

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЦЮРА НАДІЯ ЯРОСЛАВІВНА

УДК 66.047.41+539.215

ДИСЕРТАЦІЯ
СУМІСНИЙ ПРОЦЕС ФІЛЬТРУВАННЯ ТА СУШІННЯ
ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ Н.Я. Цюра

Науковий керівник

Ханик Ярослав Миколайович

доктор технічних наук, професор

Ідентичність всіх примірників дисертації

ЗАСВІДЧУЮ:

Вчений секретар спеціалізованої

Вченої ради Д 35.052.09, д.т.н., проф.

_____ /Я.Гумницький/

Львів - 2021

АНОТАЦІЯ

Цюра Н. Я. Сумісний процес фільтрування та сушіння дисперсних матеріалів. - Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології. – Національний університет «Львівська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Львів, 2021.

Важливим завданням науковців сьогодення є впровадження енергозберігаючих та екологічно безпечних методів промислового виробництва. Пошуку оптимальних варіантів здійснення процесу сушіння, який є однією з важливих стадій переважної більшості технологій переробки твердих матеріалів, присвячена дана робота. В напрямку забезпечення моделі відповідального споживання енергетичних та сировинних ресурсів проведені теоретичні й експериментальні дослідження перспективного процесу фільтраційного сушіння відходів пігментного виробництва - Ферум (II) сульфат гептагідрату (залізного купоросу) та відпрацьованого деревного борошна з метою їх подальшої утилізації, а також супутнього продукту, сировиною для якого є залізний купорос, – залізоокисного пігменту $\alpha\text{-FeO}(\text{OH})$.

Пігменти мають важливе значення в різних сферах людської діяльності. Значний вклад у ринок пігментів вносить титанова промисловість, яка має неабиякі перспективи розвитку, проте його стримують технологічні складності, капіталомісткість та енергоємність виробництв. Україна має всі передумови стати лідером в галузі титанового виробництва, маючи на своїй території замкнуті виробничі цикли, R&D центри тощо. І важливу роль тут відіграє пошук і впровадження сучасних технологій виробництва та поводження з відходами. Удосконалення процесів сушіння, які формують вартість продукції і визначають її якість, є одним із пріоритетних завдань розвитку титанової галузі. Сушіння твердих відходів виробництва пігментного TiO_2 (органічних відходів зі стадії «чорної» фільтрації - деревного борошна та побічного продукту виробництва – залізного купоросу) є важливим етапом раціональної утилізації

твердих промислових відходів, що є актуальним завданням в умовах екологічної та економічної кризи в Україні. Вирішення проблеми накопичення цих відходів дасть змогу зменшити частку забруднень ґрунтів хімічними речовинами, а також зробить внесок у розвиток ресурсозберігаючих технологій. Зважаючи на високий початковий вологовміст, підготовка до подальшого використання цих речовин пов'язана з необхідністю введення в технологічний процес обов'язкової стадії сушіння.

Сушарки, якими на сьогодні оснащені технологічні лінії промислового виробництва, є великогабаритними та енергозатратними, а також зазвичай потребують встановлення додаткового очисного обладнання. Це відображається на якості готової продукції, створює додаткові технологічні труднощі для дотримання режимів сушіння і спричиняє зростання собівартості продукту. Оптимізація та удосконалення прикінцевої стадії виробництва залізоокисних пігментів – сушіння – також відіграє важливу роль у розвитку сучасних технологій.

У дисертаційній роботі представлено обґрунтування вибору фільтраційного процесу сушіння дисперсних матеріалів, які потребують зневоднення. Цей спосіб дає змогу зменшити енергозатрати технологічного процесу та отримати продукт високої якості. Продуктами у даному випадку вважаються зневоднений до тетрагідрату Ферум (II) сульфат гептагідрат, органічні відходи виробництва TiO_2 (відпрацьоване деревне борошно) та залізоокисний пігмент. Досліджені основні закономірності гідродинаміки, тепломасообміну, кінетики та динаміки профільтровування теплового агенту крізь стаціонарний шар матеріалів. Проведені узагальнення отриманих результатів математичними методами, які дали змогу розрахувати невідомі коефіцієнти і запропонувати розрахункові залежності, відповідно до яких можна прогнозувати перебіг процесу фільтраційного сушіння в широкому діапазоні зміни параметрів шару та теплового агенту. Запропонована модель фільтраційної установки для реалізації фільтраційного методу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату до тетрагідрату, в процесі якого відбувається

відщеплення кристалізаційної вологи, а також для сушіння інших дисперсних матеріалів.

У першому розділі висвітлений критичний аналіз науково-технічної та патентно-інформаційної літератури, що описують можливі способи сушіння дисперсних матеріалів та методи дослідження цього складного тепломасообмінного процесу. На основі критичного аналізу здобутої інформації сформульовані мета і завдання досліджень.

У другому розділі показана перспективність застосування фільтраційного способу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату з метою відщеплення трьох молекул води задля отримання Ферум(II) сульфат тетрагідрату. Обґрунтовано застосування фільтраційного методу сушіння для зневоднення органічних відходів виробництва TiO_2 та залізоокисних пігментів, наведені характеристики Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту як об'єктів сушіння. Представлена схема та опис лабораторної установки для здійснення процесів зневоднення та дегідратації, викладені методики, згідно з якими проведені експериментальні дослідження й опрацьовані отримані результати.

У третьому розділі наведені результати досліджень закономірностей гідродинаміки профільтровування теплового агенту крізь стаціонарний шар Ферум(II) сульфат гептагідрату, органічних відходів виробництва Титану (IV) оксиду та залізоокисного пігменту й встановлені параметри шарів матеріалів, які мають вплив на їх гідравлічний опір. Розраховані невідомі коефіцієнти та представлені узагальнення результатів у формі безрозмірних комплексів, які дають змогу спрогнозувати енергетичні затрати на здійснення профільтровування теплового агенту крізь стаціонарний шар Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту за різних умов. Проведений порівняльний аналіз підходів до встановлення величини гідравлічного опору шару і зроблені висновки щодо застосування кожного з них.

У четвертому розділі представлені результати експериментальних досліджень впливу кінетики та динаміки зміни вологовмісту Ферум(II) сульфат гептагідрату, органічних відходів виробництва титану (IV) оксиду та залізоокисного пігменту в часі на перебіг процесу їх сушіння. Запропоновані розрахункові залежності для визначення тривалості процесу сушіння та біжучого значення вологовмісту в періодах повного та часткового насичення теплового агенту вологою. Попередньо здійснений термічний аналіз зразків вологого та висушеного Ферум(II) сульфат гептагідрату з метою встановлення закономірностей постадійного відщеплення молекул води та для розрахунку теплового ефекту фазових переходів, адже цей матеріал містить кристалічно зв'язану вологу. Наведені результати досліджень процесу теплообміну між шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату й тепловим агентом і продемонстрований вплив швидкості останнього на ефективність перенесення теплоти, а, отже, на можливість керувати процесом дегідратації.

У п'ятому розділі запрезентована й описана установка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, яка підкріплена патентом України на винахід. Наведений розрахунок основних розмірів апарата та енергетичних затрат на здійснення цього процесу. Проведений порівняльний розрахунок експлуатаційних витрат на сушіння залізного купоросу у запропонованій сушарці та у сушарці барабанного типу. Представлений економічний ефект від впровадження у виробництво фільтраційної сушарки. Запропоновано використовувати аналогічні апарати для сушіння й для інших дисперсних речовин у титановому виробництві.

Результати фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів передані ДП «Аргентум» для впровадження технологічного процесу сушіння на даному виробництві. Можливість і доцільність використання висушеного відпрацьованого деревного борошна та залізоокисних пігментів у виробництві композиційних будівельних матеріалів підтверджені ТзОВ «Галвесттрейд».

Результати наукових досліджень передані для впровадження в навчальному процесі кафедри хімічної інженерії Національного університету

«Львівська політехніка», а саме: розроблена методика розрахунку фільтраційної сушарки, для використання у лекційних, лабораторних та практичних заняттях з курсу «Процеси та апарати хімічних виробництв», а також під час курсового та дипломного проектування для студентів спеціальності 161 «Хімічні технології та інженерія».

Ключові слова: фільтраційне сушіння, дегідратація, залізний купорос, залізоокисний пігмент, титану (IV) оксид, деревне борошно, тепломасообмін, кінетика сушіння, сушильна установка.

SUMMARY

Tsiura N. Compatible process of filtering and drying of dispersed materials. – In the rights of manuscript.

Dissertation for a Candidate degree in Technical Sciences in specialty 05.17.08 - Processes and the Equipment of chemical technology competition - Lviv Polytechnic National University , Ministry of Education and Science of Ukraine. Lviv, 2021.

An important task of today's scientists is the introduction of energy-saving and environmentally friendly methods of industrial production. This work is devoted to the search for optimal options for the drying process, which is one of the important stages of the vast majority of technologies for processing solid materials. In the direction of ensuring the model of responsible consumption of energy and raw materials, theoretical and experimental studies of the promising process of filtration drying of pigment production waste - Iron (II) sulfate heptahydrate (iron sulphate) and spent wood flour for their further utilization, as well as related products which is iron sulphate - iron oxide pigment α -FeO(OH).

Pigments are important in various areas of human activity. A significant contribution to the pigment market is made by the titanium industry, which has great prospects for development, but it is constrained by technological difficulties, capital intensity and energy intensity of production. Ukraine has all the prerequisites to become a leader in the field of titanium production, having closed production cycles,

R&D centers, etc. on its territory. And an important role here is played by the search for and implementation of modern technologies for production and waste management. Improving the drying processes that shape the cost of products and determine its quality is one of the priorities of the titanium industry. Drying of solid waste from pigment TiO_2 (organic waste from the stage of "black" filtration - wood flour and by-product - iron sulphate) is an important stage of rational utilization of solid industrial waste, which is an urgent task in the environmental and economic crisis in Ukraine. Solving the problem of accumulation of this waste will reduce the share of soil contamination with chemicals, as well as contribute to the development of resource-saving technologies. Due to the high initial moisture content, preparation for further use of these substances is associated with the need to introduce into the process a mandatory stage of drying.

Dryers, which are currently equipped with industrial production lines, are large and energy-intensive, and usually require the installation of additional cleaning equipment. This affects the quality of the finished product, creates additional technological difficulties for compliance with the drying regimes and causes an increase in the cost of the product. Optimization and improvement of drying, the final stage of production of iron oxide pigments plays an important role in the development of modern technologies. In the dissertation work the substantiation of a choice of filtration process of drying of dispersed materials which need dehydration has been presented. This method allows you to reduce energy consumption of the process and get a high quality product. The products are tetrahydrate Ferrum (II) sulfate heptahydrate, organic waste production of TiO_2 (spent wood flour) and iron oxide pigment. The basic laws of hydrodynamics, heat and mass transfer, kinetics and dynamics of filtration of a thermal agent through a stationary layer of materials are investigated. The obtained results are generalized by mathematical methods, which allowed to calculate unknown coefficients and to offer calculated dependences, according to which it is possible to predict the course of filtration drying process in a wide range of changes in layer and heat agent parameters. A model of a filtration plant for the implementation of the filtration method of dehydration of iron (II)

sulfate heptahydrate to tetrahydrate, in the process of which the crystallization of moisture has been cleaved, as well as for drying other dispersed materials.

The first section covers a critical analysis of scientific, technical and patent information literature, describing possible methods of drying dispersed materials and research methods of this complex heat and mass transfer process. On the basis of the critical analysis of the received information the purpose and tasks of researches are formulated.

The prospects of using the filtration method of dehydration of iron (II) sulfate heptahydrate to cleave three molecules of water to obtain iron (II) sulfate tetrahydrate are grounded at the second section of the work. The application of the filtration drying method for dehydration of organic wastes of TiO_2 production and iron oxide pigments is substantiated, the characteristics of Ferrum (II) sulfate heptahydrate, spent wood flour and iron oxide pigment as drying objects are given. The scheme and the description of laboratory installation for realization of processes of dehydration and dehydration are presented, the techniques according to which experimental researches are carried out and the received results are processed are stated.

The third section presents the results of studies of the patterns of hydrodynamics of filtration of a thermal agent through a stationary layer of iron (II) sulfate heptahydrate, organic waste from titanium (IV) oxide and iron oxide pigment and sets the parameters of layers of materials that affect their hydraulic resistance. Unknown coefficients have been calculated and generalizations of results have been presented in the form of dimensionless complexes, which allow to predict energy costs for filtration of thermal agent through a stationary layer of iron (II) sulfate heptahydrate, spent wood flour and iron oxide pigment. The comparative analysis of approaches to establishment of size of hydraulic resistance of a layer is carried out and conclusions concerning application of each of them are made.

The fourth section presents the results of experimental studies of the influence of kinetics and dynamics of changes in moisture content of iron (II) sulfate heptahydrate, organic waste production of titanium (IV) oxide and iron oxide pigment over time during the drying process. The calculated dependences for

determining the duration of the drying process and the running value of the moisture content in the periods of full and partial saturation of the thermal agent with moisture are proposed. Preliminary thermal analysis of wet and dried iron (II) sulfate heptahydrate samples was performed in order to establish the patterns of gradual cleavage of water molecules and to calculate the thermal effect of phase transitions, as this material contains crystalline bound moisture. The results of studies of the heat exchange process between the layer of iron (II) sulfate heptahydrate and the heat agent are presented and the influence of the speed of the latter on the efficiency of heat transfer and, consequently, on the ability to control the dehydration process is demonstrated.

The fifth section presents and describes the installation of filtration drying of dispersed materials, which is supported by the patent of Ukraine for the invention. The calculation of the main dimensions of the device and energy costs for this process is given. A comparative calculation of operating costs for drying iron sulphate in the proposed dryer and in a drum dryer. The economic effect of the introduction of a filtration dryer into production is presented. It is proposed to use similar devices for drying and for other dispersed substances in titanium production.

The results of filtration drying of dispersed materials were transferred to SE "Argentum" for the implementation of the technological process of drying in this production. The possibility and expediency of using dried waste wood flour and iron oxide pigments in the production of composite building materials have been confirmed by Galvesttrade LLC.

The results of scientific research are used in the educational process of the Department of Chemical Engineering of the National University "Lviv Polytechnic", namely: developed methods for calculating the filtration dryer with screw feeder, which are used in lectures, laboratory and practical classes "Courses and apparatus of chemical production", as well during course and diploma design for students majoring in 161 "Chemical Technology and Engineering".

Key words: filtration drying, dehydration, iron sulphate, pigments, titanium (IV) oxide, wood flour, heat and mass transfer, drying kinetics, drying unit.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації в наукових фахових виданнях України:

1. Ханик Я. М., Цюра Н. Я., Дулеба В. П. Гідродинаміка сухого дисперсного матеріалу (залізоокисного пігменту). *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2006. Вип. 28, т. 2. С. 10. (Особистий внесок дисертанта: збір літературних даних, експериментальне дослідження гідравлічного опору шару залізоокисного пігменту).
2. Цюра Н. Я., Ханик Я. М. Кінетика сушіння жовтого залізоокисного пігменту. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2007. Вип. 31, т. 1. С. 107–110. (Особистий внесок дисертанта: дослідження кінетики сушіння, узагальнення результатів та написання статті.)
3. Ханик Я. М., Цюра Н. Я. Гідродинаміка руху теплоносія крізь шар сухого дисперсного матеріалу (органічних відходів виробництва TiO_2). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18.3. С. 160–162. (Особистий внесок дисертанта: експериментальне дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар органічних відходів виробництва TiO_2 , обговорення результатів та написання статті.)
4. Цюра Н. Я., Атаманюк В. М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2015. Вип. 47, т. 1. С. 153–159. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.373> (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті.)
5. Цюра Н. Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В. М., Госовський Р.Р. Динаміка видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату під час процесу зневоднення фільтраційним методом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.36930/40310112>. (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті.)

Стаття в науковому виданні іншої держави:

1. Tsiura N., Kindzera D., Huzova I., Atamanyuk V. Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, 2021. №1, С. 11-21. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.001583>. *(Особистий внесок дисертанта: узагальнення результатів експериментальних досліджень, обговорення результатів та написання статті.)*

Патент на винахід:

1. Патент України № 120178 на винахід. Установа фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Гаврилів Р.І, Цюра Н.Я., Микичак Б.М. //Заявл. 14.11.2016, опубл. 25.10.2019 , Бюл. №20, С.3. *(Особистий внесок дисертанта: запропонована ідея винаходу, патентний пошук)*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

1. В.Лаптев, Н.Цюра, В.Атаманюк. Сушіння залізного купоросу фільтраційним способом. Львівські хімічні читання: зб. наук. пр., 26-29 травня 2013 року. С19. *(Особистий внесок дисертанта: проведені експериментальні дослідження, опрацьовані результати).*

2. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинамічні закономірності фільтраційного сушіння залізного купоросу. Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015», Миргород, 20-24 квітня 2015 р. С. 196-199. *(Особистий внесок дисертанта: Проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів та написання тез).*

3. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. Збірник праць V міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса, 7-11 вересня 2015 р. С.-40. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, побудова графічних залежностей, обговорення результатів, написання тез та виступ на конференції).*

4. Tsiura N., Atamanyuk V., Pelekh M. Recovery of wastes from titanium (IV) oxide production. Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин. Львів, 5-7 листопада 2015 р., С. 84. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).*

5. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М., Цимбалістий О.В., Дулеба В.П. Особливості фільтраційного сушіння залізного купоросу. Програма і матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості». Київ, 8-10 листопада 2016 р., С. 50. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).*

6. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. Сушіння залізного купоросу фільтраційним методом. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». м.Львів, 14 вересня 2018 р., С. 84. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, узагальнення та обговорення результатів, написання тез).*

7. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Госовський Р.Р.. Теплообмін під час фільтраційного сушіння залізного купоросу. Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique 05.02.2021, Париж, FRA <https://doi.org/10.36074/logos-05.02.2021.v3.07> *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, математичне опрацювання результатів, написання тез).*

Основні положення і результати дисертаційної роботи доповідалися й обговорювалися на таких конференціях:

XIX Міжнародній науково-практичній конференції “Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров’я” (Україна, м. Харків, 2011 р.); IV науково-технічній конференції «Поступ у нафтопереробній та нафтохімічній промисловості» (Україна, м. Львів, 2007 р); науково -практичній

конференції «Хімічна та екологічна освіта: стан і перспективи розвитку» (Україна, м. Вінниця, 2008 р.); XXX, XXXII наукових конференціях «Львівські хімічні читання» (Україна, м. Львів, 2011 та 2013 р.р.); Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015» (Україна, м. Миргород, 2015 р.); V міжнародній науково-практичній конференції «Інноваційні енерготехнології» (Україна, м. Одеса, 2015 р.); Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин (Україна, Львів, 2015 р.); Міжнародній науково-практичній конференція «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості» (Україна, м. Київ, 2016 р.); III Міжнародній науково-практичній конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи» (Україна, м. Львів, 2018 р.); *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique* (Париж, Франція, 2021р.).

ЗМІСТ

ВСТУП	16
РОЗДІЛ 1. ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ	22
1.1. Аналіз методів сушіння дисперсних матеріалів	22
1.2 Аналіз гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу	27
1.3 Аналіз теплообмінних процесів під час профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу	33
1.4. Аналіз кінетики та динаміки процесу фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів	37
Висновки до першого розділу	39
РОЗДІЛ 2. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ	41
2.1. Обґрунтування вибору об'єктів сушіння	41
2.2. Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів як об'єктів сушіння	50
2.3. Схема експериментальної установки	54
2.4. Методики досліджень	57
2.5. Оцінка похибок вимірювання	66
Висновки до другого розділу	
РОЗДІЛ 3. ГІДРОДИНАМІКА РУХУ ТЕПЛООВОГО АГЕНТУ КРІЗЬ СТАЦІОНАРНИЙ ШАР ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ	69
3.1. Визначення фізико-механічних характеристик стаціонарного шару дисперсних матеріалів	69
3.2 Гідродинаміка стаціонарного шару дисперсних матеріалів	76
Висновки до третього розділу	94
РОЗДІЛ 4. КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ	97

ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ	
4.1 Дослідження зразків Ферум (II) сульфат гептагідрату методом термічного аналіз	97
4.2. Теплообмін між тепловим агентом та стаціонарним шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату	103
4.3. Кінетика видалення вологи з дисперсних матеріалів під час фільтраційного сушіння	110
Висновки до четвертого розділу	149
РОЗДІЛ 5. КОНСТРУКТИВНЕ РІШЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК УСТАНОВКИ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ	151
5.1. Установа фільтраційного сушіння	151
5.2. Методика розрахунку установи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів	155
5.3. Економічний ефект	159
Висновки до п'ятого розділу	160
ОСНОВНІ ВИСНОВКИ	161
СПИСОК ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ	162
ДОДАТКИ	182

ВСТУП

Актуальність роботи. Кризові явища, які спостерігаються в Україні та в світі, спонукають науковців та інженерів на створення нових технологій виробництва з акцентом на енергоощадність та екологічність. З цією метою в даній роботі досліджується процес фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, який з успіхом може бути застосований у промисловості, зважаючи на свою ефективність.

Титанова галузь має всі передумови для розвитку в Україні, проте на даному етапі характеризується недосконалістю технологій та метало - й енергоємністю обладнання й невідповідністю світовим екологічним стандартам. Виробництво пігментного Титану (IV) оксиду супроводжується утворенням великої кількості побічних продуктів. Проблему становлять тверді відходи, займаючи території та створюючи значну екологічну проблему. На сьогодні відомі численні технології переробки та використання побічних продуктів титанового виробництва, однак вони є можливими за умови стабілізованого складу та регламентованої вологості цих відходів. Оскільки процес зневоднення, який вимагає затрат значної кількості енергії, є невід'ємною стадією виробництва, то зазвичай такі технології належать до трудомістких та нерентабельних. У разі вдосконалення технології сушіння покращиться і якість продукції, і вартість, і зменшиться негативний вплив на довкілля.

Залізний купорос (Fe(II) сульфат гептагідрат) є багатотоннажним відходом титанових виробництв, який накопичується і становить серйозну екологічну проблему. Він утворюється у великих кількостях під час виробництва пігментного Титану (IV) оксиду з титанового концентрату або титанових шлаків сульфатним способом. На сьогоднішній день в Україні на ВАТ «Сумхімпром» цих відходів накопичено більше 1,5 млн. т., під звалище яких зайнято понад 1,5 га орної землі. В анексованому Криму відвали залізного купоросу сягають 3 млн. т і займають 3 га території поруч з озером Сиваш.

Одним із напрямків утилізації Fe(II) сульфат гептагідрату є виробництво залізоокисних пігментів, для яких залізний купорос є базовою сировиною, однак вдосконалення технології виробництва пігментів також є актуальним завданням на сьогодні.

На стадії «чорної фільтрації» виробництва Титану (IV) оксиду утворюються так звані органічні відходи, оскільки складаються із деревного борошна, яке виконує роль додаткового фільтрувального шару на барабанному чи на прес-фільтрі. Ці відходи становлять проблему через здатність до перегнивання та забруднення територій та стоків, у які їх часто скидають. Однак, як і залізний купорос, висушене відпрацьоване деревне борошно може бути цінною сировиною для супутніх виробництв.

Процес сушіння належить до найбільш поширених у різних галузях промисловості (хімічній, фармацевтичній, деревообробній тощо). Зневоднення різного роду речовин застосовують як на стадії підготовки сировини, так і на проміжних етапах технологічних процесів, а найчастіше на їх завершальних стадіях. Також процес сушіння забезпечує тривале зберігання та економне транспортування різного роду матеріалів.

За своєю суттю сушіння є складним тепломасообмінним процесом, що вимагає значних енергозатрат, зниження яких є особливо важливим завданням в умовах сучасної економічної та енергетичної кризи. Крім того, від режиму протікання даного процесу головним чином залежить і якість продукту, який висушується. Тому вибір оптимального методу сушіння та забезпечення раціональних параметрів його здійснення забезпечить конкурентоспроможність на сучасному ринку продукції, яка виробляється тим чи іншим підприємством.

Оскільки характер протікання процесу сушіння залежить від впливу багатьох чинників, можна стверджувати, що вибір способу сушіння, проектування відповідного обладнання, забезпечення відповідних умов здійснення цього процесу є надзвичайно складним завданням і потребує ґрунтовного вивчення. Попри те, що процеси сушіння досліджувались багатьма

вченими і продовжують досліджуватись досі, немає ні єдиної методики узагальнення, ні розрахунку відповідного обладнання.

Тільки здійснивши комплексний аналіз структурної будови шару досліджуваного матеріалу і окремих його частинок та дослідивши кінетику процесу сушіння, можна запропонувати та обґрунтувати вибір технологічних параметрів обраного процесу. А отримання математичних залежностей дасть змогу розраховувати основні конструктивні розміри сушильного апарату задля забезпечення необхідної продуктивності сушильного обладнання та високої якості готової продукції.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тема дисертаційної роботи відповідає науковому напрямку кафедри хімічної інженерії Інституту хімії та хімічних технологій Національного університету “Львівська політехніка”. Дисертація виконана в межах науково-дослідної роботи згідно із зареєстрованими тематиками: “Дослідження процесів тепломасообміну в системах з твердою фазою” (номер державної реєстрації 0112U007340) та “Гідродинаміка і тепломасообмін в системі тверде тіло - газ, тверде тіло – рідина” (номер державної реєстрації 0117U004122).

