guide> (date of access: 28.08.2025).
9. *Fluidized bed dryers/coolers with heat exchangers WS-HF-T/K* / Allgaier Process Technology [Electronic resource] // Leading process solutions / Allgaier Process Technology. – Mode of access: https://www.allgaier-process-technology.com/en/maschine/Fluidized-Bed-DryersCoolers-with-Heat-Exchangers-WS-HF-TK_59 (date of access: 28.08.2025). – Title from screen.
10. Kirnyi V. Physical and chemical properties of iron(II) sulfate heptahydrate as factors for selecting the drying process mode in a fluidized bed apparatus / Viacheslav Kirnyi, Mykola Yukhymenko // *Technology audit and production reserves*. – 2025. – Vol. 4, no. 3(84). – P. 18–25. – DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.335323>.

References

1. Leion H. Experimental method and setup for laboratory fluidized bed reactor testing / Henrik Leion, Volkmar Frick, Fredrik Hildor // *Energies*. – 2018. – Vol. 11, no. 10. – P. 2505. – DOI: <https://doi.org/10.3390/en11102505>.
2. Ji Z. Experimental study on the combustion and emission characteristics of thermal storage-assisted load reduction in a circulating fluidized bed / Zengcai Ji, Guoliang Song, Haiyang Wang // *Fuel processing technology*. – 2025. – Vol. 276. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2025.108263>.
3. Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed / Kaicheng Chen [et al.] // *Particuology*. – 2017. – Vol. 34. – P. 134–146. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.partic.2017.02.003>.
4. Study of particle discharge from a fluidized bed: experimental investigation and comparative modeling analysis / Aisel Ajalova [et al.] // *Processes*. – 2025. – Vol. 13, no. 2. – P. 562. – DOI: <https://doi.org/10.3390/pr13020562>.
5. Solar calcination at pilot scale in a continuous flow multistage horizontal fluidized bed / Thibaut Esence [et al.] // *Solar energy*. – 2020. – Vol. 207. – P. 367–378. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.06.098>.
6. A review of the commercial uses of sulphate minerals from the titanium dioxide pigment industry: the case of huelva (spain) / Manuel Jesús Gázquez [et al.] // *Minerals*. – 2021. – Vol. 11, no. 6. – P. 575. – DOI: <https://doi.org/10.3390/min11060575>.
7. Wang T. Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate / Tong Wang, Kenneth A. Debelak, John A. Roth // *Thermochimica Acta*. – 2007. – Vol. 462, no. 1-2. – P. 89–93. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.07.001>.
8. *Fluid bed dryers / revolutionize drying methods* / ANDRITZ [Electronic resource] // ANDRITZ GROUP. – Mode of access: <https://www.andritz.com/separation-en/insights/fluid-bed-dryers-guide> (date of access: 28.08.2025).
9. *Fluidized bed dryers/coolers with heat exchangers WS-HF-T/K* / Allgaier Process Technology [Electronic resource] // Leading process solutions / Allgaier Process Technology. – Mode of access: https://www.allgaier-process-technology.com/en/maschine/Fluidized-Bed-DryersCoolers-with-Heat-Exchangers-WS-HF-TK_59 (date of access: 28.08.2025). – Title from screen.
10. Kirnyi V. Physical and chemical properties of iron(II) sulfate heptahydrate as factors for selecting the drying process mode in a fluidized bed apparatus / Viacheslav Kirnyi, Mykola Yukhymenko // *Technology audit and production reserves*. – 2025. – Vol. 4, no. 3(84). – P. 18–25. – DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2025.335323>.