Метою дисертаційної роботи є встановлення основних закономірностей гідродинаміки, тепломасообміну, кінетики та динаміки сушіння шляхом профільтрування теплового агента крізь стаціонарний шар дисперсних матеріалів, які беруть участь у пігментних виробництвах, зокрема Ферум(II) сульфат гептагідрату, органічних відходів виробництва пігментного Ті(IV) оксиду та залізоокисного пігменту ($\alpha\text{-FeO(OH)}$), а також на основі узагальнення результатів теоретичних і експериментальних досліджень створення нового високоефективного обладнання для реалізації фільтраційного методу сушіння й відповідно зменшення енергетичних затрат на процес.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

1. Експериментально встановити фізико-механічні властивості стаціонарного шару відходів виробництва пігментного Ті (IV) оксиду -

Ферум(II) сульфат гептагідрату та відпрацьованого деревного борошна, а також залізоокисного пігменту.

2. Дослідити гідродинаміку під час фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту за різних висот і швидкостей руху теплового агенту та узагальнити отримані результати у вигляді безрозмірних комплексів.

3. Експериментально визначити коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату та у вигляді безрозмірних комплексів узагальнити отримані результати.

4. Експериментально дослідити вплив кінетики та динаміки фільтраційного сушіння на процес дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату до тетрагідрату та на зневоднення відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

5. Розробити принципову схему установки фільтраційного сушіння та методику її розрахунку.

Об'єкт дослідження – сумісний процес фільтрування та сушіння дисперсних матеріалів, що є побічними продуктами титанового виробництва.

Предмет дослідження – вплив параметрів теплового агенту та властивостей стаціонарного шару дисперсних матеріалів на закономірності гідродинаміки, тепломасообміну, кінетики та динаміки фільтраційного сушіння.

Методи дослідження - методи фізичного та математичного моделювання процесу фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів; пікнометричний та мікроскопічний методи визначення гранулометричного складу досліджуваних матеріалів, форми та будови окремих частинок шару; методи теплофізичного моделювання процесу тепломасообміну; числові та аналітичні методи розв'язку диференціальних рівнянь, зокрема метод Лапласа; комп'ютерне опрацювання експериментальних даних за допомогою пакету прикладних програм (Excel, Graf4Win, Corel Draw, MathCAD).

Наукова новизна. Опираючись на результати теоретичних та експериментальних досліджень процесу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату до тетрагідрату та сушіння відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту фільтраційним способом у дисертаційній роботі вперше:

- отримані критеріальні залежності для визначення чисел Ейлера та визначені коефіцієнти гідравлічного тертя у стаціонарному шарі Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, що свідчить про подальший розвиток теоретичних аспектів гідродинаміки стаціонарного шару дисперсних матеріалів у умовах внутрішньої та зовнішньої задачі;

- визначені коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату та отримані залежності, які дають змогу прогнозувати процес теплообміну під час фільтраційного сушіння;

- досліджений вплив висоти стаціонарного шару Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, а також температури теплового агенту та швидкості фільтрування на інтенсивність процесу фільтраційного сушіння та запропоновані відповідні залежності для розрахунку тривалості процесу;

- розроблена принципова схема та методика розрахунку установки фільтраційного сушіння зі шнековим живильником для сушіння дисперсних матеріалів.

Практичне значення отриманих результатів. Критеріальні залежності, отримані шляхом узагальнення теоретичних й експериментальних результатів досліджень гідродинаміки та теплообміну процесу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту під час фільтраційного сушіння в стаціонарному шарі, дають змогу прогнозувати інтенсивність процесу, обирати параметри теплового агенту для забезпечення економічної доцільності на етапі проектування сушильного обладнання. Розроблена принципова схема сушильної установки,

яка захищена патентом України на винахід, та методика розрахунку її основних конструктивних розмірів, що має на меті підвищити економічні показники титанового виробництва, синтезу пігментів на основі заліза та забезпечити утилізацію побічних продуктів та відходів. Практична реалізація отриманих результатів дисертаційної роботи полягає у передачі результатів досліджень ДП «Аргентум» та ТзОВ «Галвесттрейд» для впровадження у виробництво технології фільтраційного сушіння залізного купоросу, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту, а також для подальшого використання висушених матеріалів.

Особистий внесок здобувача полягає у проведенні критичного огляду джерел інформації щодо проблеми сушіння дисперсних матеріалів; у самостійній розробці, підборі та апробації методик досліджень гідродинаміки, тепломасообміну, кінетики та динаміки фільтраційного сушіння Ферум(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту; у проведенні експериментальних досліджень, аналізі отриманих результатів й узагальненні отриманих дослідних даних; у підготовці матеріалів до публікації та виступах на конференціях; у розробленні принципової схеми установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів та оформленні патенту. Автор висловлює особливу вдячність проф. Атаманюку В.М. та доц. Кіндзері Д.П. за підтримку й допомогу під час виконання дисертаційної роботи.

Апробація результатів дисертації.

Публікації. Основні положення та результати роботи відображені у 14 наукових працях, з яких 5 статей у фахових виданнях України, 1 стаття у закордонному виданні, 7 тез доповідей на міжнародних та Всеукраїнських наукових конференціях, а також 1 патент України на винахід.

РОЗДІЛ 1

ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ЛІТЕРАТУРИ

1.1. Аналіз методів сушіння дисперсних матеріалів

Дослідження процесу сушіння має важливе значення як з наукового погляду, так і задля його грамотної технологічної реалізації, адже переважна більшість виробництв передбачають цей важливий етап і від способу зневоднення головною мірою залежить якість та вартість готової продукції [1]. Хоч установки для здійснення примусового сушіння були ще в XVст. (для сушіння деревини, шкур, гутні сушарки для скла, кераміки, фруктів, ягід тощо), проте сучасні уявлення про закономірності процесу сушіння почали формуватися в XX [1,2], тривають досі й опираються на велику кількість різноаспектних теоретичних та експериментальних досліджень таких вчених як М. Ю. Лур'є, А. В. Ликова, П.Д. Лебедева, А.С. Гінзбурга, Г.К. Філоненка, Г.С. Шубіна, Б.С. Сажина, С.П. Рудобашти, О.Г. Бурдо, Ю.Ф. Снежкіна, А.А. Долинського, Г.А. Аксельруда, П.В. Білея та багато інших [1-17]. Також відомі праці закордонних дослідників в даній галузі -Карла Йохана Анстрьома, Самуеля Персі, Ліна Ілімієні, Бьорна Віттенмарка, Торе Хьогланда, Кріса Форсмана, Тадеуша Кудра [18-20].

Свідченням того, що світова наукова спільнота приділяє увагу дослідженням процесу сушіння є окремі інститути та кафедри, наукові школи, діяльність яких спрямована в даному напрямку. Наукові праці на тему сушіння постійно публікуються в провідних міжнародних і національних науково-технічних виданнях. Наприклад, *Drying Technology*, «International Journal of Heat and Mass Transfer», «Теоретические основы химической технологии», «Известия академии наук. Энергетика», «Инженерно-физический журнал»,

«Промышленная теплотехника», «Chemical Engineering», «Chemie-Ingenieur Technik» тощо. Регулярно проводяться міжнародні конференції, в яких працюють секції за даною тематикою, або й цілком присвячені питанням сушіння. Наприклад, International Drying Symposium (IDS), Nordic Drying Conference (NDC), Мінський міжнародний форум з тепломасообміну (MIF), International Congress of Chemical and Process Engineering (CHISA).

В Україні також є багато наукових видань, у яких публікуються результати сучасних наукових досліджень процесів сушіння, зокрема: "Східноєвропейський журнал передових технологій", який внесений в актуальний Scopus Title List; «Промышленная теплотехника», який видається Інститутом технічної теплофізики НАН України, окрім того, на базі даного інституту функціонує Комітет країн СНД з проблем сушіння.

У науковій літературі достатньою мірою описано вплив різноманітних чинників на перебіг процесу сушіння, зокрема на перенесення тепла й вологи (маси) як всередині матеріалу (внутрішня задача), так і в пограничному шарі на межі розподілу фаз (зовнішня задача) [1-4]; запропоновано механізми тепло- та масообміну [1, 5, 13], представлені результати досліджень фізико-хімічних, теплофізичних та структурно-механічних властивостей різноманітних матеріалів як об'єктів сушіння [12,13], на базі яких запропоновані класифікації матеріалів відповідно до внутрішньої форми, розмірів, внутрішньої структури, способів зв'язку вологи з матеріалом тощо [1, 13]. На сьогодні відомі численні методики прогнозування перебігу процесів сушіння [21-29], вибору способу дегідратації та розрахунку відповідного обладнання [30-35]. Проте неможливо виокремити єдину універсальну модель, яка дасть змогу однозначно здійснити апаратне оформлення та запропонувати оптимальні режими процесу сушіння для будь-якого матеріалу, не вивчивши його ґрунтовно й не дослідивши експериментально.

Ферум (II) сульфат гептагідрат, відпрацьоване деревне борошно та залізоокисні пігменти належать до дисперсних матеріалів, науково-технічна проблема сушіння яких займає особливу нішу і потребує розв'язання, адже

приблизно 80% від усіх матеріалів, які підлягають промислового висушуванню, є саме такими [1]. І закономірності їх сушіння відрізняються від сушіння листових, пастоподібних тощо. Сушінню саме дисперсних матеріалів присвячені фундаментальні праці таких учених як А.В Ликова, Б.С Сажина, В.Ф. Фролова, С.П. Рудобашти, А.С Гінсбурга, А.Н. Плановського, В.І Муштаєва, П. Г. Романкова, А.О. Сафонова, Ю.Ф Снежкіна, В. Атаманюка та інших [1,10-16]. У своїх роботах ці та інші дослідники представляють теоретичне підґрунтя та експериментальну базу різноманітних способів сушіння дисперсних матеріалів, підводячи підсумки щодо доцільності застосування того чи іншого способу сушіння дисперсних матеріалів.

Реалізація процесів зневоднення дисперсних матеріалів найчастіше здійснюється в сушарках, у яких матеріал перебуває в зваженому стані [19, 38-42] (сушарки з псевдозрідженим шаром, віброкиплячі, аерофонтанні, обертові барабанні, пневматичні, обертові барабанні тощо). Основною перевагою такого способу висушування є розвинена поверхня контакту фаз. Проте існування зваженого шару можливе тільки в певних межах швидкості потоку теплового агенту і через це процес не завжди протікає за оптимальних умов з погляду тепломасопередачі та енергозбереження [40,41]. За умов псевдозрідження дисперсного шару спостерігається стирання частинок, що веде за собою необхідність встановлення додаткового пилоочисного обладнання, а абразивні частинки, що рухаються в потоці теплового агенту, сприяють ерозії обладнання. Апаратурне оформлення такого роду процесів вирізняється громіздкістю та складністю виконання [42]. Ще одним недоліком такого типу апаратів є низьке використання теплового потенціалу, і, як наслідок, теплове забруднення атмосфери або необхідність рекуперації тепла й високі енергетичні затрати [43].

Сушіння дисперсних матеріалів у стаціонарному шарі (у стрічкових, вентиляційних, тунельних, сублімаційних, фільтраційних сушарках тощо) також використовують для дисперсних зневоднення матеріалів [43-46]. Тут

теплота до матеріалу може підводитись різними способами і найпопулярнішими є конвективний та кондуктивний.

Підведення теплоти шляхом конвекції призводить до необхідності подачі великих об'ємів теплового агенту, однак ні однорідності температурного поля навіть у тонких шарах матеріалу, ні високих значень коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до вологого матеріалу не досягається. Тому спостерігаються значні втрати теплової енергії з відпрацьованим сушильним агентом, особливо у випадку сушіння матеріалів з високою вологістю [47].

Кондуктивний спосіб сушіння, при якому теплота передається через безпосередній контакт нагрітої поверхні також не забезпечує ні рівномірності висушування, ні не характеризується енергоощадністю [44-47]

Швидкими темпами розвивається сьогодні наука про сублімаційне сушіння, яке проводиться із замороженого стану в умовах глибокого вакууму. Однак виправдовує себе цей метод здебільшого для харчових та фармацевтичних продуктів через свою дороговизну [48].

Відомі також комбіновані способи [49-54] із залученням енергії ІЧ випромінювання, мікрохвиль, струмів НВЧ, звукових коливань чи в умовах глибокого вакууму. Ці методи дають змогу проводити сушіння за значно нижчих температур теплового агенту і досягати більшої рівномірності температурних полів. Однак, вказані методи є енергозатратними, особливо під час періоду спадаючої швидкості сушіння, а також потребують значних капітальних і експлуатаційних вкладень.

Для сушіння залізного купоросу та залізоокисних пігментів зазвичай використовують барабанні сушарки або сушарки киплячого шару [55-66], для деревного борошна – стрічкові сушарки [67]. Проаналізувавши недоліки цих методів, описаних вище, варто звернути увагу на фільтраційний спосіб зневоднення дисперсних матеріалів [1, 65, 66, 67-72]. Його особливість полягає у тому, що тепловий агент контактує з розвиненою внутрішньою поверхнею газопроникного матеріалу, який перебуває у стаціонарному шарі. Рух теплового

агенту відбувається під дією перепаду тисків у напрямку до перфорованої перегородки, на якій розташований вологий матеріал.

В апаратах фільтраційного типу досягаються високі коефіцієнти тепло- та масопередачі, зумовлені високою швидкістю руху теплоносія в порах та каналах матеріалу, а звідси, і високе використання сушильного потенціалу нагрітого повітря чи іншого агента. Зважаючи на це, а також на велику поверхню контакту фаз, фільтраційні сушарки не є настільки громіздкими, металоемкими, як барабанні, а температура теплового агента на виході з шару зазвичай не перевищує температури мокрого термометра. Це стосується і порівняння фільтраційних сушарок з сушарками киплячого шару. Окрім того гідравлічний опір сушарок з псевдозрідженим шаром матеріалу є значно більшим [71]. Фільтраційне сушіння можливо здійснювати за участі теплового агента з низьким температурним потенціалом. У апаратах фільтраційного типу відсутнє стирання матеріалу і винесення дрібної фази із зони сушіння, тому відпадає необхідність встановлення додаткового повітроочисного обладнання.

Встановлено [1, 74, 75], що процес фільтраційного сушіння проходить за таким механізмом: якщо матеріал містить вільну вологу, яка утримується силами поверхневого натягу, то за рахунок перепаду тисків ця волога повністю або частково витісняється механічно, без затрат теплової енергії, а далі формується фронт масоперенесення, в якому і відбувається сам процес масообміну. Після досягнення рівноважного значення вологості матеріалу в верхній частині шару фронт масообміну переміщується в напрямку руху теплового агента. Відтак, процеси механічного винесення вологи, зовнішнього і внутрішнього масоперенесення відбуваються одночасно в об'ємі матеріалу і послідовно замінюють один одного в напрямку до перфорованої решітки.

Відомі декілька принципових схем установок фільтраційного сушіння. Наприклад, барабанні фільтраційні сушильні установки обирають для висушування дисперсних матеріалів з незначним гідравлічним опором шару й невеликою тривалістю сушіння [68,72]. Комбіновані установки фільтраційного сушіння використовують для дрібнодисперсних матеріалів [69,75]. Установки

фільтраційного сушіння стрічкового типу [70] використовують для грубодисперсних шарів, а скребкові установки - для сушіння жорстких вологих матеріалів [24].

У даній роботі представлені науково обгрунтовані параметри проведення процесу зневоднення Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту, які опираються на результати досліджень, спрямованих на вдосконалення існуючого сушильного обладнання та розробку нових енергоощадних та екологічних методів сушіння.

Fe (II) сульфат гептагідрат характерний тим, що містить кристалізаційну вологу [76]. На сьогодні в літературі відсутні дані про застосування фільтраційного методу зневоднення для такого роду матеріалів. Це стосується і залізоокисних пігментів з кристалічною будовою частинок. Про застосування відпрацьованої деревного борошна також не знайдено жодних відомостей, а тим паче про їх сушіння. Тому виникає необхідність теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарні шари обраних дисперсних матеріалів, вивчення особливостей тепломасообміну, кінетики процесу з врахуванням дифузійного масоперенесення під час сушіння. Проведення теоретичних досліджень, що перераховані вище, сприятиме встановленню науково обгрунтованих параметрів та режимів фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, які беруть участь у пігментному виробництві.

1.2. Аналіз гідродинаміки фільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу

З метою обгрунтування доцільності здійснення процесу сушіння фільтраційним методом, автори в своїх працях [1, 64-65, 67-79] досліджують гідродинаміку руху теплового агенту крізь стаціонарний шар досліджуваного

матеріалу. Саме аналіз величини гідравлічного опору матеріалу, яка залежить від властивостей шару й від фіктивної швидкості руху теплового агенту, дає змогу прогнозувати питомі енергозатрати на створення необхідного перепаду тисків і в такий спосіб вказувати на доцільність реалізації процесу сушіння даного матеріалу фільтраційним методом.

Не тільки ефективність фільтраційного сушіння залежить від гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар матеріалу, а й інтенсивність процесу значною мірою визначається гідродинамікою, оскільки від режиму омивання зовнішньої поверхні частинок тепловим агентом залежить товщина ламінарного пограничного шару, який лімітує процеси тепло- та масопередачі [80 - 104].

Рух теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу розглядається як змішана задача гідродинаміки [24, 25], адже з одного боку тепловий агент рухається в каналах поміж частинками (внутрішня задача), але водночас і омиває ці частинки (зовнішня задача). Тому дослідження гідравлічного опору шару під час руху крізь нього теплового агенту рекомендується розпочинати із визначення основних параметрів стаціонарного шару - структурної будови, розмірів і форми частинок, гранулометричного складу дисперсного матеріалу, висоти шару, насипної густини, пористості, питомої поверхні, які матимуть вагомий вплив на величину втрати тиску в шарі.

Проте деякі автори [67, 70-74] розглядають тільки зовнішню або внутрішню задачі гідродинаміки: зовнішня – коли визначальний вплив на втрати тиску мають параметри частинок, які омиваються газовим потоком; внутрішня – коли визначальними є розміри, форма, поперечний переріз каналів, крізь які рухається газовий потік у шарі дисперсного матеріалу. Узагальнення результатів гідродинамічних досліджень більшість авторів здійснюють у безрозмірній формі.

В роботах [1, 70] беруть до уваги критерій геометричної подібності (геометричний симплекс Γ), який характеризує структурну будову шару

матеріалу і геометричні розміри апарату, та критерій Рейнольдса (Re), який визначає вплив сил в'язкості на рух теплового агенту. В цьому випадку використовують критерій Ейлера (Eu) і представляють його у вигляді степеневі функції, в якій значення перепаду тисків є визначальним:

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \Gamma^y \quad (1.1)$$

або

$$Eu = A \cdot Re^{-x} \cdot \left(\frac{H_e}{d_e} \right)^y, \quad (1.2)$$

де H_e – еквівалентна довжина каналу, по якому рухається тепловий агент, $H_e = 1,5 \cdot H$;

H – висота шару дисперсного матеріалу [89], м;

d_e – еквівалентний діаметр каналів, крізь які рухається тепловий агент, м.

Значення коефіцієнту A і показників степеня x і y знаходять шляхом узагальнення результатів експериментальних досліджень. Для визначення коефіцієнту A і показників степеня x і y результати експериментальних досліджень представляють у вигляді залежності критерію Ейлера від геометричного симплексу $Eu = f(H/d_e)$. Розрахункові залежності для матеріалів, представлених у літературі [1,24, 70, 94, 95, 104], наведені в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Рівняння для розрахунку чисел Ейлера

Матеріал	$d_e \cdot 10^3, м$	$d_{\text{ч.}} \cdot 10^3, м$	$Eu = f(Re, \Gamma)$
Пісок	0,112	0,259	$Eu = 280 \cdot Re_e^{-0,8} \cdot (H/d_e)^{0,9}$
Пісок	0,357	0,648	$Eu = 555 \cdot Re_e^{-0,7} \cdot (H_e/d_e)^{0,9}$
Кавовий шлам	0,44	1,34	$Eu = 2,78 \cdot Re^{-0,18} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Торф	1,02	1,16	$Eu = 7,5 \cdot Re^{-0,05} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Технічний вуглець	2,94	3,795	$Eu = 212 \cdot Re^{-0,43} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Амофос	1,27	2,95	$Eu = 26 \cdot Re^{-0,33} \cdot H/d_{\text{ч}}$
Суперфосфат	0,88	2,1	$Eu = 21 \cdot Re^{-0,33} \cdot H/d_{\text{ч}}$

Енергетична верба	4,09÷4,44	0,17÷3,17	$Eu = 36 \cdot Re_e^{-0,22} \cdot H_e / d_e$
Шлак ТЕЦ	0,747	2,08	$Eu = 19 \cdot Re_e^{-0,55} \cdot H_e / d_e$
Стебла соняшника	0,376	2,7	$Eu = 10,7 \cdot Re_e^{-0,5} \cdot H_e / d_e$
Зерно пшениці	1,56	3,493	$Eu = 3,8 \cdot Re_e^{-0,2} \cdot H_e / d_e$

Як бачимо, константи A і показники степенів x та y є унікальними для кожного матеріалу за певних режимів фільтрування газового потоку, тому для отримання таких залежностей для залізного купоросу, для відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту необхідно провести відповідні дослідження й узагальнити отримані результати.

Гідродинаміку руху газового потоку крізь стаціонарний пористий шар матеріалу ще можна описати рівнянням Дарсі-Вайсбаха [70]:

$$\Delta P = \lambda \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v_0^2}{2}, \quad (1.3)$$

де ΔP – втрати тиску в шарі матеріалу, Па;

λ – коефіцієнт опору шару;

H – висота шару, м;

d_e – еквівалентний діаметр, м;

ρ – густина газового потоку, кг/м³;

v_0 – фіктивна швидкість руху середовища, м/с.

Щоб визначити коефіцієнт опору шару, пропонуються різні розрахункові залежності, отримані шляхом узагальнення експериментальних результатів для різних за розмірами і формою дисперсних матеріалів та різних режимів фільтрування газового потоку. У загальному випадку коефіцієнт тертя λ можна представити як функцію числа Рейнольдса у вигляді [70, 93]:

$$\lambda = \frac{A}{Re} + B, \quad (1.4)$$

де “А” та “В” – невідомі коефіцієнти, які визначають експериментальним шляхом. Для різних матеріалів, які представлені в літературі [72, 74, 75], визначені значення невідомих коефіцієнтів (1.4), а розрахункові рівняння наведені в табл.1.2.

Таблиця 1.2

**Розрахункові залежності для визначення коефіцієнту опору
стаціонарного шару**

Матеріал	$\lambda = f(Re)$	$\lambda = A/Re_e + B$
Шлак	$\lambda = 38 \cdot Re_e^{-0,55}$	$\lambda = 115/Re_e + 2$
Глина	$\lambda = 20 \cdot Re_e^{-0,50}$	$\lambda = 80/Re_e + 1,1$
Сирцеві гранули	$\lambda = 10 \cdot Re_e^{-0,23}$	$\lambda = 190/Re_e + 2$
Стебла соняшника	-	$\lambda = 30/Re^{0,7} + 1$
Енергетична верба	$\lambda = 25 \cdot Re_e^{-0,25}$	$\lambda = 2200/Re_e + 15$
Зерно пшениці	$\lambda = 8,5 \cdot Re_e^{-0,22}$	$\lambda = 145/Re_e + 1,9$

У роботах [78, 79] гідравлічний опір у шарі дисперсного матеріалу під час руху теплового агенту крізь нього, розраховують шляхом приведення залежності (1.3) до модифікованого рівняння Ергана:

$$\frac{\Delta P}{H \cdot \nu_0} = A \cdot \frac{\mu \cdot a^2}{32 \cdot \varepsilon_u^3} + B \cdot \frac{\rho \cdot a}{8 \cdot \varepsilon_u^3} \cdot \nu_0, \quad (1.5)$$

де a – активна питома поверхня шару, $\text{м}^2/\text{м}^3$; μ – коефіцієнт динамічної в’язкості газового потоку, $\text{Па} \cdot \text{с}$; ε_u – пористість шару дисперсного матеріалу, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

Для визначення невідомих коефіцієнтів “А” та “В” у залежності (1.5), результати досліджень представляють у вигляді $\Delta P/(H \cdot \nu_0) = f(\nu_0)$. За відрізком, який відтинає пряма на осі ординат визначають невідомий коефіцієнт “А”, що бере до уваги вплив в’язкісних сил та коефіцієнт “В” – за тангенсом кута нахилу

прямої до осі абсцис і який визначає вплив інерційних сил. Проте у проаналізованих працях вказано, що отримані розрахункові залежності дають змогу описати гідродинаміку процесу фільтраційного сушіння тільки для конкретних матеріалів в разі дотримання аналогічних геометричних характеристик апаратів в межах зазначених швидкостей руху теплового агенту. У інших випадках їх використання є обмеженим.

Коефіцієнт гідравлічного опору шару також визначають з рівняння [1]

$$\lambda = \frac{133}{\text{Re}} + 2,34, \quad (1.6)$$

однак воно справедливе тільки для монодисперсних шарів, що складаються з частинок кулястої форми.

У працях [71, 78] невідомий коефіцієнт опору визначають, беручи за основу залежність (1.3), а складову $\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_w^2}{\rho \cdot v_0^2}$ виражають як критерій Ейлера:

$$\frac{\Delta P \cdot \varepsilon_w^2 \cdot d_e}{\rho \cdot v_0^2 \cdot H} = Eu \cdot \frac{d_e}{H} = \frac{\lambda}{2} = f(\text{Re}), \quad (1.7)$$

звідки

$$\lambda = 2 \cdot \frac{d_e}{H} \cdot Eu = f(\text{Re}). \quad (1.8)$$

Для опису гідродинаміки стаціонарного шару дисперсних матеріалів використовують і критерій Лейбензона (Ω) [77, 105]. У випадку чисто в'язкісного режиму $\Omega \sim \text{Re}$, а для квадратичного закону опору $\Omega \sim \text{Re}^n$. Якщо апроксимувати дані залежності степеневою функцією, то отримують розрахункову залежність:

$$\Omega = A \cdot \text{Re}^n \quad (1.9)$$

На основі проведеного аналізу джерел літератури можна стверджувати, що не існує єдиних і однозначних залежностей для визначення коефіцієнтів опору рухові теплового агенту крізь шар дисперсного матеріалу, який би був

аналогічним шарові, сформованого кристалів залізного купоросу, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту. Тому дослідження гідродинаміки стаціонарного шару досліджуваних матеріалів є актуальними і узагальнення варто проводити за різними методиками, а проаналізувавши отриману похибку, рекомендувати оптимальний спосіб розрахунку й прогнозування енергетичних затрат на профільтрування теплового агенту крізь кожен з стаціонарних шарів Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту під час їх дегідратації запропонованим способом.

1.3 Аналіз теплообмінних процесів під час профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу

Фільтраційне сушіння відбувається в умовах передачі частини тепла від теплового агенту до вологого матеріалу, при цьому тепловий агент насичується вологою, та виходить із зони сушіння за температури, близької до температури мокрого термометра. Отже, фільтраційне сушіння є складним процесом, інтенсивність якого визначається швидкістю тепломасообмінних процесів між тепловим агентом і матеріалом, що визначає тривалість процесу та енергозатрати на реалізацію останнього.

Дослідженням процесів тепломасообміну між вологими дисперсними матеріалами та тепловим агентом присвячена низка наукових робіт [24, 72, 74, 87, 89, 94, 96, 107]. В праці [74] наведені результати досліджень процесів сушіння в стрічкових сушарках, рух теплового агенту в яких відбувається вздовж поверхні шару матеріалу і значення коефіцієнтів тепловіддачі є доволі низькими, що й підтверджує автор на основі вивчення процесів теплообміну за різних швидкостей руху теплового агенту. Отже, до шару матеріалу передається незначна кількість тепла за певний проміжок часу і це призводить

до значних теплових втрат з відхідним агентом та тривалого в часі висихання продукту.

У праці [92] обґрунтовано доцільність дослідження характеру й динаміки формування пограничного шару, який виникає в безпосередній близькості до поверхні матеріалу. Проте дослідження тепломасоперенесення в пограничному шарі й усередині агенту, що оточує цей вологий матеріал, має значення для способів сушіння, в яких відсутнє омивання кожної частинки матеріалу тепловим агентом, тому для фільтраційного сушіння цим можна знехтувати.

Результати досліджень процесу тепломасообміну в барабанних сушарках наведені в роботах [46,91], де вказано, що прогрівання матеріалу в барабанних сушарках відбувається експоненціально, що зумовлює потребу забезпеченні достатньої довжини апарату.

Під час сушіння в киплячому шарі вивчають інтенсивність зовнішнього теплообміну [25, 39, 91]. Для матеріалів із високим коефіцієнтом дифузії вологи сушіння протікає у першому періоді, а сам процес сушіння лімітується теплообміном між агентом сушіння і поверхнею частинок матеріалу. Тобто, визначають коефіцієнт теплообміну α з критеріального рівняння [93]:

$$Nu = f(Re; Fe; Ar; H/d), \quad (1.10)$$

де Fe – критерій Федорова, $Fe = \sqrt[3]{\frac{4}{3}} Ar$; Ar – критерій Архімеда.

Зазначається, що термічний опір зовнішнього теплообміну має значення тільки при порівняно малих H і великих d . Інакше, шар матеріалу буде поглинати все тепло, що підводиться з повітря тоді лімітуючим чинником буде максимально допустима температура матеріалу. У другому періоді сушіння характерний опір внутрішній дифузії вологи і процес лімітується температурою повітря та мало залежить від швидкості й відносної вологості повітря. Тому тут розв'язують сумісне рівняння зовнішнього теплообміну і внутрішнього

тепломасоперенесення шляхом використання наближених методів, а також формул, отриманих шляхом математичної обробки експериментальних даних.

Як бачимо, для узагальнення результатів дослідження теплообміну часто користуються методами теорії подібності, які дають змогу отримати узагальнюючі критеріальні залежності для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до частинок матеріалу. Автором роботи [1, 74] представлені кілька залежностей для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі в стаціонарних шарах матеріалу:

$$Nu_p = (0,5 Re_p^{1/2} + 0,2 Re_p^{2/3}) Pr^{2/3} \quad (20 < Re_p < 80000 \text{ для } \varepsilon < 0,78);$$

$$\alpha = 3,26 \cdot C_p \cdot Gg \cdot Re^{-0,65} \cdot Pr^{2/3} \quad (20 < Re < 1000);$$

$$\alpha = (C_p \cdot Gg / \varepsilon) \cdot (2,876 / Re + 0,302 / Re^{0,35}) Pr^{-2/3} \quad (10 < Re < 10000).$$

За реалізації процесів сушіння у сушарках фільтраційного типу, тепловий агент профільтровується крізь криволінійні канали значної довжини, утворені між частинками матеріалу і прогнозованим є те, що значення коефіцієнтів тепловіддачі є значно вищими у порівнянні з випадком руху теплового агенту вздовж поверхні матеріалу. На даний час особливості теплообміну процесів фільтраційного сушіння є ще недостатньо вивченими, зважаючи на широкий спектр дисперсних матеріалів, які потребують зневоднення для подальшого застосування у виробничих технологічних лініях чи використання як готових продуктів. Однак, вже є певні напрацювання у цьому напрямку [74, 75, 87, 89].

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до різноманітних дисперсних матеріалів, рекомендується [1, 74] проведення експериментальних досліджень у «тонкому» шарі матеріалу, що передбачають вимірювання температури теплового агенту на виході з шару матеріалу, за результатами яких значення останніх можна розрахувати, виходячи із закону Ньютона-Ріхмана: $\alpha = \Delta Q / F \cdot (t - \bar{T}_n) \cdot \Delta \tau$. Авторами роботи [1] отримані значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту за швидкостей руху

останнього $2 \div 3,5$ м/с, для цілої низки дисперсних матеріалів, а саме: піску середньої зернистості $40\text{--}70$ Вт/м²·К; грубозернистого піску $95\text{--}170$ Вт/м²·К; вугілля $d=(0,31 \div 0,63) \cdot 10^{-3}$ м; $70\text{--}130$ Вт/м²·К; кавового шламу $93\text{--}165$ Вт/м²·К; торфу $100\text{--}190$ Вт/м²·К; вугілля $d=(5 \div 10) \cdot 10^{-3}$ м; $220\text{--}430$ Вт/м²·К. Авторами роботи [8] встановлений вплив збільшення швидкості теплового агенту від $0,68$ до $2,05$ м/с на інтенсивність теплообміну та визначені коефіцієнти тепловіддачі для стебел соняшника $540\text{--}855$ Вт/м²·К.

З метою отримання залежностей, що дадуть змогу розраховувати значення коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до досліджуваного матеріалу у визначених межах чисел Рейнольдса, узагальнення експериментальних результатів проводять методами теорії подібності, для чого результати представляють у формі узагальненого критеріального рівняння виду:

$$Nu = f(Re, Pr, Fo, Fr). \quad (1.11)$$

В залежності (1.11) критерій Нуссельта є визначальним [1] і залежить від критеріїв Рейнольдса, Прандтля, Фур'є та Фруда. Оскільки під час реалізації процесу фільтраційного сушіння режим теплообміну є встановленим, а конвекція є вимушеною, то критерії Фур'є та Фруда не беруть до уваги. Тому, після внесення спрощень в узагальнене критеріальне рівняння (1.1) та його апроксимації степеневою залежністю, отримаємо:

$$Nu = A \cdot Re_e^n \cdot Pr^m. \quad (1.12)$$

Значення коефіцієнту «А», а також показників степеней «n» та «m» залежності (1.12) визначають експериментальним шляхом.

Авторами робіт [1, 74, 75, 107] отримані узагальненні критеріальні залежності, які дають змогу визначити коефіцієнти тепловіддачі від теплового агенту до частинок різноманітних матеріалів, а саме: стебел соняшника, зерна пшениці, «енергетичної» верби, сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію та сирцевих гранул шлакового гравію, дрібнодисперсного капілярно-

пористого матеріалу, дрібнодисперсних залізовмісних матеріалів, осадженого і гранульованого поліакриламід. Однак, запропоновані авторами залежності є справедливими лише для досліджуваних матеріалів і не можуть бути використаними для розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі від теплового агенту до кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату з огляду на значну різницю між експериментальними та розрахунковими значеннями. Тому, дослідження теплообмінних процесів під час профільтрування теплового агенту крізь шар, сформований з кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату є актуальним завданням.

1.4. Аналіз кінетики та динаміки процесу фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів

Дослідження кінетики процесу сушіння передбачає визначення характеру зміни вологовмісту матеріалу в часі. У роботах [13, 100-111] вказано, що на кінетичні особливості процесу фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів впливають початковий та кінцевий вологовміст, форми зв'язку води з твердим скелетом матеріалу, а також вологовміст, температура та швидкість руху теплового агенту. Також зазначається, що швидкості процесів тепло- та масовіддачі під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів є вищими, ніж у традиційних сушарках, а отже, й тривалість процесу висушування буде значно меншою.

Дослідження кінетики фільтраційного сушіння полягає в аналізі кінетичних кривих та подальшому узагальненні отриманих результатів. Для низки матеріалів (вугілля, пісок, гранульований поліакриламід) [1, 71] характерне механічне витіснення води з матеріалу. Це зумовлено наявністю в них вільної води. В деяких матеріалах – технічний вуглець, амофос, пшениця [1, 75] процес проходить тільки в періоді часткового насичення водою теплового агенту, що характеризується поступовим зменшенням інтенсивності

процесу, а ще в групі матеріалів – можна розрізнити періоди повного насичення теплового агенту вологою і часткового. Дослідження динаміки сушіння дає розуміння розподілу поля концентрацій вологи в матеріалі та в тепловому агенті в певний момент часу. Важливим показником є кількість видаленої вологи з шару за одиницю часу, що характеризує інтенсивність сушіння і визначається за тангенсом кута нахилу прямолінійних частин кривих $G = f(\tau)$ до осі абсцис, де G - зміна залишкової маси вологи в шарі матеріалу [108, 109].

З метою отримання розрахункових залежностей, які дають змогу визначити зміну вологовмісту в часі в періоді повного насичення теплового агенту вологою, та в періоді часткового насичення, важливо визначити критичний вологовміст $W_{кр}$, який визначає межу між двома періодами. З цією метою будують кінетичні криві в координатах $lg(W - W_p) = f(\tau)$, де W , W_p – біжуче та рівноважне значення вологовмісту матеріалу, кг/кг; τ - час сушіння, с. Графічні залежності узагальнюють прямими лініями, ордината точки перетину яких відповідатиме критичному вологовмісту $lgW_{кр}$, а абсциса – часу його досягнення. Тоді значення критичного вологовмісту можна представити у вигляді [94]:

$$W_{кр.} = 10^x + W_p, \quad (1.13)$$

де x – ордината точки перетину двох прямих, що відповідають періодам повного і часткового насичення теплового агенту вологою.

Для узагальнення кінетики сушіння дисперсних матеріалів у періоді повного насичення теплового агенту вологою, використовують систему диференціальних рівнянь матеріального балансу в шарі та кінетики сушіння [94, 104]:

$$\begin{cases} \frac{\partial \varphi}{\partial H} = a \cdot (1 - \varphi); \\ \frac{\partial W}{\partial \tau} = n \cdot (1 - \varphi), \end{cases} \quad (1.14)$$

де φ – відносна вологість теплового агента, %; W – біжучий вологовміст матеріалу, кг H_2O /кг сух.мат.; a – кінетичний коефіцієнт сушіння, $1/m$, що залежить від параметрів процесу і від структури матеріалу.

Розв'язком системи диференційних рівнянь (1.14) є рівняння, яке описує кінетику сушіння в періоді повного насичення теплового агента вологою до моменту досягнення критичної вологості:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - \alpha \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (1.15)$$

де α – коефіцієнт сушіння, $1/c$.

Кінетичні коефіцієнти α і a визначаються із експериментальних даних шляхом побудови залежності $\ln(y) = f(H)$, а узагальнення експериментальних даних прямими лініями дає змогу визначити невідомі коефіцієнти графічним способом.

Узагальнення результатів дослідження для періоду часткового насичення теплового агента вологою здійснюють, використовуючи рівняння:

$$-\frac{dW}{d\tau_0} = K \cdot (W - W_p), \quad (1.16)$$

де K – коефіцієнт сушіння, $1/c$, для визначення якого експериментальні значення представляють у координатах $\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр})$ і за тангенсом кута нахилу прямих визначають K .

Висновки до першого розділу

1. Здійснений аналіз методів сушіння показав перспективність досліджень фільтраційного способу зневоднення.
2. Проведений огляд результатів експериментальних і теоретичних досліджень гідродинаміки, теплообміну та кінетики фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів показав, що узагальнення і

розрахункові залежності, представлені для досліджуваних матеріалів, не можна використати для прогнозування процесу без попереднього вивчення закономірностей процесу зневоднення.

3. Теоретичних і експериментальних досліджень кінетики фільтраційного сушіння кисталогідратів, пігментів та відпрацьованого деревного борошна у технічній літературі не виявлено.

4. Критичний аналіз джерел літератури дав змогу визначити основні напрямки досліджень процесу фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, залізоокисних пігментів та відпрацьованого деревного борошна, на основі яких сформульовані мета й задачі дисертаційної роботи.

РОЗДІЛ 2

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ОБ'ЄКТІВ СУШІННЯ ТА МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1. Обґрунтування вибору об'єктів сушіння

З огляду на світові тенденції до зростання попиту на титанову продукцію, зокрема на пігментний Ті (IV) оксид, Україна має великі перспективи розвитку цієї галузі, зважаючи на наявні для цього передумови [112, 113]. Насамперед важливо, що в Україні зосереджені великі запаси ільменітових руд, завдяки чому наша держава посідає перше місце в Європі і третє в світі після Австралії та Китаю за запасами титанової сировини (94 млн. т, що становить приблизно 11%) [114]. Це дає змогу реалізовувати замкнутий цикл виробництва на своїй території. Крім того, тут наявні виробничі потужності, які хоч і потребують реконструкції, проте їх наявність є великою перевагою і ресурсом для розвитку титанової галузі. Стримуючим чинником для популяризації вітчизняної титанової продукції є її висока собівартість та невідповідність виробництва світовим екологічним стандартам. Тому важливим завданням для науковців та інженерів є розроблення й впровадження енергоощадних, ресурсозберігаючих та екологічно безпечних технологій.

Значну проблему в титановій галузі становить накопичення відходів, зокрема твердих [114, 115]. Кількість цих відходів у декілька разів перевищує кількість цільового продукту, а спосіб утилізації й переробки потребує вагомих затрат і впливає на собівартість основної продукції. Щоб оцінити масштаби проблеми, варто зазначити, що приблизно 95% титанової сировини спрямовується на виробництво пігментного Титан (IV) оксиду (TiO_2), світовий обсяг виробництва якого становить приблизно 6 млн. т [116]. Промислове виробництво Титан (IV) оксиду розпочалося ще на початку ХХ століття в Європі (за методом доктора

Gustav Jebsen і професора Peder Farup із норвезького ільменіту [117]. Згодом були збудовані заводи в Америці, Англії, Німеччині, Австралії та в інших країнах і континентах [118, 119]. На сьогодні найвідомішими виробниками пігментного Титану (IV) оксиду є такі компанії: E.I. du Pont de Nemours & Co. Inc. (DuPont) (США), Millennium Inorganic Chemicals Inc. (США), Tioxide (Великобританія), Kronos Inc (США), Kerr-McGee (США), Ishihara Sangya Kaisha Ltd. (Японія), Zakłady Chemiczne (Польща), Precheza AS (Чехія). Та основним виробником Титану (IV) оксиду, а отже, і споживачем титанової руди, і продуцентом відходів, є Китай. Титанова промисловість України представлена ПАТ «Сумхімпром» в м. Суми та Ukrainian Chemical Products (колишній «Кримський титан») на анексованому півострові Крим.

Пігментний Титан (IV) оксид виробляється з титановмісних концентратів хлоридним (52% світових потужностей) і сульфатним (48%) способами. [116]. На рис.°1.1 наведена схема виробництва пігментного Титан (IV) оксиду твердофазним методом за сульфатнокислотою технологією розкладання ільменітових концентратів, за якою працюють українські виробники [117].

Вихідною сировиною в даному виробництві є ільменітовий концентрат. Ільменіт - це руда, яка містить велику кількість сполук Титану і Феруму. У промисловості використовують твердофазний метод сульфатнокислотного розкладу ільменіту, який характеризується швидким розкриттям концентрату і високою основністю розчину, що сприяє досягненню високої якості цільового продукту. На підготовчому етапі ільменіт подрібнюють та висушують, а далі – обробляють концентрованою сірчаною кислотою, підігрітою до температури $75\div 135^{\circ}\text{C}$. Розкладання ільменітового концентрату супроводжується екзотермічним ефектом, в результаті чого температура системи різко зростає до $180\div 200^{\circ}\text{C}$.

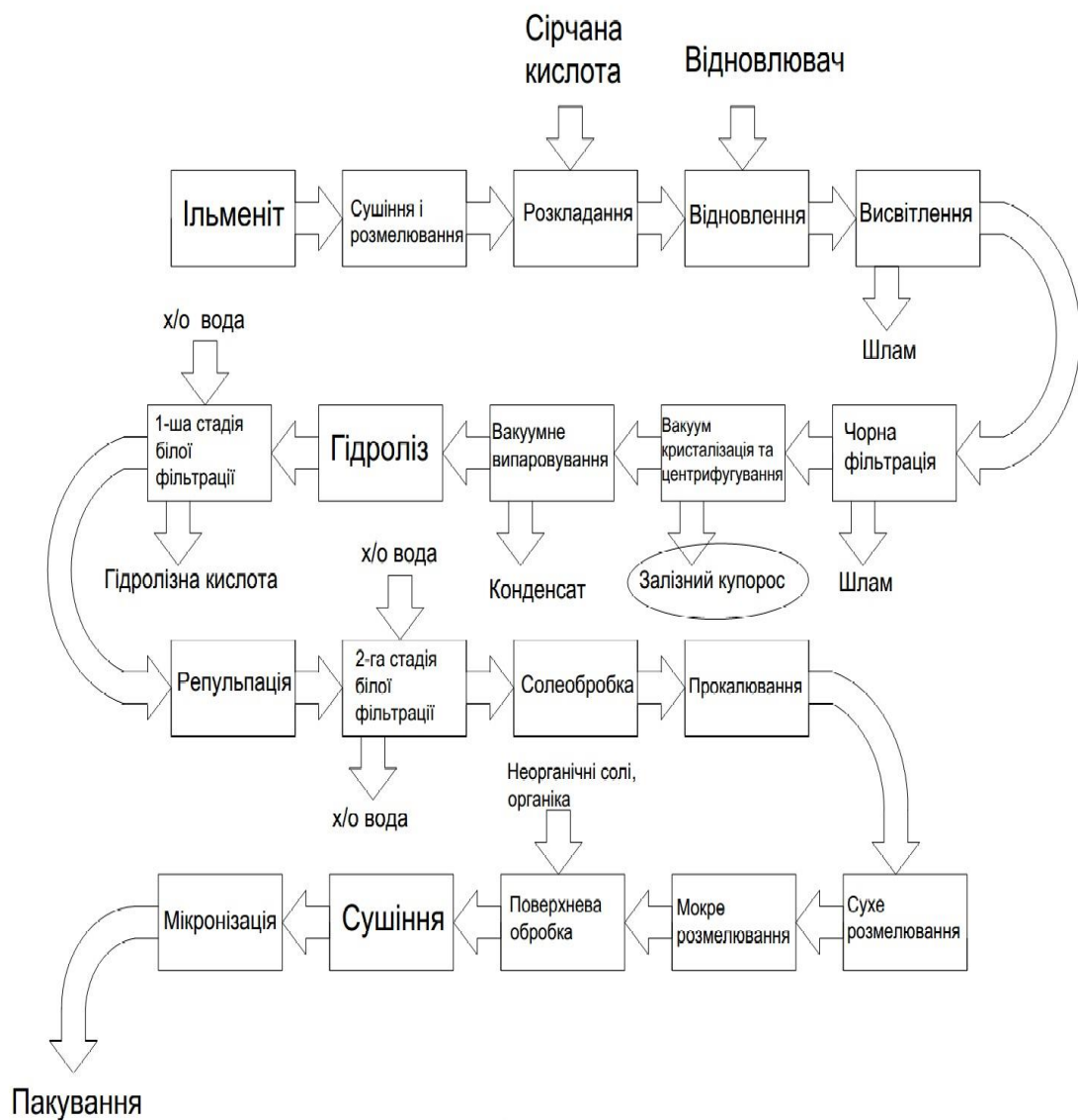
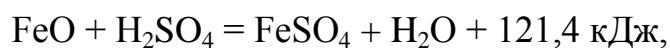
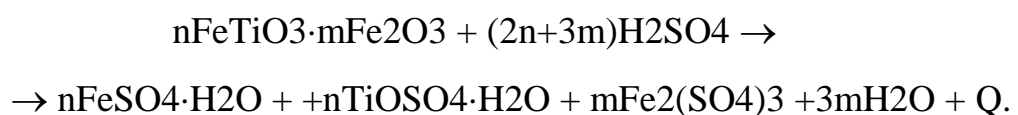


Рис.1.1. Технологія виробництва Титан (IV) оксиду сульфатним способом.

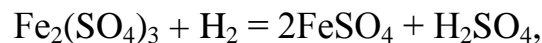
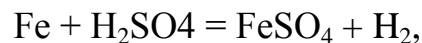
Детальніше цей процес можна зобразити за допомогою рівнянь реакції [116]:



Або сумарно:



Ступінь розкладання концентрату в такий спосіб становить 96÷97%. Утворений плав, який в основному складається з титаніл сульфату (TiOSO_4) та сульфатів Феруму – FeSO_4 , $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$, охолоджують і розбавляють водою. Під час гідролізу утворюються осаді сполук Fe^{+3} , які необхідно відновити до Fe^{+2} . Відновлення здійснюється шляхом додавання в реактор залізної стружки. І цей процес описується такими рівняннями:



Отриманий розчин відстоюють і подають на «чорну фільтрацію». Назва походить від кольору розчину, який складається здебільшого з TiOSO_4 , FeSO_4 та шламу (SiO_2 , рутилу, CaSO_4 тощо), а темне забарвлення зумовлене наявністю іонів Ti^{+3} . Відфільтрований розчин подають на вакуум-кристалізацію, де за рахунок охолодження відбувається утворення залізного купоросу - Ферум (II) сульфат гептагідрату $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, який після згущення відділяють на центрифугах чи план-фільтрах від маточного розчину. Сам розчин титанілсульфату випарюють і гідролізують. Під час гідролізу в осад виділяється до 95-96% титану і утворюється метатитанова кислота. Метатитанову кислоту промивають, сушать і прожарюють за температури 850÷900 °C, в результаті чого відщеплюється гідратована волога і утворюється Титану (IV) оксид, який набуває пігментних властивостей. Далі продукт подрібнюється і передається на поверхневу обробку для надання йому відповідних споживчих властивостей. Оброблений Титан (IV) оксид висушують і розмелюють. Готовий товарний продукт упаковують і складують.

В роботах [113-119] піднімається питання поводження з відходами, які утворюються в даному технологічному процесі та пропонуються шляхи їх утилізації. Велику проблему становлять саме тверді відходи, які займають великі площі та становлять екологічну проблему, однак після здійснення

процесу сушіння є можливість використання як вторинної сировини в супутніх технологіях.

З огляду на перспективи розвитку титанової галузі в Україні, застосування енергоефективного методу зневоднення дисперсних матеріалів – фільтраційного сушіння – дасть змогу зменшити навантаження на екологію довкілля шляхом підготовки до подальшої переробки твердих відходів, які утворюються під час виробництва пігментного Титану (IV) оксиду.

У процесі виробництва пігментного Титану (IV) оксиду за сульфатнокислотою технологією утворюється залізний купорос (Ферум (II) сульфат гептагідрат) - багатотоннажний побічний продукт, який становить значну екологічну проблему як в Україні, так і за її межами. Залежно від виду титановмісної сировини, хімічного складу родовища і способу виробництва, утворюється різна кількість залізного купоросу (від 3 до 6 тон на одиницю готового продукту) [114]. Наприклад, із норвезького концентрату на кожному тонну TiO_2 виходить близько 6 тон залізного купоросу, з Іршанського ільменітового концентрату - 4 тон.

Відомі також й інші способи утворення залізного купоросу: в природі зустрічається природний аналог залізного купоросу - мінерал мелантерит; виділяється у вигляді світло - зелених кристалів з водних розчинів за температур $1,82^{\circ}C \div 56,8^{\circ}C$ або із травильних розчинів за температур від $-5^{\circ}C$ до $-10^{\circ}C$; шляхом випарювання травильних розчинів з подальшою кристалізацією при охолодженні до $20 \div 25^{\circ}C$; із сірчаного колчедану і порід, що його містять або шляхом розчинення в сірчаній кислоті металічного заліза, рідше залізних руд і деяких шлаків; як побічний продукт при добування квасців; з щільних піритів; шляхом розчинення заліза в сірчаній кислот [64, 114-116].

Залізний купорос належить до 3 класу небезпеки (помірно небезпечний) [113], однак вільна сірчана кислота, що міститься в ньому, проникає в ґрунти, змінюючи їх структуру, негативно впливаючи на склад води, підвищуючи розчинність важких металів тощо, тобто становить серйозну небезпеку

довкілля та здоров'ю людей. Вирішення проблеми накопичення залізного купоросу полягає в його активному використанні головним чином як вторинної сировини, але після попереднього висушування.

У літературі описані приклади застосування Ферум (II) сульфат гептагідрату: у виробництві залізоокисних пігментів [118, 125-128] та феромагнетиків[114], залізо-нікелевих акумуляторів [115], залізородних окатишів [115], мінеральних фарб, чорнил[118], мінеральних добрив, феррону й ферро-гіпсу [135], цементів (як дехроматор), бетонів, будівельних плит, для збагачення вугілля [129, 130], як антисептиків приміщень та засобів для консервування дерев, при виготовленні сільськогосподарських фунгіцидів та інсектицидів, харчових добавок в раціонах тварин, меліорантів, коагулянтів та реагентів для очищення стічних вод [114] тощо. Однак кожне із цих виробництв вимагає стабільного складу й регламентованої вологості залізного купоросу.

Найбільш обґрунтованим способом попередньої обробки Ферум (II) сульфат гептагідрату є отримання Ферум (II) сульфат тетрагідрату ($\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) шляхом відщеплення трьох молекул води. Вологий залізний купорос злежується, грудкується і в результаті гідролізу змінює свої властивості. Використання семиводного кристалогідрату у виробництвах, які проводяться за високих температур, призводять до розчинення FeSO_4 у власній кристалізаційній воді, а дегідратація з відщепленням більшої кількості молекул є надто енергетично затратною і не вимагається технологічним регламентом переважної більшості виробництв. Крім того, висушений Ферум (II) сульфат надзвичайно гігроскопічний, тож за звичайних умов відбудеться миттєвий зворотній процес приєднання молекул води.

У джерелах інформації практично відсутні відомості про дослідження процесу промислової дегідратації Ферум (II) сульфат гептагідрату, вказано тільки, що з цією метою здебільшого використовують барабанні сушарки. Методики розрахунку сушильного обладнання, які би брали до уваги постадійний процес відщеплення кристалізаційної вологи, також відсутні. Тому

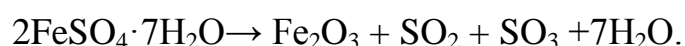
дослідження процесу сушіння Ферум (II) сульфат гептагідрату з метою одержання його тетрагідрату є актуальними.

Підприємства залізоокисних пігментів з одного боку частково вирішують проблему нагромадження залізного купоросу, оскільки використовують його як сировину, а з іншого боку – й самі потребують вдосконалення технології виробництва. Існує ще ціла низка способів виробництва залізоокисних пігментів, і зазвичай однією із стадій є сушіння, що проводиться у псевдозрідженому шарі або в барабанних сушарках, однак ці способи є надто енергоємними, важко контрольованими та не забезпечують рівномірного висушування.

У працях багатьох дослідників [114 - 131] наведені результати успішного застосування фільтраційного способу сушіння для зневоднення дисперсних матеріалів в стаціонарному шарі, що характеризується енергоощадністю та рівномірним видаленням вологи й має низку переваг перед іншими методами зневоднення. Тому використання фільтраційного сушіння залізного купоросу та залізоокисних пігментів у стаціонарному шарі, після попередніх досліджень та встановлення оптимальних параметрів процесу, дасть змогу знизити собівартість виробництва залізоокисних пігментів, отримати продукт високої якості та водночас раціонально використати побічний продукт титанового виробництва – залізний купорос.

Виробництво залізоокисних пігментів частково вирішує проблему поводження із залізним купоросом, оскільки Ферум (II) сульфат гептагідрат є цінною сировиною. Наприклад, для одержання червоного залізоокисного пігменту найчастіше користуються такими технологіями [116]:

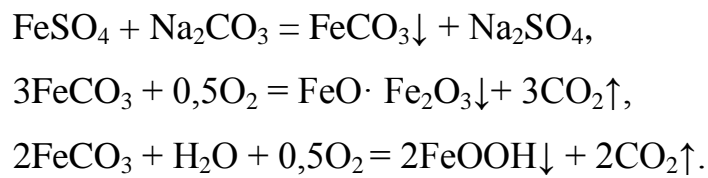
- 1) прожарювання залізного купоросу за температур 700÷800 °С



Задля уникнення утворення спечених агломератів, які виникають унаслідок розчинення FeSO_4 у власній кристалізаційній воді, залізний купорос попередньо зневоднюють.

2) прожарювання гідратів оксидів Fe за температур 600÷700 °С [80, 136]. Цей метод поступається першому в технологічному й екологічному аспектах, але в промисловості використовують обидва способи через те, що в кожному з них отримують унікальні спектри пігментів, які характеризуються й індивідуальними властивостями. Крім того, і жовтий, і чорний пігменти є самостійними товарними продуктами.

Схема виробництва червоних залізоокисних пігментів «через жовтий» здійснюється в такий спосіб: в апаратах з мішалками розчиняють залізний купорос у воді, підігрітій до 50÷60 °С. Тоді додають Na₂CO₃ і в середовищі кисню з повітря відбувається утворення жовтого залізоокисного пігменту FeOOH.



На наступному етапі проводять промивання пігменту послідовною репульпацією та відстоюванням осадів. Для укрупнення частинок осаду і кращої седиментації використовують розчин поліакриламід (ПАА). Відстояні суспензії фільтрують, промивають і подають на прожарювання. Проте прожарювання вологого матеріалу призводить до утворення грудок, які нерівномірно прожарюються, і це призводить до неоднорідності кольору. Тому на даному етапі пропонується попереднє сушіння фільтраційним способом, який зарекомендував себе як ефективний метод зневоднення дисперсних матеріалів. Сушіння жовтого залізоокисного пігменту з метою покращення показників червоного залізоокисного пігменту, утвореного з нього, є важливим технічним завданням.

У світі найбільшими компаніями з виробництва залізоокисних пігментів є «Bayer» (Німеччина), «Magnox Inc.» (США), «Hardillia Chemicals

Ltd.» (Індія). В Україні - ВАТ «Сумихімпром», ПАТ «Криворізький суріковий завод».

Ще однією проблемою виробництва пігментного $Ti(IV)$ оксиду є поводження з органічними відходами, які утворюються на стадії «чорної фільтрації» після профільтрування розчину крізь шар деревного борошна на барабанних фільтрах або фільтрпресах.

Зважаючи на теплоізоляційні властивості висушених органічних відходів виробництва пігментного Титану (IV) оксиду (відпрацьованого деревного борошна), можливе широке використання останнього в промисловості [141-144]. Наприклад, у виробництві цементу, керамзиту, лінолеуму, будівельних плит, обпалювальної кераміки та цегли тощо. Доцільне застосування цього відходу як шліфувального, полірувального засобу для чищення в металообробці, у виробництві шкір і хутра; як добавки в пористі абразивні вироби, а також при виготовленні сталей та феросплавів, формувальних сумішей для виготовлення ливарних форм, для покриття зварювальних електродів (целюлоза електродна); використання як основи для термопластичних деревно-полімерних композиційних матеріалів тощо. У лабораторії ТзОВ «Галвесттрейд» проведені експериментальні дослідження використання висушеного нами відпрацьованого деревного борошна для виробництва арболіту (різновид легкого бетону на основі мінеральних в'язучих речовин і наповнювачів, отриманих із деревних відходів після спеціальної обробки їх мінералізатором). У порівнянні з використанням чистої деревного борошна отримані зразки арболіту мають на 7% вищу міцність за однакових співвідношень вихідних компонентів [Дод. 2].

Якщо технологія використання деревного борошна потребує його очищення, то рекомендується здійснювати процес розділення відпрацьованого деревного борошна від домішок шляхом флоатації з подальшим сушінням. Таке деревне борошно можна й повторно використовувати на стадії «чорної фільтрації» у виробництві пігментного Титану (II) оксиду. Результатів наукових

досліджень та опису закономірностей висушування відпрацьованого деревного борошна для його подальшого використання, в літературі не виявлено.

Сушіння органічних відходів виробництва пігментного $Ti(IV)$ оксиду - відпрацьованого деревного борошна – дасть змогу скоротити кількість твердих відходів, що накопичуються на відповідних підприємствах і дасть можливість їм бути використаними як цінна вторинна сировина у виробництві будівельних, теплоізоляційних матеріалів тощо.

2.2. Фізико-механічні властивості досліджуваних матеріалів як об'єктів сушіння

Залізний купорос ($Fe(II)$ сульфат гептагідрат)

$Fe(II)$ сульфат гептагідрат належить до дисперсних матеріалів, а за класифікацією дисперсних матеріалів як об'єктів сушіння [13] його можна охарактеризувати так:

- 1) за видом – дисперсний матеріал;
- 2) за станом зовнішньої поверхні частинок - гладкий;
- 3) за формою частинок – кутастий;
- 4) за розмірами частинок – дрібнозернистий;
- 5) за будовою шару – полідисперсний;
- 6) за механічними властивостями шару:
 - а) під час прикладання перепаду тисків властиве незначне сідання;
 - б) під час зміни вологості у процесі сушіння властиве незначне зменшення об'єму частинок.

Залізний купорос [73] (Ферум (II) сульфат гептагідрат, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$) – дуже гігроскопічні моноклінні кристали світло-зелено-блакитного кольору, які добре розчиняються у воді. За температури $20^{\circ}C$ розчинність залізного купоросу становить 20,01 г/100 г води. У присутності вільної H_2SO_4 розчинність зменшується. Залізний купорос не розчинний в етанолі. Водні розчини $FeSO_4$ мають блідо-зелене забарвлення. На повітрі вивітрюється і

окислюється, забарвлюючись в жовтий колір внаслідок утворення на поверхні $\text{Fe}(\text{OH})\text{SO}_4$.

В інтервалі температур $56, 8^\circ\text{C}$ - 64°C існує стабільний $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ - зеленого кольору, вище 64°C - білий $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$. Він повністю зневоднюється при 300°C , розкладаючись при цьому з виділенням SO_2 , SO_3 і утворенням основного сульфату окису заліза. Безводний FeSO_4 - білий порошок, може бути отриманий зневодненням кристалогідратів в потоці H_2 . За відсутності кисню FeSO_4 розкладається з досить великою інтенсивністю і повнотою при 700°C ; в потоці повітря його розкладання значно прискорюється в присутності відновників - вугілля і піриту (суміш з $82,3\%$ $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$, $15,2\%$ FeS_2 і $2,5\%$ вугілля розкладається в потоці повітря при 600°C за 40 - 60 хв. на 98%). Вплив температури на Ферум (II) сульфат показаний в табл. 2.1

Таблиця 2.1

Вплив температури на залізний купорос

64°C	плавлення гептагідрату (розчинення у власній кристалізаційній воді)
$60-80^\circ\text{C}$	утворення тетрагідрату $\text{FeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$.
$110-160^\circ\text{C}$	утворення безбарвного моногідрату $\text{FeSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
$540-600^\circ\text{C}$	повне зневоднення
600°C і вище	розкладання з утворенням Заліза (III) оксиду Fe_2O_3

Фізичні властивості сульфатів заліза (II), обумовлені кількістю наявних молекул води, подані в табл. 2.2.

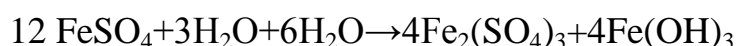
Таблиця 2.2.

Фізичні властивості сульфатів Феруму

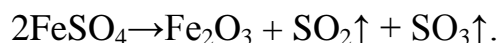
Показник	FeSO ₄	FeSO ₄ ·7H ₂ O	Fe ₂ (SO ₄) ₃
Сингонія	Ромбічна	Моноклінна	Моноклінна
T пл. °C	700	64	вище 600
Густина, г/см ³	3,14	1,898	3,097
C _p ⁰ , Дж/(моль·К)	100,7	394,9	–
ΔH _{обр} ⁰ , кДж/моль	-923	-3014	-2605
S ₂₉₈ ⁰ , Дж/(моль·К)	107,6	409,5	259,2

Хімічні властивості залізного купоросу

Ферум (II) сульфат під дією кисню повітря поступово окислюється, переходячи в сульфат заліза (III):



На повітрі гідрати сульфату Феруму(II), як і безводний сульфат, також окислюються. При сильному нагріванні (вище за 540⁰C) FeSO₄ розкладається за рівнянням реакції:



У водному розчині FeSO₄ гідролізується з виділенням осаду основної солі, а в присутності кисню окислюється до Fe₂(SO₄)₃. Також у водному розчині FeSO₄ відновлює Cu (II) до солей Cu (I), солі золота і срібла - до металів; нітрати і нітроти - до NO, з яким FeSO₄ утворює забарвлений комплекс FeSO₄·NO (якісна реакція на іони NO₃⁻ і NO₂⁻). Відновлення перманганату або біхромату калію розчином FeSO₄ у присутності H₂SO₄ використовується для кількісного

визначення заліза. Сульфат двовалентного заліза утворює з сульфатами лужних металів і амонію подвійні солі, більш стійкі проти окислення, наприклад, сіль Мора $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \times \text{FeSO}_4 \times$.

Жовтий залізоокисний пігмент

Жовтий залізоокисний пігмент (гетит - $\alpha\text{-FeOOH}$) має такі характеристики відповідно до класифікації об'єктів сушіння [13]:

- 1) за видом матеріалу- тверді дисперсні полікристали —агрегати дрібних кристалів
- 2) за станом зовнішньої поверхні частинок - гладкий;
- 3) за формою частинок – кутастий;
- 4) за розмірами частинок – дрібнозернистий;
- 5) за будовою шару – полідисперсний;
- 6) за механічними властивостями шару - під час прикладання перепаду тисків можливе незначне зсідання шару;

Твердість – 5,0–5,5;

Густина – 3300–4300 кг/м³;

Сингонія – ромбічна.

Жовтий гідроокис заліза стійкий до температури 200–250°C, далі переходить у червоний [116].

Органічні відходи виробництва пігментного Ті (IV) оксиду (відпрацьоване деревне борошно)

Відпрацьоване деревне борошно підпадає під таку класифікацію [13, 145]:

- 1) за видом та методом утворення – природний дисперсний матеріал;
- 2) за станом зовнішньої поверхні частинок - шороховатий;
- 3) за формою частинок – овальний;
- 4) за розмірами частинок – дрібнозернистий;

- 5) за будовою шару – полідисперсний;
- б) за механічними властивостями шару:
 - а) під час прикладання перепаду тисків властиве незначне зсідання шару;
 - б) під час зміни вологості у процесі сушіння властиве деяке зменшення об'єму частинок.

Деревне борошно марки Т– це гігроскопічні крупинчасті частинки, утворені в шляхом січення деревної сировини хвойних порід на спеціальних млинах. Відпрацьоване деревне борошно вологе й містить домішки твердих частинок шламу, що складається з нерозкладеного рутилу, піску, гіпсу, ґрунту, чугунної тирси, може бути забрудненим мастильними олівами, просочене сульфатнокислими солями та сірчаною кислотою.

Основними хімічними складниками деревного борошна є полісахарид целюлоза та лігнін – суміш ароматичних полімерів Вони нерозчинні у воді й не гідролізуються внаслідок великої молекулярної маси та через наявність численних внутрішньо- та міжмолекулярних водневих зв'язків. Молекули цих речовин містять такі функціональні групи: гідроксильні, метоксильні, групи простих та складних етерів, альдегідні, карбонільні. На поверхні функціонали утворюють активні центри із різною функцією кислотності. Целюлоза і лігнін – горючі речовини. Сумарний вміст целюлози та лігніну у деревному борошні марки Т становить 87–98 %. Помітна термоокислювальна деструкція починається за температури 160°C.

Коефіцієнт теплопровідності – 1,25 Вт/(м·К).

Питома теплоємність – 1,76 Дж/(кг·К).

2.3. Схема експериментальної установки

Схема експериментальної установки, на якій проводили дослідження процесу фільтраційного сушіння Fe (II) сульфід гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту, представлена на рис. 2.1. Дане апаратурне оформлення дало змогу створити умови для реалізації процесу сушіння фільтраційним методом в стаціонарному шарі досліджуваних матеріалів.

Експериментальна установка (рис. 2.1) працює за таким принципом: задля створення перепаду тисків у стаціонарному шарі матеріалу, який завантажується в контейнер 9, використовується водокільцевий вакуумний насос 1. Він забезпечує розрідження у ресивері 2. Для контролю за перепадом тисків у шарі дисперсного матеріалу встановлений електронний вакуумметр 3. Через систему трубопроводів, оснащених запірним 4 і регулюючим 5 вентилями, ресивер з'єднаний із контейнером 9, а також з електронним витратоміром 6, покази якого фіксує персональний комп'ютер 7. У калорифері 10 відбувається підігрівання теплового агенту до заданої температури. За допомогою вентилятора 11 нагрітий тепловий агент подається в зону сушіння. По обидва боки контейнера (над шаром матеріалу і під шаром на відстані 20 см) встановлені термопари, які подають сигнал на електронний терморегулятор SESTOS D1S 8, що призначений для вимірювання і підтримання заданої температури теплового агенту.

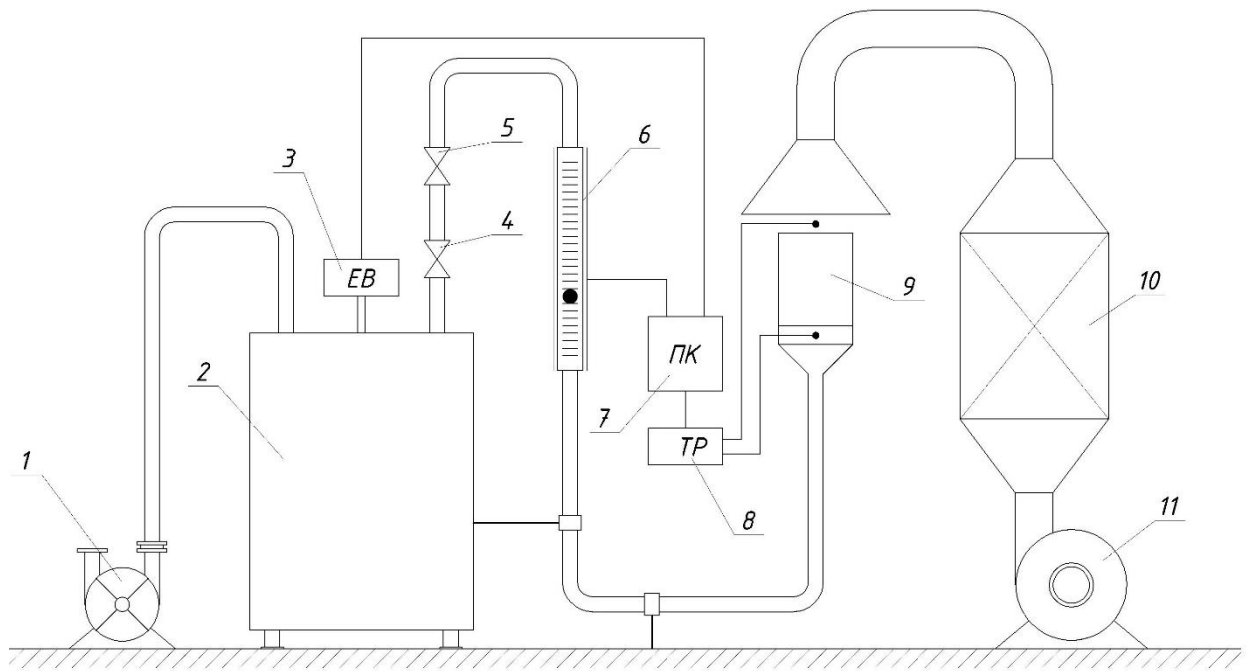


Рис. 2.1. Схема експериментальної установки:

- 1 – водокільцевий вакуумний насос;
- 2 – ресивер;
- 3 – електронний вакуумметр ДВ250А;
- 4, 5 – запірний і регулюючий вентиля;
- 6- електронний витратомір RPF-I;
- 7 – персональний комп'ютер;
- 8 – електронний терморегулятор SESTOS D1S;
- 9 – контейнер;
- 10 – калорифер;
- 11 – вентилятор.

На рис. 2.2 представлена будова контейнера, в якому перебуває Fe(II) сульфат гептагідрат, відпрацьоване деревне борошно або залізоокисний пігмент під час процесу сушіння в експериментальній установці, зображеній на рис. 2.1. Контейнер має форму циліндра заввишки 200 мм та з внутрішнім діаметром 100 мм, який виконаний із термостійкого скла. На стінки циліндра нанесена шкала для зручності вимірювання висоти шару матеріалу. Основою контейнера є перфорована перегородка 2, виконана з теплоізоляційного матеріалу, який

запобігає кондуктивному підігріванню частинок Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту під час фільтраційного сушіння.

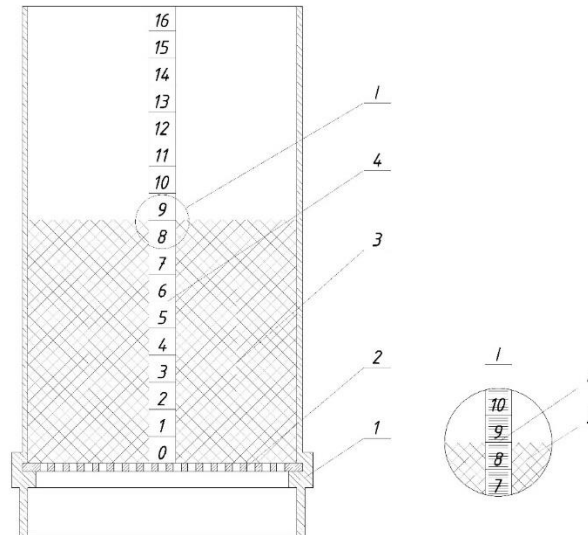


Рис. 2.2. Схема контейнера.

- 1 - корпус контейнера;
- 2. - перфорована перегородка;
- 3. - шар досліджуваного матеріалу;
- 4. - шкала для вимірювання висоти шару матеріалу.

2.4. Методики досліджень

Визначення фізико-механічних характеристик стаціонарного шару дисперсного матеріалу

Дослідження процесу фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту передбачає встановлення параметрів стаціонарного шару цих дисперсних матеріалів, адже особливості гідродинаміки профільовування теплового

агенту крізь шари та закономірності процесів тепло- й масообміну під час фільтраційного сушіння залежать від розмірів та форми частинок, від насипної густини, еквівалентного діаметру каналів, пористості, питомої поверхні тощо [70].

Визначення насипної густини

Насипна густина шару Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту $\rho_{нас}$ визначена відповідно до стандартної методики, описаної в ДСТУ ISO 567-2002 [74]. Матеріал засипався у торований циліндр. Засипання здійснювалось за допомогою лійки до утворення конуса над ємністю. Надлишок частинок матеріалу зрізався шпателем, щоб вирівняти шар відповідно до країв циліндричної ємності. Співвідношення між діаметром ємності та усередненим розміром частинок становило 24,4 (рекомендовано $D/d_{yc} \geq 20$). На аналітичній вазі AXIS-AD3000 проводились зважування і так повторялось 8 разів. Найбільше та найменше значення відкидалися і насипна густина визначилась за формулою [24]:

$$\rho_{нас} = \frac{\sum G_i}{\sum V_i}, \quad (2.1)$$

де $\rho_{нас}$ – насипна густина, кг/м³; G – маса проби матеріалу, кг; V – об'єм проби матеріалу, м³.

Визначення пористості шару дисперсних матеріалів

Пористість шару характеризує частку вільного об'єму в загальному об'ємі матеріалу. Ці значення визначались теоретично відповідно до розрахованих насипних густин Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту на основі рекомендацій, наведених у [146]:

$$\epsilon_{\text{ш}} = 1 - \frac{\rho_{\text{нас}}}{\rho_{\text{іст}}}, \quad (2.2)$$

де $\epsilon_{\text{ш}}$ – загальна пористість шару, м³/м³; $\rho_{\text{нас}}$ – насипна густина шару, кг/м³; $\rho_{\text{іст}}$ – істинна густина матеріалу, кг/м³.

Для відпрацьованого борошна визначалась відкрита пористість, що становить різницю між загальною пористістю і питомим об'ємом ізольованих пор. Методика визначення значення відкритої пористості полягає у використанні двох рідин, нерозчинних одна в одній [72].

У колбу, заповнену бензолом, засипався матеріал, висушений до постійної маси і попередньо зважений на аналітичній вазі та вакуумований впродовж 600 с задля видалення повітря. Залишки бензолу видалялись фільтрувальним папером. Просочений бензолом дисперсний матеріал поміщався у мірний циліндр і визначався об'єм V_3 , який займає досліджуваний матеріал. Тоді мірний циліндр заповнювався дистильованою водою із бюретки до верхнього краю твердих частинок. Об'єм дистильованої води із бюретки приймався за об'єм пор V_n між частинками. Пористість шару розраховувана за формулою:

$$\epsilon_{\text{ш}} = 1 - \frac{V_n}{V_3}. \quad (2.3)$$

Визначення гранулометричного складу

Відповідно до стандартної методики ситового аналізу [70] проводили визначення гранулометричного складу Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту. Для аналізу дисперсного складу Fe (II) сульфат гептагідрату та залізоокисного пігменту взяли набір сит з розмірами отворів 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм, для відпрацьованого деревного борошна - 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм. З матеріалів

сформували по 20 проб, масою 900 г кожна. Для проведення аналізу проби матеріалів засипали на верхнє сито і весь комплект сит встановлювали на лабораторний грохот AS 300 та струшували впродовж двадцяти хвилин.

Залишок матеріалу на кожному ситі зважували за допомогою електронної ваги AXIS-AD3000 і обчислювали вміст кожної утвореної фракції у вихідній пробі у відсотках за масою. Гранулометричний склад полідисперсних сумішей визначали шляхом знаходження середніх значень із усіх проб.

Визначення усередненого діаметру частинок

Діаметри частинок кожної фракції із кожної фракції Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту вимірювали за допомогою мікроскопа МБЧ-11 (для досліджень відбирали по 100 частинок кожної фракції) і визначали усереднений діаметр частинок за залежністю [70]:

$$d_{yc} = \sum \frac{x_i \cdot d_i}{x_i}, \quad (2.4)$$

де d_{yc} – усереднений діаметр частинок фракції, м;

d_i – діаметр частинки фракції, м;

x_i – масова частка частинок з розміром d_i .

Визначення питомої поверхні шару дисперсного матеріалу

Під час сушіння дисперсних матеріалів шляхом профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар, поверхня тепло- і масопередачі дорівнюватиме питомій поверхні шару, величина якої розрахована за формулою [24]:

$$a = f_{ym} \cdot k_e, \quad (2.5)$$

де a - питома поверхня шару, $\text{м}^2/\text{м}^3$; $f_{\text{ум}}$ – умовна питома поверхня шару дисперсного матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$; k_e – коефіцієнт взаємного екранування.

$$f_{\text{ум}} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon_{\text{ш}})}{d_{\text{ч}} \cdot \Phi}, \quad (2.6)$$

де Φ – коефіцієнт форми частинок.

Визначення еквівалентного діаметру каналів між частинками в стаціонарному шарі матеріалу

Стаціонарний шар залізного купоросу та залізоокисного пігменту утворений з кристалів кутастої форми. Шар деревного борошна утворений частинками, наближеними до овальної форми. Між частинками існують канали, крізь які профільтровується тепловий агент під час реалізації процесу фільтраційного сушіння. Еквівалентний діаметр цих каналів є одним із визначальних розмірів досліджуваного стаціонарного шару.

Еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент, розрахований із залежності [72]:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon_{\text{ш}}}{a} . \quad (2.7)$$

Дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсних матеріалів

Гідродинаміка руху теплового агенту крізь стаціонарні шари Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного

пігменту досліджена на експериментальній установці, схема якої представлена на рис. 2.1. Формування шару належної висоти проводилось в контейнері 9, схема якого представлена на рис. 2.4. Формування шарів уточнювалось на основі відомої насипної густини шляхом зважування контейнера 9 з матеріалом на електронній вазі AXIS-AD3000 для забезпечення однакової пористості шару. Щоб запобігти провалюванню матеріалу за межі сушильного обладнання, встановлена перфорована перегородка з діаметром отворів меншим, ніж розмір найменших частинок. Згідно з рекомендаціями, наведеними у [89], живий переріз перфорованої перегородки становив 40%, за якого опір перфорованої перегородки є значно меншим за опір шару матеріалу і ним можна знехтувати. Висота шару Fe (II) сульфат гептагідрату становила 60, 90, 120, 150 мм; залізоокисного пігменту – 10, 20, 30, 40, 50, 60 мм; відпрацьованого деревного борошна – 20, 30, 40, 50, 60, 70 мм.

Для проведення досліджень, контейнер 9 з матеріалом під'єднувався до ресивера 2. Далі вмикався водокільцевий вакуум-насос 1 і за допомогою регулюючого вентиля 5 встановлювались різні витрати теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу. Витрата теплового агенту визначалася за показами витратоміра 6, а втрати тиску – за показами електронного вакуумметра 3. Експеримент із заданою висотою шару матеріалу повторювався не менше 5-6 разів для отримання об'єктивних даних, щоразу використовуючи свіжу пробу матеріалу.

Дослідження зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату методом термічного аналізу.

Дослідження зразків $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ проведені на дериватографі Q – 1500 D системи «Паулік – Ердей» з реєстрацією сигналу втрати маси та теплових ефектів за допомогою комп'ютера [147]. Зразки проаналізовані в динамічному режимі з швидкістю нагрівання 0,6, 1,25, 2,5 та 5 °C/хв в середовищі повітря.

Маса наважки становила 200 мг. Еталонною речовиною був алюміній оксид Al_2O_3 .

Калібрування електроваг [148]. Наважка алюміній оксиду масою 200 мг була поміщена в тримач зразка та зареєстрована його маса. Встановлювалась швидкість нагрівання відповідно до інструкції виробника ($5^\circ\text{C}/\text{хв}$) і поступово підвищувалась температура. Реєстрація термогравіметричної кривої здійснювалась у вигляді графіка: температура відкладена по осі абсцис зі зростанням зліва направо, маса – по осі ординат зі зменшенням донизу. Підвищення температури припинялось за температури 250°C . На кривій залежності маси від температури або маси від часу вимірялась відстань між початковим і кінцевим плато, що відповідає втраті маси зразка.

Аналогічна послідовність проведення операцій виконана для Ферум (II) сульфат гептагідрату. Втрату маси випробовуваного зразка визначені, вимірюючи відстань між початковим і кінцевим плато на одержаній термогравіметричній кривій. Втрата маси виражена як $\Delta m/m$, у відсотках. Оскільки умови випробування є критичними, для кожного вимірювання зазначені: швидкість потоку газу і його склад, масу зразка, швидкість нагрівання, температурний діапазон, умови підготовки зразка, включаючи ізотермічний період.

Дослідження теплообміну між тепловим агентом та кристалами Ферум(II) сульфат гептагідрату

Дослідження теплообміну між тепловим агентом та кристалами Ферум(II) сульфат гептагідрату для подальшого визначення коефіцієнтів тепловіддачі проведені на експериментальній установці фільтраційного сушіння (рис.2.1) у «тонкому» стаціонарному шарі матеріалу для забезпечення

рівномірності профільтрування теплового агенту і незначної різниці температури верхнього і нижнього шару. Для формування шару матеріалу висотою $H=10 \cdot 10^{-3}$ м використаний скляний контейнер 9 з внутрішнім діаметром 100 мм, оснащений дюралевим перфорованим дном та теплоізоляційною вставкою з фторопласту для усунення кондуктивної складової нагрівання.

Тепловий агент за допомогою вентилятора 11 подавався в калорифер 10, у якому нагрівався до температури $335 \pm 0,5$ К (попередньо обґрунтованої з точки зору температурного режиму дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату). Стала температуру над шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату підтримувалась за допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S 8 та вимірювалась за допомогою хромель-копель термопар, розміщених посередині контейнера на висоті 20 мм над матеріалом.

Після досягнення належної температури теплового агенту, контейнер, із сформованим шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату, був встановлений в експериментальну установку, в якій було забезпечене профільтрування теплового агенту крізь шар матеріалу в діапазоні вибраних швидкостей. Необхідна витрата потоку сушильного агенту встановлювалась за допомогою регулюючого вентиля 5 і реєструвалась за допомогою електронного витратоміра RPF-I 6. Дослідження проводились за фіктивних швидкостей руху теплового агенту від 0 до 2 м/с.

Температури теплового агенту на виході з шару матеріалу виміряні в шести точках (у центрі контейнера і на відстані 5, 10, 20, 30, 40 мм від стінки контейнера) за допомогою хромель-копель термопар, встановлених на відстані 20 мм під перфорованим дном контейнера. Остаточне значення температури визначене як середнє арифметичне із шести значень. Усі термопари були під'єднані до восьмиканального вимірювального перетворювача PT8-1000 з виведенням інформації на персональний комп'ютер. Експеримент припинявся за досягнення на виході сталої температури теплового агенту протягом певного часу. Кожен експеримент проводився тричі для отримання достовірних даних.

Дослідження кінетики під час фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту

Дослідження кінетики фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту здійснювались на експериментальній установці, схема якої представлена на рис. 2.1.

Початковий вологовміст залізного купоросу визначений за залежністю:

$$\omega^c = \frac{G_n - G_{\text{сух}}}{G_{\text{сух}}}, \quad (2.8)$$

де ω^c – початковий вологовміст залізного купоросу, кгН₂О/кг сух. мат.

G_n – початкова маса залізного купоросу, кг;

$G_{\text{сух}}$ – маса сухого матеріалу, кг.

Аналогічно визначали початковий і рінважний вологовміст для залізоокисного пігменту та відпрацьованої деревного борошна.

Дослідження кінетики процесу дегідратації залізного купоросу проводили за температури 62⁰С за різних висот шару матеріалу (30, 60, 90, 120 мм) та за різних швидкостей профільтровування теплового агенту (0,46; 0,61; 0,86, 1,11; 1,61 м/с). Дослідження кінетики процесу сушіння залізоокисного пігменту здійснювали за температури 40, 60, 80, 100 ⁰С за різних висот шару матеріалу (30, 40, 50, 60 мм) та за різних перепадів тисків (16000, 20000, 25000,35000 Па), а відпрацьованого деревного борошна – за таких умов: температури 40, 60, 80, 100 ⁰С, висот шару матеріалу 30, 40, 50, 60 мм, перепадів тисків 16000; 20000, 25000, 35000 Па.

За допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S встановлювалась задана температура теплового агенту, а за допомогою регулюючого вентиля - витрата теплового агенту, яка вимірювалась за допомогою електронного витратоміра.

В контейнері 9, схема якого представлена на рис. 2.2, був сформований шар матеріалу відповідної висоти. Задля забезпечення однозначних умов проведення експерименту, висота шару контролювалася, виходячи із відомого значення насипної густини. В той же час вмикався вентилятор та калорифер, а після досягнення заданої температури, яка регулювалася за допомогою електронного терморегулятора SESTOS D1S, встановлювався контейнер 9 на ресивер 2 з відповідним шаром дисперсного матеріалу, і включався вакуум-насос, відкривався запірний вентиль 5 і проводився процес сушіння. В ході експерименту визначалась зміна маси матеріалу через відповідні проміжки часу (30-60 с) ваговим методом.

Зважування відбувалось на електронних вагах AXIS-AD3000, час зважування становив не більше 10-15 с. Сушіння тривало до досягнення матеріалом сталої маси.

2.5. Оцінка похибок вимірювання

Точність розрахунків визначена з врахуванням похибки вимірювання геометричних і технологічних параметрів. Оцінка похибки вимірювання (табл. 2.1) здійснена на основі рекомендацій, наведених в [10-14].

Зміна маси досліджуваних матеріалів під час висушування вимірювалася за допомогою електронної ваги AXIS-AD3000 (до 3000 г з точністю вимірювання до 0,01 г). Час вимірювали за допомогою електронного секундоміра фірми Casio моделі HS-6 (точність вимірювання 0,01 с).

Зміна температури фіксувалася за допомогою ХК термопар та вимірювальних пристроїв PT8-1000, PT-0102. Сталість температури теплового агенту підтримувалася за допомогою терморегулятора SESTOS D1S (точність $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$). Вимірювання витрати теплового агенту здійснювалося за допомогою

ротаметра РПФ-I, перепад тиску – за допомогою електронного вакуумметра ДВ250А.

Середньоквадратичне відхилення розрахункових значень від експериментально отриманих розраховували за формулою [14]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum (X - \bar{X})^2}{n - 1}}, \quad (2.9)$$

де X – розраховане значення;

\bar{X} – усереднене експериментальне значення;

n – кількість вимірювань.

Відносна похибку визначена за формулою [74]:

$$\Delta = \left| \frac{X_e - X_m}{X_e} \right|, \quad (2.10)$$

де X_e та X_m – експериментальне та теоретично розраховане значення відповідно.

У табл. 2.3 представлені результати розрахунку границь похибок основних величин, що визначались шляхом прямого вимірювання.

Таблиця 2.3

Границі похибки прямих вимірювань

Величина	Позначення	Один. вим.	Прилад	Похибка	
				Абсолютна	відносна
Маса	G	Кг	Електронна вага AXIS-AD3000	$1 \cdot 10^{-7}$	$5 \cdot 10^{-10}$
Об'єм	V	m^3	Мірний циліндр	$1 \cdot 10^{-6}$	$5 \cdot 10^{-9}$
Температура	T	$^{\circ}C$	ХК термопара РТ8-1000	$1 \cdot 10^{-1}$	$1 \cdot 10^{-3}$
			ХК термопара РТ-0102	1	$1 \cdot 10^{-2}$

Об'ємна витрата	V_c	$\frac{m^3}{c}$	Ротаметр РПФ-І,	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$
Перепад тисків	ΔP	$\frac{кгс}{см^2}$	U-подібний манометр	1	$4 \cdot 10^{-3}$
		мм.вод.ст.	електронного вакуумметр ДВ250А	$1 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-6}$
Час	τ	С	Електронний секундомір Casio HS-6	0,01	0,01

Висновки до другого розділу

1. Наведене обґрунтування вибору об'єктів дослідження та подані їх основні фізико-механічні характеристики.

2. Наведена принципова схема та принцип роботи експериментальної установки для дослідження: гідродинаміки, тепло- та масообміну, кінетики та динаміки видалення вологи під час фільтраційного сушіння Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту.

3. Обґрунтований вибір методик для визначення основних структурно-механічних властивостей стаціонарного шару Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту (гранулометричного складу та основних фізичних характеристик пористої структури шару).

3. Представлена методика проведення термічного аналізу Fe (II) сульфат гептагідрату.

4. Наведені методики дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар Fe (II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна та залізоокисного пігменту та кінетики їх фільтраційного сушіння, а також теплообміну в шарі Fe (II) сульфат гептагідрату.

Основні результати опубліковані в працях [56, 65, 133].

РОЗДІЛ 3

ГІДРОДИНАМІКА РУХУ ТЕПЛОВОГО АГЕНТУ КРІЗЬ СТАЦІОНАРНИЙ ШАР ДИСПЕРСНОГО МАТЕРІАЛУ

Для зневоднення дисперсних матеріалів, які є побічними та супутніми продуктами виробництва пігментного Ti(IV) оксиду (Fe(II) сульфат гептагідрату, жовтого залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна) запропонована високоінтенсивна технологія фільтраційного сушіння, суть якого полягає у профільтровуванні теплового агента крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу під дією перепаду тисків, на створення якого затрачається енергія і її величина залежить від таких чинників як фізико-механічні характеристики матеріалу, висота шару та швидкість профільтровування, тому першим і надзвичайно важливим етапом дослідження є встановлення гідродинамічних закономірностей стаціонарного шару [1,74].

Проведені експериментальні дослідження закономірностей зміни гідравлічного опору стаціонарного шару матеріалу (ΔP) від фіктивної швидкості руху теплового агента. Аналіз результатів досліджень гідродинаміки руху теплового агента крізь шар матеріалу, який потрібно зневоднити, дає відповідь на питання доцільності застосування саме фільтраційного способу сушіння.

3.1. Визначення фізико-механічних характеристик стаціонарного шару дисперсних матеріалів

Як було зазначено вище, на гідравлічний опір стаціонарного шару під час профільтровування крізь нього теплового агента в процесі фільтраційного сушіння істотний вплив має структурна будова шару матеріалу. Тому для характеристики останнього та щоб мати змогу узагальнити подальші

результати досліджень, визначені такі параметри стаціонарного шару досліджуваних матеріалів:

- гранулометричний склад;
- розміри та форми частинок;
- усереднений діаметр частинок (d_e);
- насипну густину (ρ_n);
- пористість шару ($\epsilon_{ш}$);
- питому поверхню (a);
- еквівалентний діаметр каналів (d_e).

Визначення фізико-механічних характеристик шару Ферум (II) сульфат гептагідрату

Під час реалізації процесу фільтраційного сушіння Ферум (II) сульфат гептагідрату, який є полідисперсною сумішшю частинок кутастої форми, перебуває в стаціонарному шарі. Відповідно до методики, представленої в другому розділі, визначений гранулометричний склад Феруму (II) сульфат гептагідрату ситовим методом, для чого 18 кг матеріалу просіяні через стандартний набір сит з розмірами вічок 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм, а залишки на ситах зважені та обчислений вміст купоросу на кожному з них.

$$a_i = \frac{m_i}{m} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

де a_i – часткові залишки, %;

m_i – маса залишку на даному ситі, кг;

m – маса просіюваної наважки, кг.

$$A_i = a_{2,5} + a_{1,25} + \dots + a_i, \quad (3.2)$$

де A_i – повні залишки на кожному ситі, мас. %;

$a_{2,5}; a_{1,25}; a_i$ – часткові залишки на ситах з розмірами отворів, більшими від того, на якому визначають повний залишок, мас. %.

Результати досліджень гранулометричного складу залізного купоросу представлені у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1.

Гранулометричний склад Ферум (II) сульфат гептагідрату

Розміри вічок сит, мм	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16
Часткові залишки, %	0,9	4,2	69,1	21,6	4,2
Повні залишки, %	0,9	5,1	74,2	95,8	100

Для наочності отримані результати представлені на рис. 3.1 у вигляді гістограми.

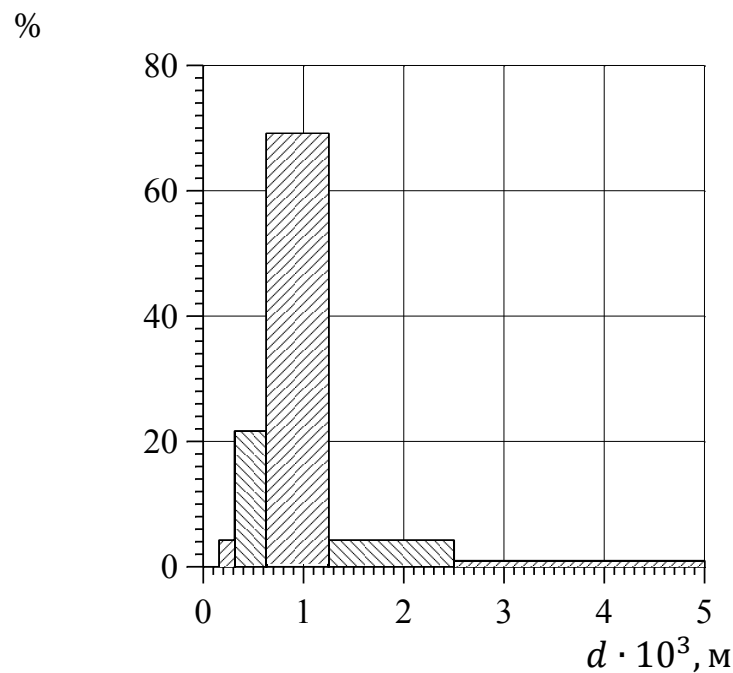


Рис. 3.1. Гістограма дисперсного складу Ферум (II) сульфат гептагідрату

Усереднений діаметр частинок матеріалу обчислений за формулою [9]:

$$d = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{x_i}{d_i}}, \quad (3.3)$$

де x_i – об’ємна або масова частка частинок з діаметром d_i , d_i – середній діаметр частинок відповідної фракції.

Відповідно до методики (див. Розділ 2) визначена насипна густина шару Ферум (II) сульфат гептагідрату, яка залежить від форми частинок дисперсного матеріалу, гранулометричного складу шару і вологості. Розрахунок здійснений за рівнянням:

$$\rho_n = \frac{m_k}{V}, \quad (3.4)$$

де m_k – маса проби Феруму (II) сульфат гептагідрату, кг;

V – об’єм проби в циліндрі, м³.

Результати визначення насипної густини Ферум (II) сульфат гептагідрату представлені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2.

Визначення насипної густини Ферум (II) сульфат гептагідрату

$m_k \cdot 10^3, \text{ кг}$	120,1	119,7	120,1	120,9	119,9	119,2	119,7	119,9
$V \cdot 10^6, \text{ м}^3$	133							
$\rho_n, \text{ кг/м}^3$	903	900	903	909	901	905	900	901
$\rho_{n, \text{ср}}, \text{ кг/м}^3$	902,75							

Попередньо визначене значення насипної густини шару залізного купоросу дало змогу розрахувати пористість шару:

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_n}{\rho_{\text{іст}}}\right), \quad (3.5)$$

де $\rho_{\text{іст}}$ - істинна густина (Ферум (II) сульфат гептагідрат $\rho_{\text{іст}} = 1890 \text{ кг/м}^3$ [73]).

Розрахунок питомої поверхні шару Феруму (II) сульфат гептагідрату здійснювався через усереднені значенням розмірів частинок, беручи до уваги коефіцієнт форми частинок та коефіцієнт взаємного екранування поверхні:

$$a = f_{\text{ум.}} \cdot k_e, \quad (3.6)$$

де $f_{\text{ум.}}$ – умовна питома поверхня шару дисперсного матеріалу, $\text{м}^2/\text{м}^3$, k_e – коефіцієнт взаємного екранування, $k_e = 0,71$ [13].

$$f_{\text{ум.}} = \frac{6 \cdot (1 - \varepsilon_w)}{d_q \cdot \Phi}, \quad (3.7)$$

де Φ - коефіцієнт форми частинок, $\Phi = 0,767$ [13].

Еквівалентний діаметр каналів між частинками шару визначений із залежності [146]:

$$d_e = \frac{4 \cdot \varepsilon}{a} \quad (3.8)$$

Обчислені значення основних характеристик шару залізного купоросу зведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3.

Характеристики шару Ферум (II) сульфат гептагідрату

$\rho_{\text{іст.}}$, $\text{кг}/\text{м}^3$	ρ_n , $\text{кг}/\text{м}^3$	$d_e \cdot 10^3$, м	$d_q \cdot 10^3$, м	a , $\text{м}^2/\text{м}^3$	ε , $\text{м}^3/\text{м}^3$
1890	902,75	0,4	0,77	3750	0,48

Визначення фізико-механічних характеристик шару залізоокисного пігменту

Жовтий залізоокисний пігмент - це полідисперсна суміш частинок кутастої форми, що перебуває в стаціонарному шарі під час процесу фільтраційного сушіння. Згідно з методикою, наведеною в другому розділі, визначений дисперсний склад шару залізоокисного пігменту ситовим методом,

для чого через стандартний набір сит з розмірами вічок 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм просіяні 20 кг висушеного матеріалу, а залишки на ситах зважені та за формулами (3.1) і (3.2) обчислений вміст матеріалу на кожному з них.

Результати досліджень гранулометричного складу залізоокисного пігменту представлені на рис. 3.2.

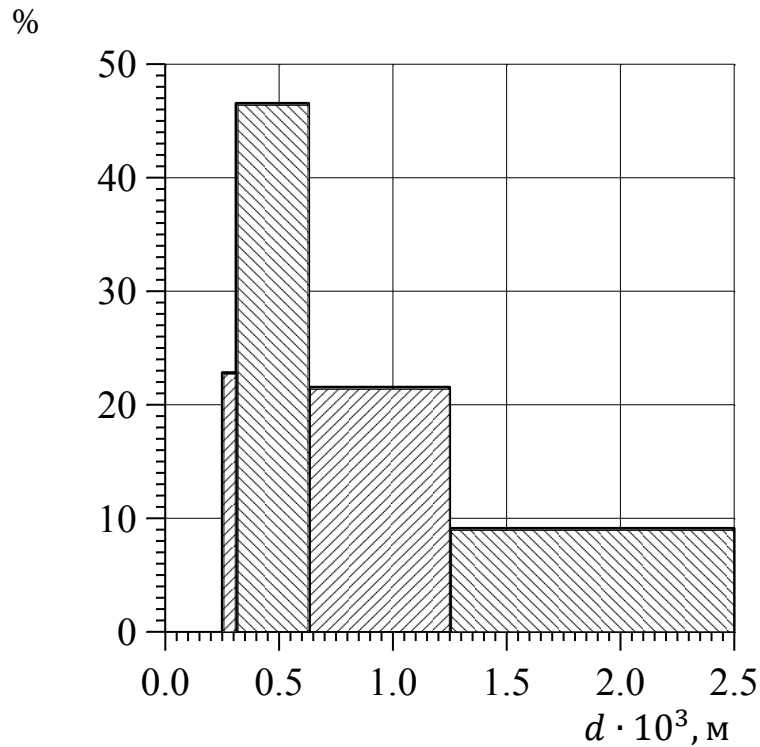


Рис. 3.2. Гістограма дисперсного складу залізоокисного пігменту

Усереднений діаметр частинок залізоокисного пігменту обчислений за формулою (3.3), для чого вимірювався діаметр кожної із ста частинок, взятих із різних точок шару досліджуваного матеріалу. Насипна густина шару залізоокисного пігменту визначена відповідно до методики, описаної в другому розділі. Розрахунок здійснений за рівнянням (3.4). Пористість шару розрахована за формулою (3.5), а питома поверхня – за формулою (3.6). Еквівалентний діаметр каналів між частинками шару визначений із залежності (3.8).

Для розрахунку використані такі дані: коефіцієнт форми частинок $\Phi=0,7$ [146], істинна густина жовтого залізоокисного пігменту $\rho_{\text{іст}} = 3800 \text{ кг/м}^3$ [124], коефіцієнт взаємного екранування $k_e = 0,7$ [146].

Значення основних характеристик шару залізоокисного пігменту наведені в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4

Характеристики шару залізоокисного пігменту

$\rho_{\text{іст}}, \text{кг/м}^3$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$d_e \cdot 10^3, \text{м}$	$d_q \cdot 10^3, \text{м}$	$a, \text{м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$
3800	2204	0,162	0,48	7355	0,42

Визначення фізико-механічних характеристик шару відпрацьованого деревного борошна

Відпрацьоване деревне борошно є полідисперсною сумішшю частинок овальної форми, яка сушиться в стаціонарному шарі фільтраційним способом. Для визначення гранулометричного складу даного матеріалу використані сита 1,25; 0,63; 0,315; 0,16 мм. Дослідження проводились за методикою, описаною в другому розділі, а всі розрахунки – аналогічно як у п.п. 3.1.1 і 3.1.2

Результати досліджень гранулометричного складу деревного борошна представлені на рис. 3.3., а розраховані значення основних характеристик шару наведені в таблиці 3.6. Під час розрахунків використані такі величини: $\Phi=0,82$ [13], $\rho_{\text{іст}} = 1540 \text{ кг/м}^3$ [], коефіцієнт взаємного екранування, $k_e = 0,85$ [13].

Таблиця 3.5

Характеристики шару відпрацьованого деревного борошна

$\rho_{\text{іст}}, \text{кг/м}^3$	$\rho_n, \text{кг/м}^3$	$d_e \cdot 10^3, \text{м}$	$d_q \cdot 10^3, \text{м}$	$a, \text{м}^2/\text{м}^3$	$\varepsilon, \text{м}^3/\text{м}^3$
1540	120	0,0177	0,06	3750	0,48

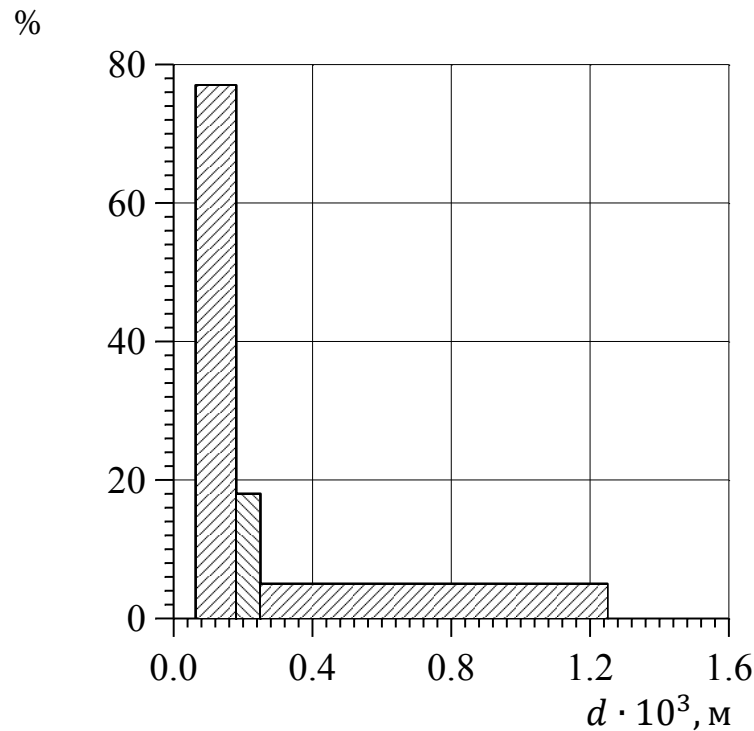


Рис. 3.3. Гранулометричний склад відпрацьованого деревного борошна

3.2 Гідродинаміка стаціонарного шару дисперсних матеріалів

Гідродинамічні дослідження під час профільтрювання теплового агенту крізь стаціонарний шар дисперсного матеріалу мають важливе значення, адже величина гідравлічного опору шару визначає енергетичні затрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння і дає змогу судити про доцільність його застосування.

Гідродинаміка стаціонарного шару Ферум (II) сульфат гептагідрату

Досліджена гідродинаміка профільтрювання теплового агенту крізь стаціонарний шар Ферум (II) сульфат гептагідрату за різних висот шару ($6 \cdot 10^{-2}$, $9 \cdot 10^{-2}$, $12 \cdot 10^{-2}$, $15 \cdot 10^{-2}$ м) в межах зміни фіктивної швидкості газового потоку $0 < v_0 \leq 2,0$ м/с за методикою, яка описана в другому розділі.

Результати експериментальних досліджень представлені у вигляді параболічних кривих, зображених на рис.1. Аналіз даних залежностей вказує на те, що із збільшенням товщини шару матеріалу від $60 \cdot 10^{-3}$ м до $150 \cdot 10^{-3}$ м його гідравлічний опір зростає від 5000 Па до 12000 Па за швидкості руху теплового агенту 1,2 м/с. Такий незначний гідравлічний опір рухові теплового агенту в заданому діапазоні швидкостей дає змогу обґрунтувати доцільність застосування фільтраційного сушіння як енергозберігаючого методу зневоднення залізного купоросу.

ΔP , Па

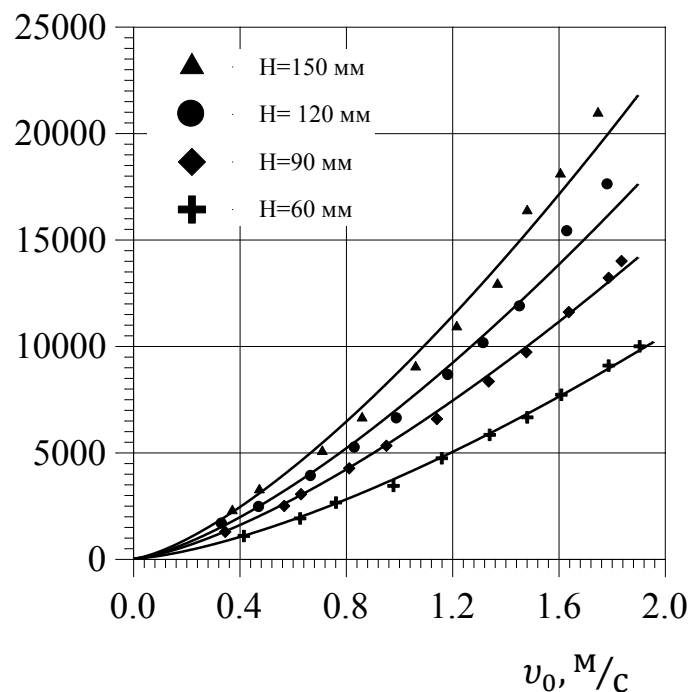


Рис. 3.1. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі залізного купоросу від фіктивної швидкості руху теплового агенту

Параболічний характер кривих вказує на те, що на величину гідравлічного опору шару має вплив як в'язкісна, так і інерційна складові [1]. Отже, для визначення гідравлічного опору стаціонарного шару залізного купоросу необхідно розглянути і взяти до уваги як внутрішню, так і зовнішню задачу гідродинаміки.

Характерним розміром у випадку зовнішньої задачі прийнятий усереднений діаметр частинок дисперсного матеріалу, розрахований вище, а у разі вивчення внутрішньої задачі – еквівалентний діаметр каналів між частинками.

З метою узагальнення результатів експериментальних досліджень для опису гідродинаміки стаціонарного шару залізного купоросу, наведених на рис. 3.1, використані критерії Ейлера [72] та Лейбензона [105].

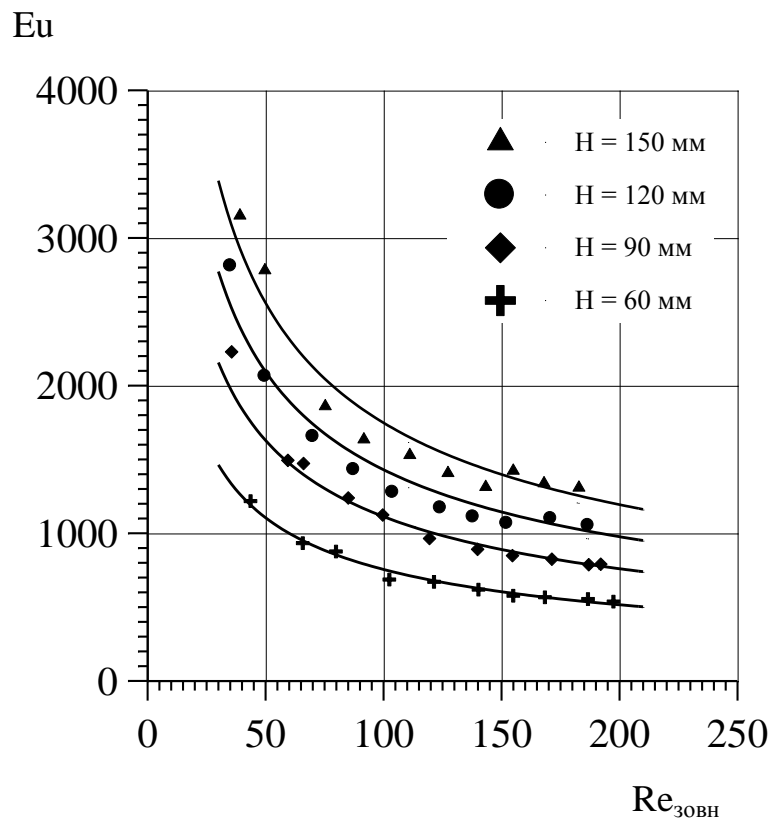


Рис. 3.2. Залежність критерію Ейлера від критерію Рейнольдса

Зовнішня задача гідродинаміки представлена на рис. 3.2. у вигляді критеріальної залежності $Eu = f(Re_{зovн})$. А після представлення експериментальних даних (рис.3.2) в логарифмічних координатах та їх апроксимації степеневою функцією отримана розрахункова залежність:

$$Eu_{зovн} = 155 \cdot Re_{зovн}^{-0,55} \cdot \frac{H}{d_{ч}} \quad (3.9)$$

Внутрішня задача гідродинаміки представлена на рис.3.3 у вигляді залежності числа Ейлера від геометричного симплексу H_e/d_e за різних чисел Рейнольдса. Критеріальна залежність у цьому випадку має вигляд:

$$Eu_{вн.} = A \cdot Re_{вн.}^x \cdot H_e/d_e \quad (3.10)$$

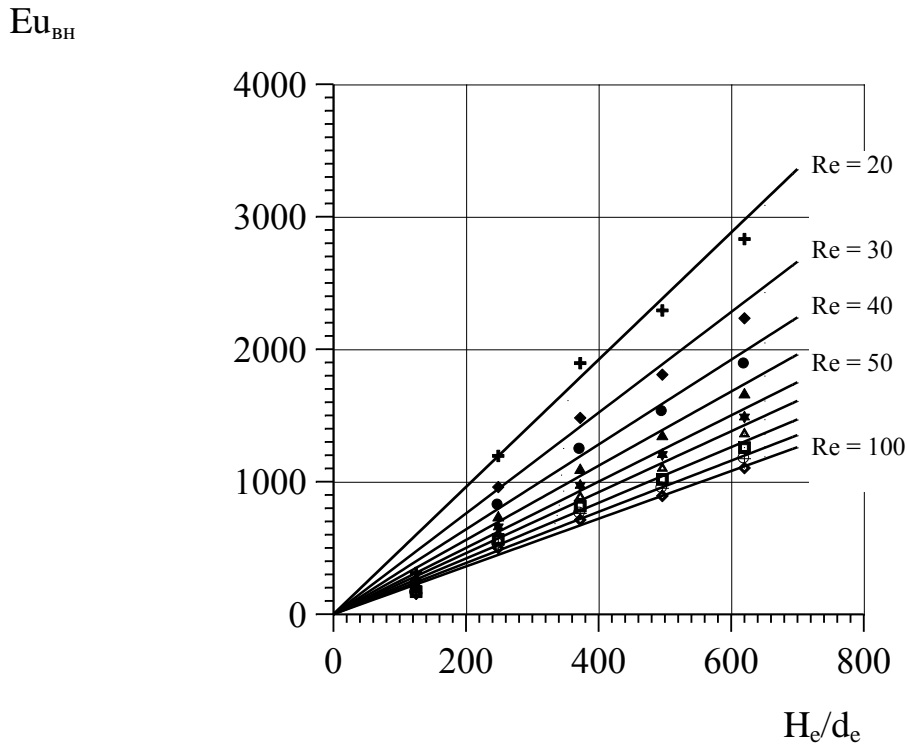


Рис. 3.3. Залежність числа Ейлера від геометричного симплексу за різних значень числа Рейнольдса

Визначені невідомі коефіцієнти “А” та показник степеня “х” за тангенсом кута нахилу прямих до осі абсцис для кожного значення числа Рейнольдса (рис. 3.3). Графічна залежність коефіцієнта A від числа Рейнольдса (рис. 3.4), де визначальним розміром є еквівалентний діаметр каналів d_e , крізь які фільтрується газовий потік, має форму гіперболи, тому вона апроксимована степеневою функцією. В такий спосіб визначені невідомі коефіцієнти A та x і отримані рівняння:

$$Eu_{вн} = 29 \cdot Re_{вн.}^{-0,6} \cdot \frac{H_e}{d_e}, \quad (3.11)$$

де H_e – еквівалентна висота каналів, крізь які фільтрується тепловий агент. Згідно з рекомендаціями, які наведені у технічній літературі [Аеров], $H_e = 1,5 \cdot H$ (H – висота шару дисперсного матеріалу).

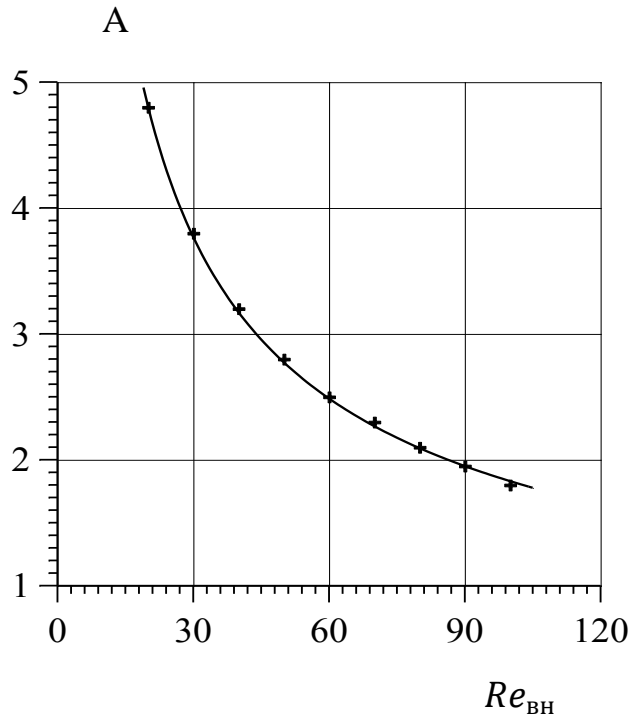


Рис. 3.4. Залежність коефіцієнта А від критерію Рейнольдса

На рис. 3.5 у логарифмічних координатах представлена графічна залежність числа Лейбензона (Ω) від числа Рейнольдса для опису гідродинаміки стаціонарного шару Ферум (II) сульфат гептагідрату. Відомо [105], що у випадку чисто в'язкісного режиму $\Omega \sim Re$, а для квадратичного закону опору $\Omega \sim Re^n$.

Апроксимувавши ці дані степенною функцією, отримана така розрахункова залежність:

$$\Omega = 27 \cdot Re^{1,42} \quad (3.12)$$

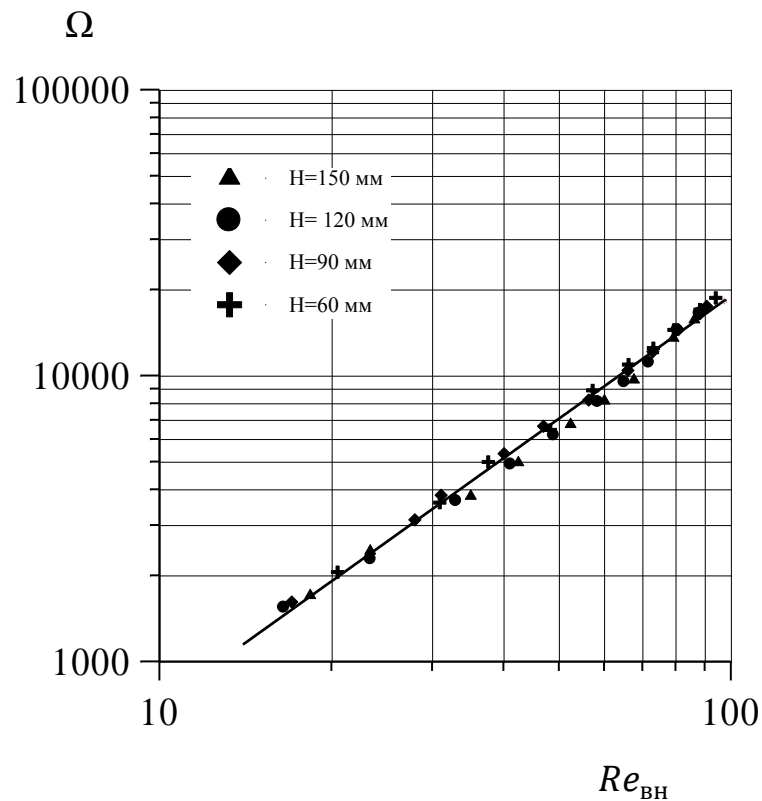
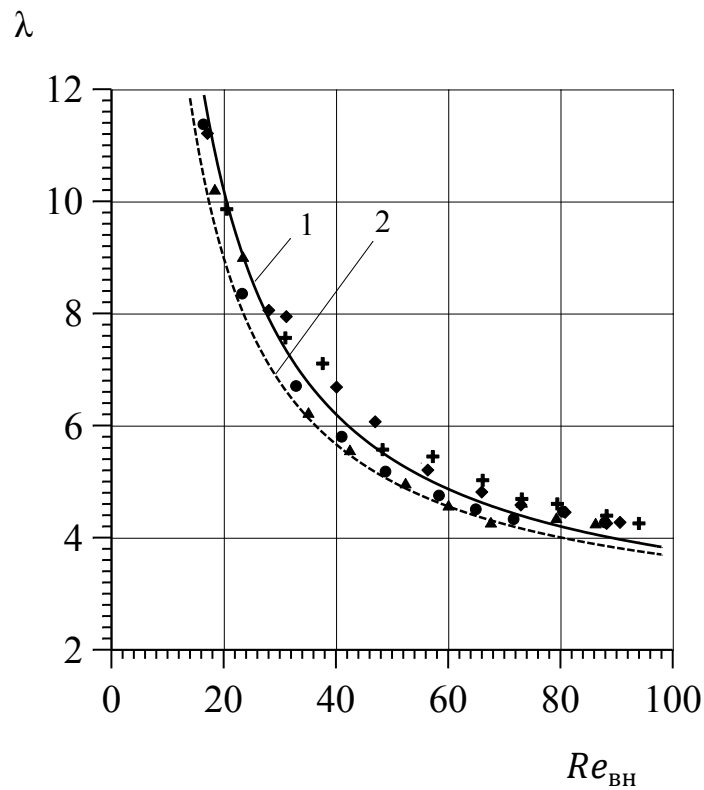


Рис. 3.5. Залежність критерію Лейбензона від критерію Рейнольдса

Розрахунок втрат тиску також проведений відповідно до залежності Дарсі-Вейсбаха (1.3), у якій невідомою величиною є коефіцієнт гідравлічного опору λ , а також на основі відомої залежності (1.4). На рис. 3.6 представлені графічні залежності $\lambda = f(Re_{BH})$ для обох випадків. В першому випадку визначений коефіцієнт гідравлічного опору на основі експериментальних даних, наведених на рис. 3.1, а в другому - на основі відомої залежності (1.4). Результати наведені на рис. 3.6. Апроксимація степеневою функцією експериментальних даних, наведених на рис. 3.6, дала змогу отримати наступну розрахункову залежність:

$$\lambda = \frac{160}{Re_{BH}} + 2,2. \quad (3.13)$$

Розбіжність між коефіцієнтами опору, визначеними згідно з розрахунковою залежністю (3.13) та відомою формулою (1.6) пояснюється тим, що частинки залізного купоросу мають неправильну форму, а єдина методика визначення усереднених розмірів частинок неправильної форми відсутня.



$$1 - \lambda = \frac{160}{Re_{BH}} + 2,2; \quad 2 - \lambda = \frac{133}{Re_{BH}} + 2,34$$

Рис. 3.6. Залежність коефіцієнту гідравлічного опору шару залізного купоросу від критерію Рейнольдса

Для прогнозування втрат тиску в шарі залізного купоросу в широких межах числа Рейнольдса також використана модифікована формула Ергана:

$$\Delta P = H \cdot \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0 \cdot (1 - \varepsilon)^2}{d_q^2 \cdot \varepsilon^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2 \cdot (1 - \varepsilon)}{d_q \cdot \varepsilon^3}, \quad (3.14)$$

На рис. 3.7 наведена кореляційна залежність між розрахованими згідно з наведеними вище залежностями та експериментальними даними для порівняння їх точності.

$$\frac{\Delta P_{\text{експ}}}{\Delta P_{\text{теор}}}$$

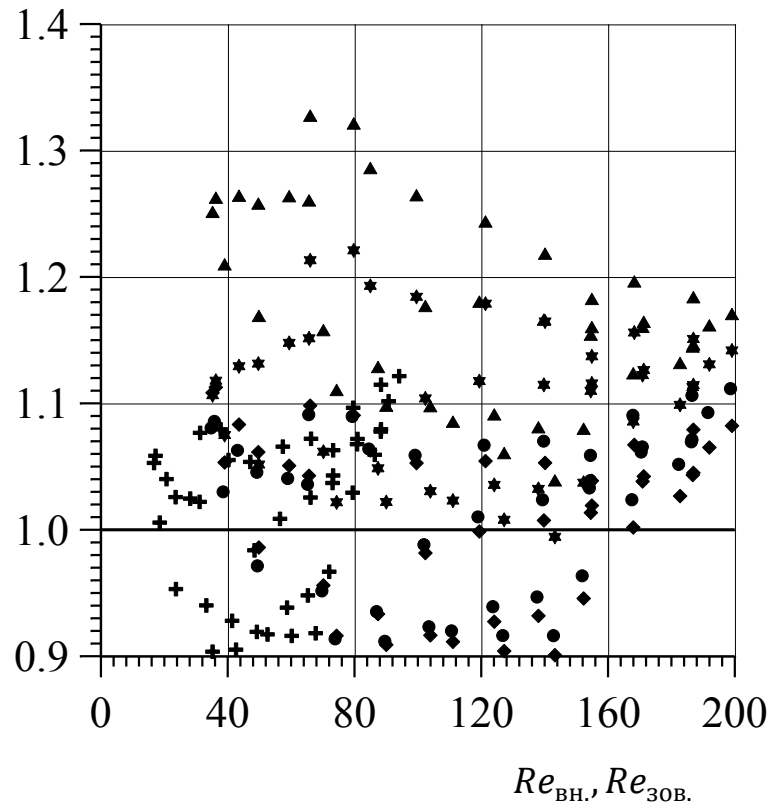


Рис. 3.7. Кореляційна залежність між експериментальними даними і теоретично розрахованими

$$+ - Eu_{\text{вн}} = 29 \cdot Re_{\text{вн}}^{-0,6} H_e / d_e;$$

Максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 12\%$

$$\blacklozenge - Eu_{\text{зовн}} = 155 \cdot Re_{\text{зовн}}^{-0,55} H / d_q;$$

Максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 10\%$

$$\bullet - \Omega = \frac{\Delta P}{H} \frac{64 \cdot \rho \cdot \varepsilon^3}{\mu^2 \cdot a^3}$$

Максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 11\%$

$$\blacktriangle - \Delta P = H \cdot \frac{150 \cdot \mu \cdot v_0}{d_q^2} \cdot \frac{(1-\varepsilon)^2}{\varepsilon^2} + \frac{1,75 \cdot \rho \cdot v_0^2}{d_q} \cdot \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3}$$

Максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 32\%$

$$\star - \Delta P = \left(\frac{133}{Re} + 2.34 \right) \cdot \frac{H}{d_e} \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$$

Максимальна відносна похибка не перевищує $\pm 22\%$

З рис. 3.7 видно, що найменші похибки (10 – 12%) між розрахунковими і експериментально отриманими значеннями втрат тиску отримані під час

використання розрахункових залежностей (3.10, 3.11, 3.12). А використання залежностей (3.13) та (1.6) призводить до значних відхилень між експериментальними і розрахованими значеннями. Тому використовувати їх для прогнозування втрат тиску у стаціонарному шарі Ферум (II) сульфат гептагідрату недоцільно.

Гідродинаміка стаціонарного шару залізоокисного пігменту

Результати експериментальних досліджень гідравлічного опору шару жовтого залізоокисного пігменту в залежності від швидкості профільтрування теплового агенту v_0 крізь стаціонарний шар матеріалу наведені на рис. 3.8. Як бачимо, гідравлічний опір зростає із збільшенням висоти шару H матеріалу. Значення перепадів є відносно невеликими, що вказує на доцільність проводити сушіння залізоокисного пігменту фільтраційним методом.

ΔP , Па

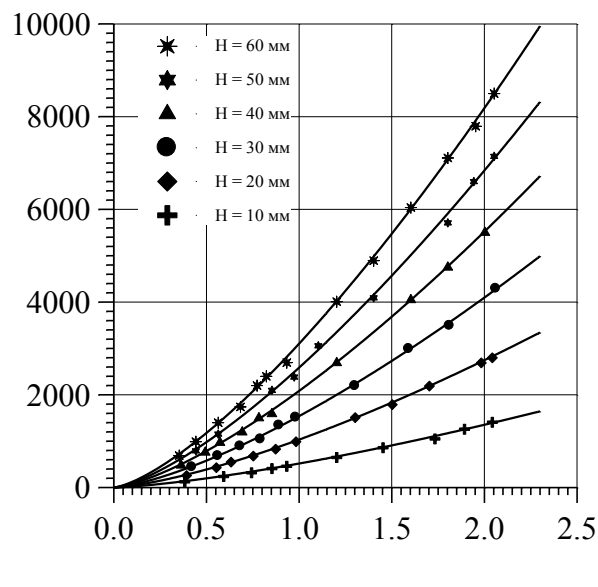


Рис. 3.8. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі залізоокисного пігменту від фіктивної швидкості руху теплового агенту.

Узагальнення отриманих результатів проведені шляхом встановлення залежності числа Ейлера від числа Рейнольдса для відповідних висот шару матеріалу $Eu = f(Re)$. Результати зображені на рис. 3.9.

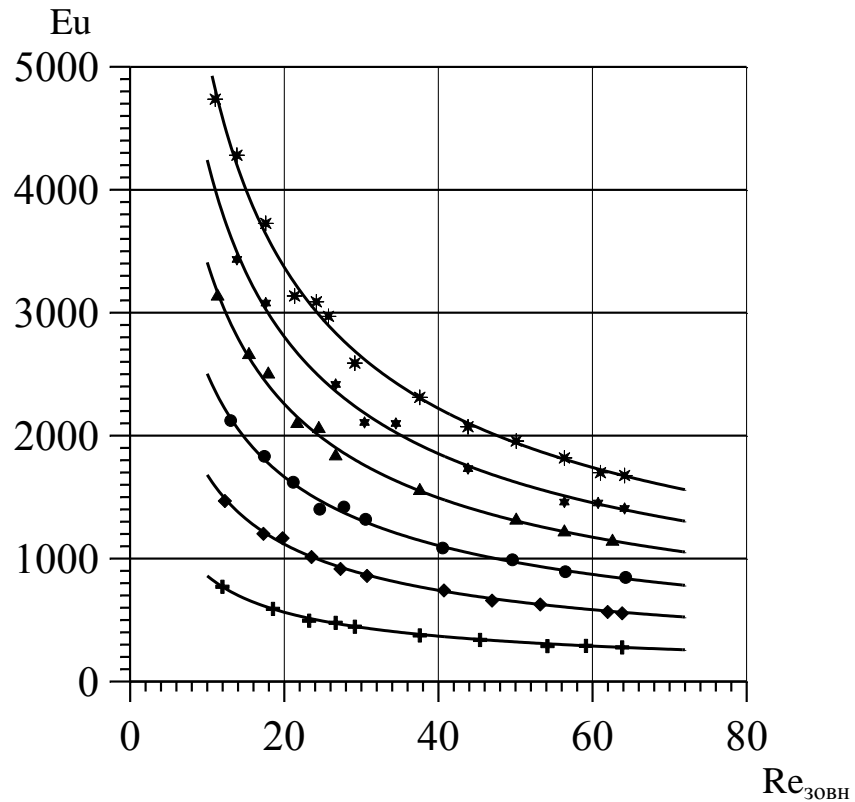


Рис. 3.9. Залежність числа Ейлера Eu від числа Рейнольдса Re для шарів залізоокисного пігменту різної висоти. Позначення ліній відповідає рис. 3.8.

Щоб записати розрахункову залежність $Eu = A \cdot Re^n$ для залізоокисного пігменту, визначені значення коефіцієнта “А” і показника степені n , що наведені в табл. 3.7, з якої бачимо, що значення коефіцієнтів A залежать від висоти шару матеріалу, тому встановлена залежність коефіцієнту A від геометричного симплексу $\Gamma = H/d_{\text{част.}}$, яка представлена на рис. 3.10

Здійснивши апроксимацію степеневою функцією даних, наведених на рис. 3.10, отримана залежність коефіцієнта A у такому вигляді:

$$A = 170 \cdot H/d_{\text{част.}} \quad (3.15)$$

Таблиця 3.7. Значення коефіцієнтів А та n		
$H \cdot 10^3, \text{ м}$	A	n
10	3503	-0,6
20	6541	
30	9719	
40	13422	
50	16798	
60	20387	

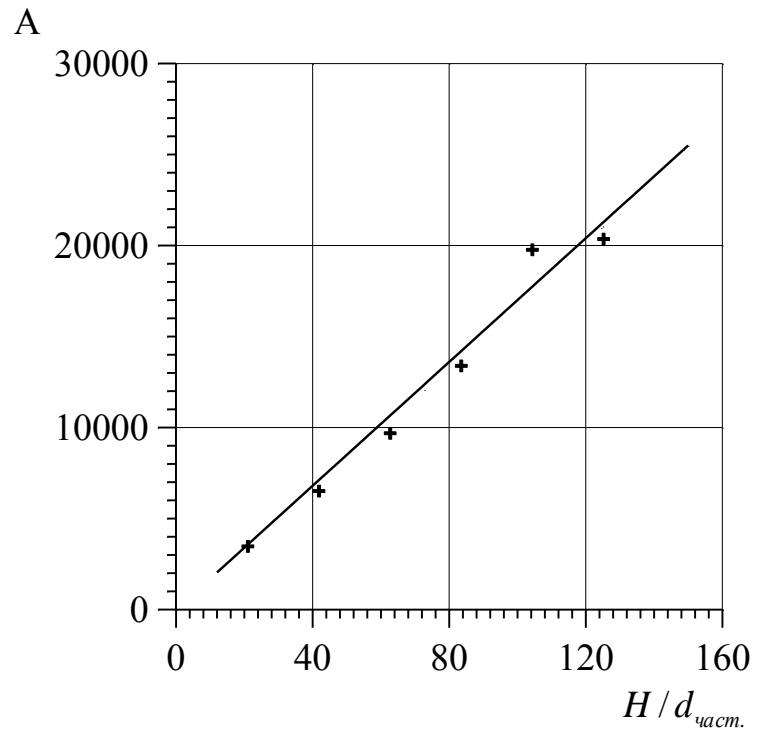


Рисунок 3.10. Залежність коефіцієнта А від геометричного симплексу $H/d_{\text{част.}}$.

Тоді рівняння для визначення числа Ейлера, яке дає змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння для залізоокисного пігменту за подібних гідродинамічних умов в межах зміни числа Рейнольдса $10 \leq Re \leq 75$, можна представити у вигляді:

$$Eu = 170 \cdot Re^{-0,6} \cdot \frac{H}{d_{\text{част}}} \quad (3.16)$$

Встановлення гідравлічного опору шару залізоокисного пігменту також проведений з використанням рівняння Дарсі - Вейсбаха (1.3). Отож, на рис. 3.11 представлені графічні залежності $\lambda = f(Re)$, отримані на основі експериментальних даних - крива 1 та шляхом розрахунку коефіцієнту тертя на основі залежності (1.6) – крива 2. Апроксимувавши експериментальні дані, наведені на рис. 3.8, степеневу функцією, отримана розрахункова залежність:

$$\lambda = \frac{760}{Re} + 15 \quad (3.17)$$

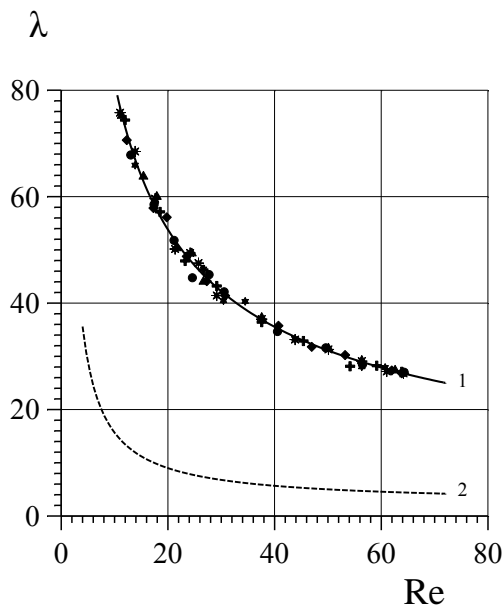


Рис. 3.11. Залежність

коефіцієнту гідравлічного опору шару залізного купоросу від критерію Рейнольдса

$$1 - \lambda = \frac{760}{Re} + 15, \quad (\lambda = 320 \cdot Re^{-0,6}); \quad 2 - \lambda = \frac{133}{Re} + 2,34$$

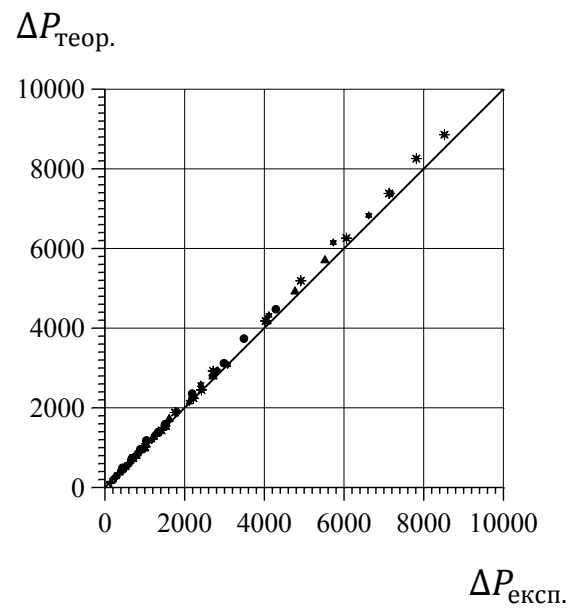


Рис. 3.12. Кореляційна

залежність між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску $\Delta P_{\text{теор.}}$ (згідно з залежністю (3.16)) та експериментальними даними втрат тиску $\Delta P_{\text{експ.}}$ (позначення відповідають значенням рис. 3.8.).

Як бачимо, розбіжність істотна, тож для прогнозування втрат тиску під час руху теплового агенту крізь шар залізоокисного пігменту за допомогою формули (1.6), не рекомендується.

Відповідно до залежності (3.16) розраховані значення перепаду тисків ΔP_T за різних значень числа Рейнольдса. І на рис. 3.12 представлена кореляційна залежність між співвідношенням $\Delta P_T / \Delta P_E$ (теоретично розрахованих значень втрат тиску та експериментальних даних).

Із рис. 3.12 випливає, що максимальне відхилення між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску $\Delta P_{\text{теор.}}$ та експериментально визначеними становить 10%, що свідчить про адекватність запропонованої моделі для розрахунку гідравлічного опору стаціонарного шару залізоокисного пігменту.

Гідродинаміка стаціонарного шару деревного борошна

Результати експериментальних досліджень втрат тиску ΔP як функції фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту v_0 крізь стаціонарний шар деревного борошна наведені на рис. 3.13, з якого бачимо, що при збільшенні висоти шару матеріалу H зростає його гідравлічний опір, проте значення є відносно невеликим, що є позитивним для організації фільтраційного методу сушіння.

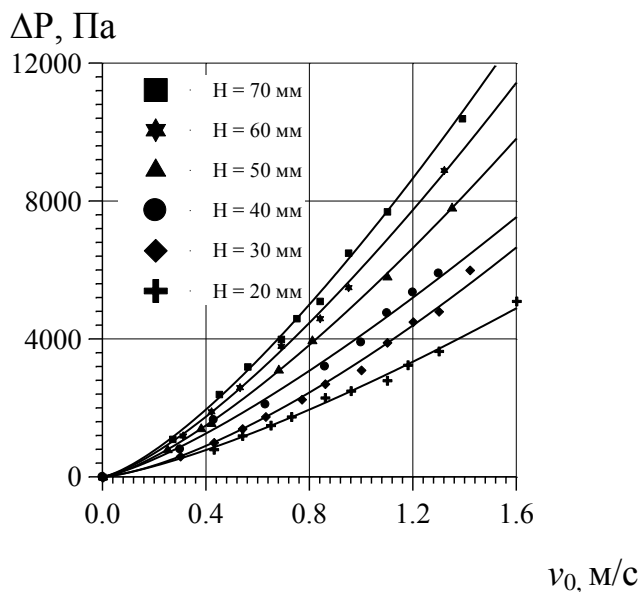


Рис. 3.13. Залежність втрат тиску в стаціонарному шарі деревного борошна від фіктивної швидкості руху шарів деревного теплового агенту.

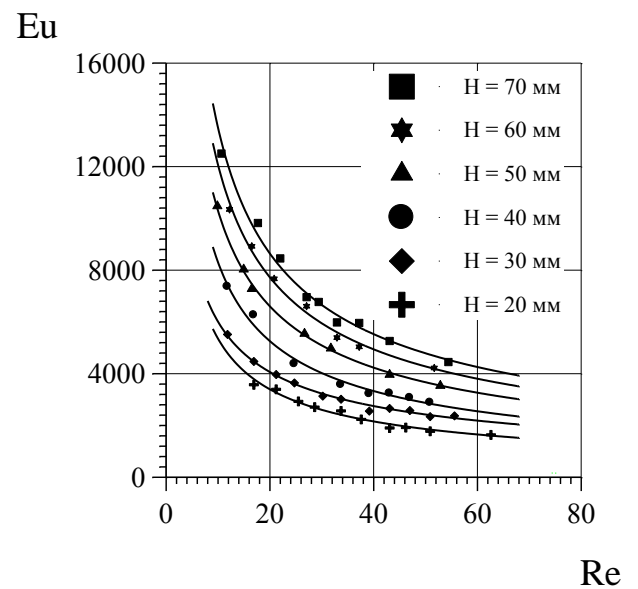


Рис. 3.14. Залежність числа Ейлера Eu від числа Рейнольдса Re для шарів деревного борошна різної висоти

Для узагальнення результатів досліджень гідродинаміки залізоокисного пігменту, за відповідних значень числа Рейнольдса розраховані числа Ейлера і експериментальні дані (рис. 3.13) представлені у вигляді графічної залежності чисел Ейлера від чисел Рейнольдса (рис. 3.14).

Графічна залежність $Eu = f(Re)$ дає змогу прогнозувати втрати тиску за відомих режимів руху теплового агенту крізь стаціонарні шари деревного борошна різної висоти. Як бачимо з графічних залежностей (рис. 3.14),

розміщення кривих $Eu = f(Re)$ свідчить про залежність останніх від висоти шару деревного борошна. Апроксимувавши експериментальні дані степеневою функцією, втрати тиску в стаціонарному шарі деревного борошна представлені у вигляді розрахункової залежності $Eu = A \cdot Re^n$, де значення коефіцієнта “А” і показника степені n (див. таб. 3.8) для деревного борошна знайдені шляхом узагальнення результатів експериментальних досліджень, наведених на рис. 3.13.

Таблиця 3.8

**Значення коефіцієнтів А та n залежності $Eu = A \cdot Re^n$
для деревного борошна**

$H \cdot 10^3, \text{ м}$	А	n
20	2420	-0,65
30	2940	
40	3780	
50	4495	
60	5310	
70	5940	

А

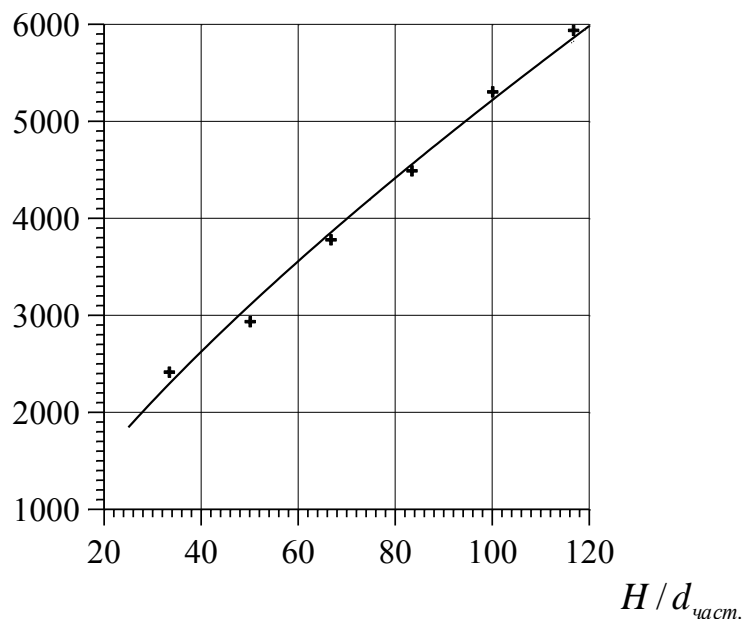


Рисунок 3.15. Залежність коефіцієнта А від геометричного симплексу $H/d_{\text{част.}}$.

Зважаючи на те, що значення коефіцієнтів A змінюються із зміною висоти шару матеріалу, на рис. 3.15 представлена залежність коефіцієнту A від геометричного симплексу $\Gamma = H/d_{\text{част.}}$, який характеризує співвідношення висоти шару до еквівалентного діаметру частинки матеріалу.

Апроксимація степеневою функцією даних, наведених на рис. 3.15, дала змогу представити залежність цього коефіцієнта у такому вигляді:

$$A = 165 \cdot \left(\frac{H}{d_{\text{част.}}}\right)^{0,75} \quad (3.18)$$

Тоді, залежність (1.2) із врахуванням залежності (3.18) та значення показника степеня n (Таблиця 3.8), можна представити у вигляді:

$$Eu = 165 \cdot Re^{-0,65} \cdot \left(\frac{H}{d_{\text{част.}}}\right)^{0,75} \quad (3.19)$$

Залежність (3.19) дає змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння деревного борошна та її зручно використовувати на стадії проектування сушильного обладнання за подібних гідродинамічних умов в межах зміни числа Рейнольдса $8 \leq Re \leq 70$.

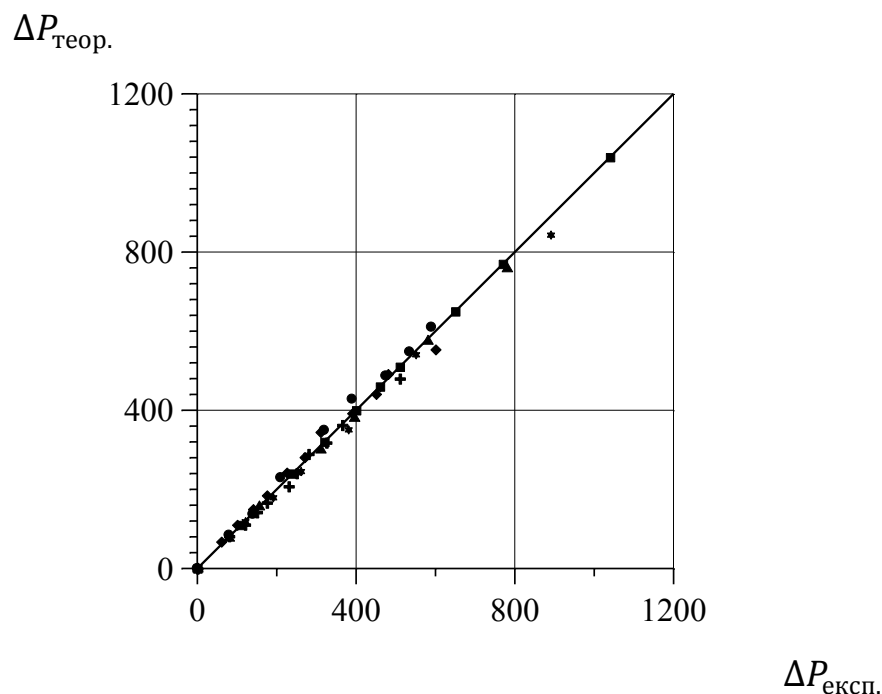


Рис. 3.16. Кореляційна залежність між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску $\Delta P_{\text{теор.}}$ та експериментальними даними втрат тиску $\Delta P_{\text{експ.}}$ (позначення відповідають значенням рис. 3.13.).

Згідно із залежністю (3.19) розраховані значення перепаду тисків ΔP_T за різних значень числа Рейнольдса. Кореляційна залежність між співвідношенням $\Delta P_T / \Delta P_E$ (теоретично розрахованих значень втрат тиску та експериментальних даних), представлена на рис. 3.16., з якого видно, що абсолютне значення відносної похибки не перевищує 9,8%, що є цілком прийнятним для практичних розрахунків щодо прогнозування втрат тиску в стаціонарному шарі відпрацьованого деревного борошна.

Для визначення коефіцієнту опору λ стаціонарного шару деревного борошна, який є необхідним для визначення втрат тиску в шарі матеріалу згідно із залежністю Дарсі-Вейсбаха (1.3), експериментальні дані, наведені на рис. 3.13, представлені у вигляді функціональної залежності $\lambda = f(\text{Re})$ (рис. 3.17). Апроксимація результатів степеневою функцією дала змогу представити коефіцієнт опору у вигляді залежності:

$$\lambda = \frac{210}{\text{Re}} + 5,2 \quad (3.20)$$

Залежність (3.20) дає змогу прогнозувати енергетичні затрати на процес фільтраційного сушіння відпрацьованого деревного борошна, використовуючи залежність Дарсі-Вейсбаха в межах режимів фільтрування теплового агенту ($8 \leq \text{Re}_e \leq 70$) з достатньою для проектних розрахунків точністю.

Отримана залежність для визначення коефіцієнту опору в шарі деревного борошна (3.20) є відмінною від загальновідомої залежності (1.6), яка широко використовується на практиці для визначення коефіцієнту опору під час руху теплового агенту крізь шари монодисперсних матеріалів, які складаються з частинок кулястої форми. На рис. 3.17 представлені графічні залежності, якими описуються значення коефіцієнтів опорів, отриманих з експериментальних даних, а також розрахованими згідно із залежністю (3.20) (крива 1) та залежністю (1.6) (крива 2).

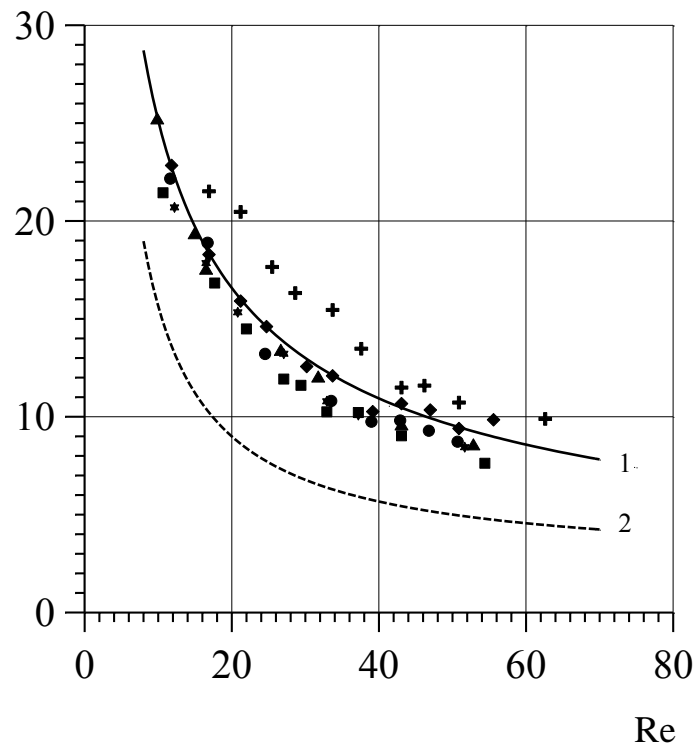
λ 

Рис. 3.17. Залежність коефіцієнту опору λ стаціонарного шару деревного борошна від числа Рейнольдса Re (позначення відповідають рис. 3.13.).

$$1 - \lambda = 100 \cdot Re^{-0,6} \text{ або } \left(\lambda = 210/Re + 5,2 \right);$$

$$2 - \lambda = 133/Re + 2,34$$

З рис. 3.17 добре видно розбіжність між кривою 2 та кривою 1 та значеннями коефіцієнтів опорів, отриманих з експериментальних даних, що підтверджує недоцільність застосування загальноприйнятої залежності (1.6) для розрахунку коефіцієнту опору шару деревного борошна.

Для порівняння теоретично розрахованих значень втрат тисків $\Delta P_{\text{теор.}}$ згідно із залежністю (3.20) з експериментальними значеннями $\Delta P_{\text{експ.}}$ (рис. 3.13), побудована кореляційна залежність, яка представлена на рис. 3.18.

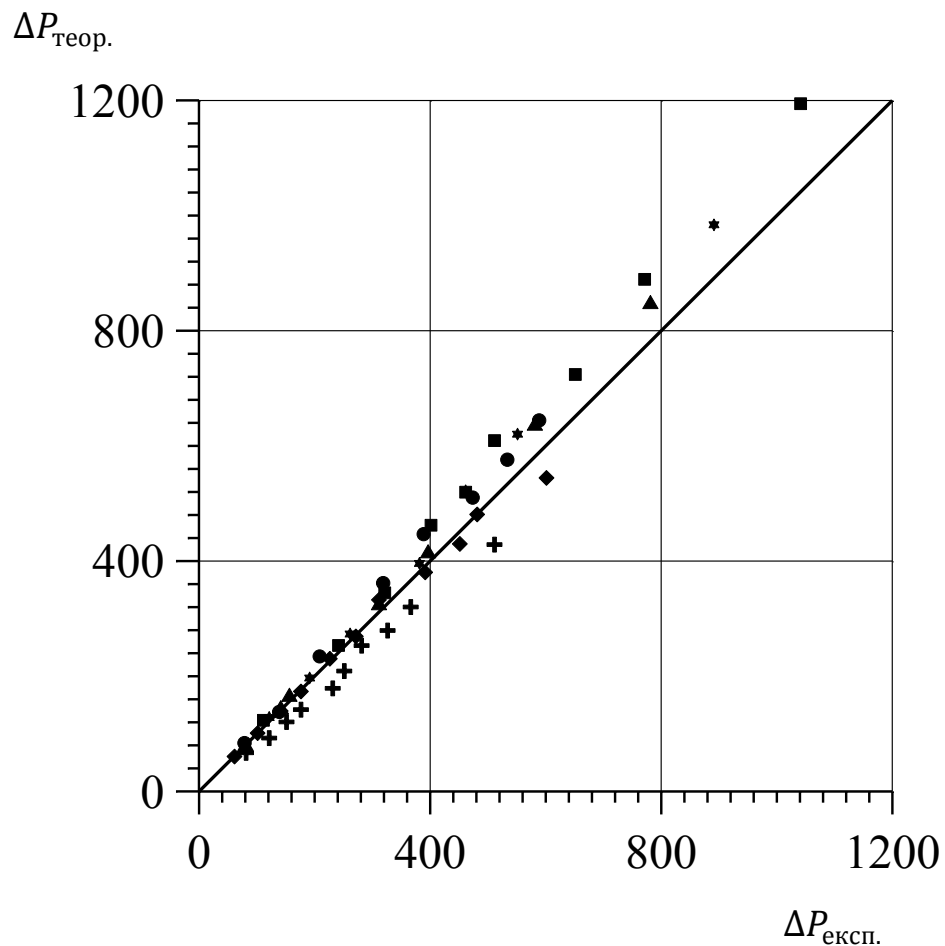


Рис. 3.18. Кореляційна залежність між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску $\Delta P_{\text{теор.}}$ (згідно із залежністю (3.20)) та експериментальними даними $\Delta P_{\text{експ.}}$ (позначення відповідають значенням рис. 3.13.).

Аналіз рис. 3.18 показує добре співпадіння між експериментальними і теоретичними значеннями втрат тиску. Максимальне значення відносної похибки між теоретично розрахованими значеннями втрат тиску $\Delta P_{\text{теор.}}$ (з використанням залежності (3.20)) та експериментальними даними втрат тиску $\Delta P_{\text{експ.}}$ не перевищує 14,2%, що дає змогу зробити висновок про можливість використання отриманої залежності (3.20).

Висновки до третього розділу

1. Визначені основні фізико-механічні характеристики шарів досліджуваних матеріалів, а саме: насипну густину, пористість шару, питому поверхню, еквівалентний діаметр каналів, крізь які фільтрується тепловий агент (табл. 3.3, 3.4, 3.5).

2. Встановлено, що гідравлічний опір рухові теплового агенту для шару Fe (II) сульфат гептагідрату 7 кПа (за фіктивної швидкості фільтрування теплового агенту 1,6 м/с і висоти шару $60 \cdot 10^{-3}$ м), для шару залізоокисного пігменту не перевищує 6 кПа і для відпрацьованого деревного борошна 12,1 кПа, що вказує на доцільність застосування фільтраційного сушіння як енергозберігаючого методу.

3. На основі узагальнення експериментальних даних отримані розрахункові залежності, що дають змогу прогнозувати втрати тиску під час фільтраційного сушіння досліджуваних матеріалів, які рекомендується використовувати на стадії проектування сушильного обладнання за подібних гідродинамічних умов, коли значення числа Рейнольдса не перевищує 250 для залізного купоросу (3.9)-(3.13) та 80 для залізоокисного пігменту (3.16), (3.17) та відпрацьованого деревного борошна (3.19), (3.20).

Основні результати опубліковані в працях [76, 77, 97,98,152].

РОЗДІЛ 4

КІНЕТИКА ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ ДИСПЕРСНИХ МАТЕРІАЛІВ

4.1. Дослідження зразків Ферум (II) сульфат гептагідрату методом термічного аналізу

Дослідження процесу сушіння передбачає встановлення характеру поведінки матеріалів під впливом температури [147]. Особливий науковий інтерес в даній роботі представляє Ферум(II) сульфат гептагідрат, який містить кристалічно зв'язану вологу, а станом на сьогодні дані щодо термічного аналізу зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату в середовищі повітря є практично відсутніми. Крім того, досліджуваний залізний купорос є побічним продуктом виробництва, тож літературні дані щодо чистого Ферум(II) сульфат гептагідрату можуть дещо відрізнятися. Тому важливим етапом досліджень є проведення термічного аналізу, оскільки ці дані дають змогу охарактеризувати постадійний процес дегідратації зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату за певних температурних режимів їх нагрівання та вибрати температурні режими для реалізації постадійного процесу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату фільтраційним методом, який супроводжуватиметься відщепленням певної кількості молекул води. В свою чергу, це дасть змогу залучити отримані в результаті дегідратації сполуки у виробничий процес отримання залізоокисних пігментів.

Шляхом термічного аналізу (ТА) можна дослідити зміну властивостей матеріалів як функцію температури. В нашому випадку ТА дав змогу охарактеризувати постадійний процес дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату за певних температурних режимів їх нагрівання та вибрати температурні режими для реалізації постадійного процесу дегідратації

Ферум(II) сульфат гептагідрату до утворення Ферум(II) сульфат тетрагідрату фільтраційним методом.

Дослідження зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату проводились на дериватографі Q – 1500 D системи «Паулік – Ердей» з реєстрацією аналітичного сигналу втрати маси та теплових ефектів за допомогою комп'ютера. Зразки аналізувалися в динамічному режимі з швидкістю нагрівання 0,6, 1,25, 2,5 та 5 °C/хв в середовищі повітря. Для досліджень брали наважки масою 200 мг. Еталонною речовиною був алюміній оксид Al₂O₃. Методика проведення експериментів наведена в другому розділі. Термограми зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату, отримані за швидкостей нагрівання $\omega=0,6, 1,25, 2,5$ та 5 °C/хв, представлені на рис.4.1 – 4.4.

Криві термогравіметричного аналізу TG відображають втрату маси зразка під час нагрівання [148]. Криві диференційного термогравіметричного аналізу DTG (диференційні криві) - швидкість втрати маси зразка. Криві диференційного термогравіметричного аналізу DTG є результатом диференціювання кривих TG, відповідно до швидкості втрати маси зразка за відповідної температури. Криві диференційного термічного аналізу DTA – величину теплового ефекту.

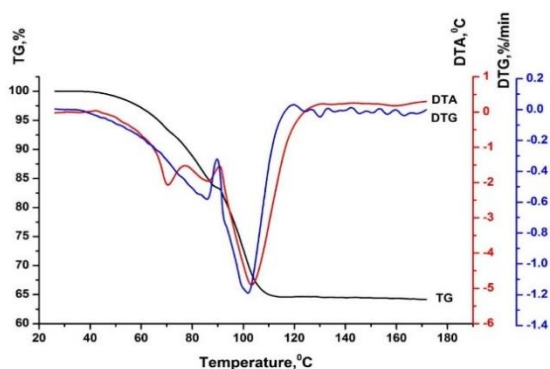


Рис. 4.1. Термограма зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 0,6 °C/хв.

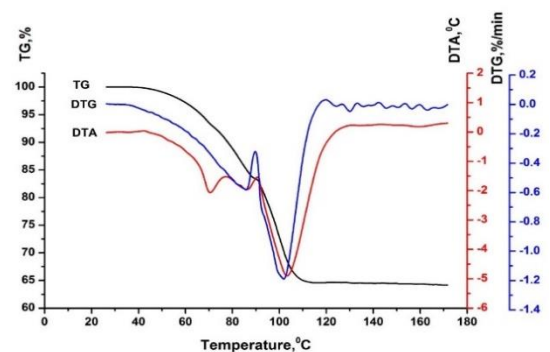


Рис. 4.2. Термограма зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 1,25 °C/хв.

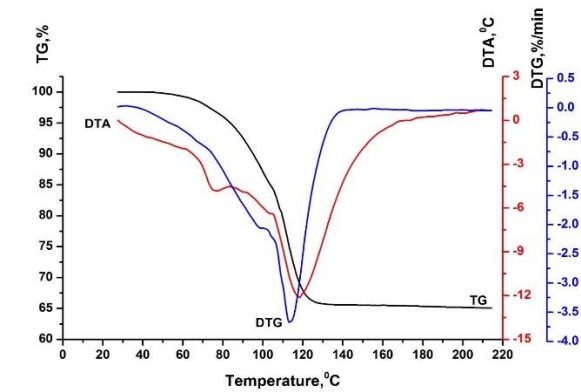


Рис. 4.3. Термограма зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 2,5 °C/хв.

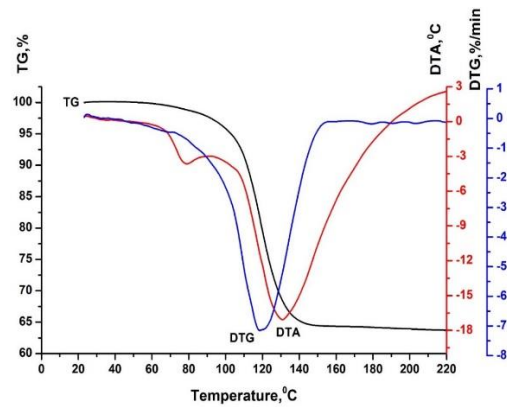


Рис. 4.4 Термограма зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату, отримана за швидкості нагрівання 5 °C/хв.

З представлених термограм (рис. 4.1-4.4) видно, що процес дегідратації зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату протікає впродовж двох стадій. На основі аналізу термограм, отримані дані, що характеризують проходження першої та другої стадій дегідратації зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей його нагрівання, які представлені у таблиці 4.1 та таблиці 4.2, відповідно.

Таблиця 4.1

Дані термічного аналізу для першої стадії дегідратації зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату

Швидкість нагрівання зразка, °C/хв	Температурний інтервал першої стадії, °C/хв	Втрата маси, %	Температура максимальної швидкості втрати маси, °C	Температура максимуму ендотермічного ефекту, °C
0,6	20-90	16,7	86	86
1,25	20-98	16,4	95	не виражений
2,5	20-105	16,6	102	не виражений

На першій стадії, яка за різних швидкостей нагрівання протікає в температурному інтервалі 20 – 105 °C, відбувається втрата трьох молекул кристалічної води. Цей процес супроводжується появою чітких екстремумів на кривих DTG та характерним зломом ендотермічного ефекту кривої DTA. Поява

неглибокого ендоефекту з максимумом за температур 70 – 73⁰С (за різних швидкостей нагрівання) відповідає процесу плавлення кристалогідрату. Друга стадія дегідратації з відщепленням трьох молекул води протікає в температурному інтервалі 90 – 139⁰С (в залежності від швидкості нагрівання). Вона супроводжується стрімким ендотермічним ефектом з вираженим максимумом та появою стрімкого екстремуму на кривій DTG. Варто зазначити, що зростання швидкості нагрівання впливає на характер протікання процесу дегідратації. Із зростанням швидкості нагрівання температурні інтервали втрати кристалічної води на першій та другій стадіях дегідратації зміщуються в область вищих температур (табл. 4.1 та табл. 4.2).

Таблиця 4.2

**Дані термічного аналізу для другої стадії дегідратації зразка
Ферум(II) сульфат гептагідрату**

Швидкість нагрівання зразка, ⁰ С/хв	Температурний інтервал першої стадії, ⁰ С/хв	Втрата маси, %	Температура максимальної швидкості втрати маси, ⁰ С	Температура максимуму ендотермічного ефекту, ⁰ С
0,6	90-119	18,7	102	103
1,25	98-128	19,8	108	112
2,5	105-139	19,2	113	119

Втрата перших трьох молекул кристалізаційної води на першій стадії дегідратації за швидкості нагрівання 0,6⁰С/хв завершується за температури 90⁰С, за швидкості нагрівання 1,25⁰С/хв та 2,5⁰С/хв стадія завершується за температури 98⁰С та 105⁰С, відповідно. Втрата наступних трьох молекул кристалізаційної води на другій стадії дегідратації за швидкості нагрівання 0,6⁰С/хв завершується за температури 119⁰С, за швидкості нагрівання 1,25⁰С/хв та 2,5⁰С/хв стадія завершується за температури 128⁰С та 139⁰С, відповідно.

За швидкості $5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ про поетадійність проходження процесу дегідратації зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату судити важко, оскільки дві стадії об'єднуються в одну (рис. 4.1-4.4), якій відповідає втрата маси 35,6% в температурному інтервалі $20\text{-}156^{\circ}\text{C}$. Максимальній швидкості втрати маси відповідає температура 119°C .

На рис. 4.5 представлені порівняння результатів термогравіметричного аналізу Ферум (II) сульфату гептагідрату у вигляді кривих TG, отриманих за різних швидкостей нагрівання зразка. Усі криві TG зображають різке зменшення маси зразка під час нагрівання.

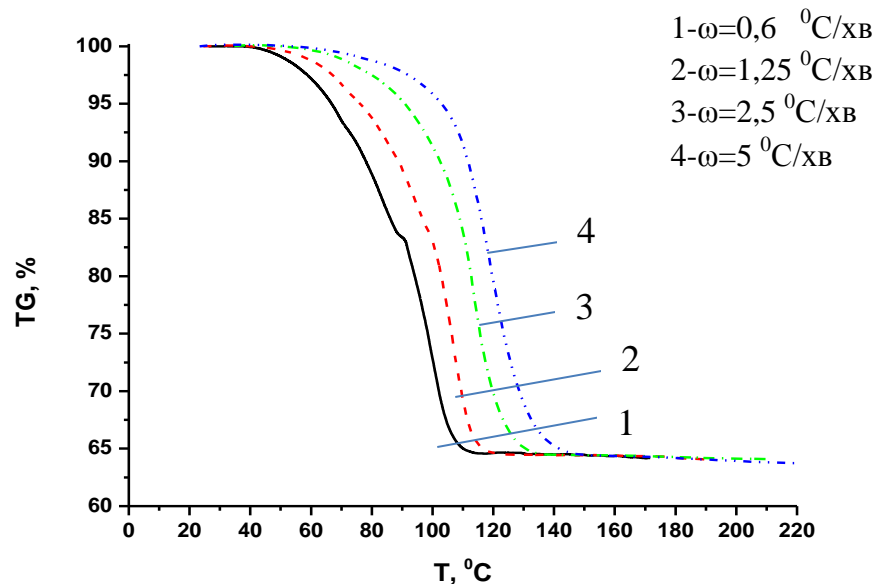


Рис. 4.5. Порівняння кривих TG зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату, отриманих за різних швидкостей нагрівання.

Із зростанням швидкості нагрівання змінюється характер втрати маси зразків. Це приводить до зміщення екстремумів кривої DTG в область вищих температур (рис. 4.6). Так, за швидкості $0,6^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ максимальній швидкості втрати маси відповідає температура 86°C . За швидкості $1,25^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ та $2,5^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ максимальній швидкості процесу відповідає 95°C та 102°C , відповідно.

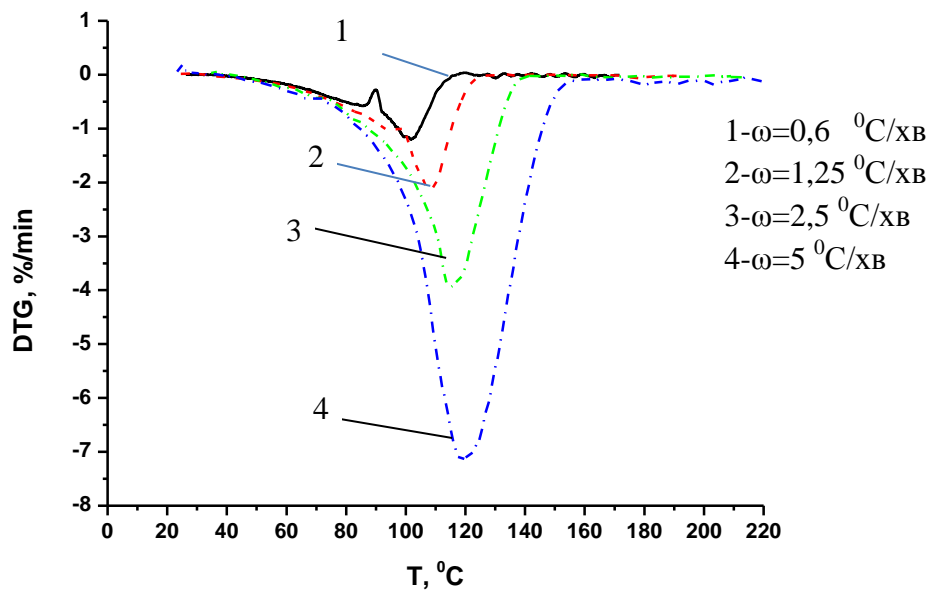


Рис. 4.6. Порівняння кривих DTG зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей нагрівання.

Швидкість нагрівання також впливає на вигляд кривої ДТА (рис. 4.7). За швидкості $0,6$ °C/хв максимум ендотермічного ефекту є чітко виражений, із зростанням швидкості він втрачається, а на кривій ДТА з'являється злам.

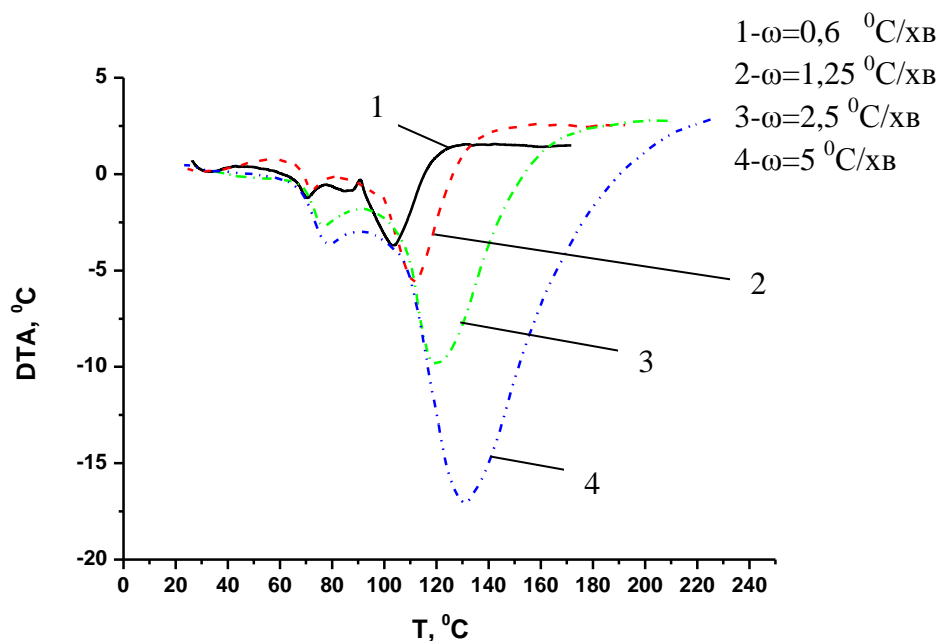


Рис. 4.7. Порівняння кривих ДТА зразків Ферум(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей нагрівання

Зміщення екстремумів на кривих DTG та DTA із зростанням швидкості нагрівання в областях вищих температур особливо чітко видно для другої стадії дегідратації (рис. 4.6 та рис. 4.7) та із значень, представлених у таблиці 4.2.

За даними диференційного термічного аналізу (DTA), які відповідають швидкості нагрівання зразка $2,5 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{хв}$ (за середньої швидкості), в температурному інтервалі $40 - 160^{\circ}\text{C}$ розрахований тепловий ефект процесів плавлення та дегідратації кристалогідрату, який супроводжується відщепленням шести молекул води. В таблиці 4.3 містяться результати кількісної обробки кривої DTA зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату.

Таблиця 4.3

Результати кількісної обробки кривої DTA зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату, отриманої за швидкості нагрівання $2,5 \text{ C}/\text{хв}$

Зразок	m, г	S, К·с	ΔH , Дж/г	ΔH , кДж/моль
$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0,2012	6991	1227	341

Тепловий ефект процесу плавлення та дегідратації зразка розрахований за рівнянням [71]:

$$\Delta H = K \cdot S / m, \quad (4.1)$$

де m – маса зразка, г; S – площа піка, обмежена кривою DTA, К·с;

K – коефіцієнт теплообміну дериватографа (калібрувальний коефіцієнт), який визначає відповідність між тепловим ефектом процесу та площею піку DTA-кривої, Дж/К·с.

Площу піка кривої DTA розрахована за рівнянням:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} \Delta T \cdot dt, \quad (4.2)$$

де t – час, с;

ΔT – різниця температур між еталоном та зразком в певний момент часу, виміряна за довжиною ординати кривої DTA з похибкою ± 0.01 К.

Метод DTA належить до так званих відносних методів дослідження, що вимагають попереднього калібрування приладу та визначення коефіцієнта теплообміну дериватографа K . Прилад калібрували за допомогою очищених зразків еталонного матеріалу. Температурну залежність коефіцієнта теплообміну дериватографа K (калібрувального коефіцієнту) знаходили в попередніх дослідженнях за теплотами плавлення чистих речовин - біфенілу, гександіової кислоти та срібла нітрату [72]:

$$K = 0,094 - 3,5 \cdot 10^{-4} \cdot T + 5,1 \cdot 10^{-7} \cdot T^2 \quad (4.3)$$

Дослідження із чистими речовинами проводили за тих самих умов, що із зразком Ферум(II) сульфат гептагідрату. В таблиці 4.1 наведене значення теплового ефекту зразка, віднесене до температури $(117+273) = 390$ К, якій відповідає коефіцієнт теплообміну $K = 0,0351$ Дж/(К·с), розраховане згідно із залежністю (4.1).

Проведене порівняння отриманих даних з результатами, представленими у роботі [148], отриманими шляхом використання методу диференціальної скануючої калориметрії (DSC). У роботі [149] значення теплового ефекту (експериментальне значення ентальпії) процесу зневоднення зразка Ферум(II) гептагідрату було розраховане для кожної стадії за піком температури на кривій нагрівання DSC за швидкості нагрівання 10 °C/хв. Загальна ентальпія процесу зневоднення від $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ до FeSO_4 для експерименту із закритою посудиною DSC становила $366,8$ кДж/моль. Ентальпії становлять $102,6$, $205,5$ та $58,7$ кДж/моль відповідно.

Отримані результати узгоджуються з представленими у роботі [149]. Дещо завищене значення теплового ефекту втрати шести молекул кристалічної води, отримане на основі досліджень методом DTA у порівнянні з результатом, представленим у роботі [147] методом DSC зумовлене тим, що зразки, які використовувались для дослідження, були взяті з різних виробничих циклів і,

відповідно, відрізнялися між собою за вмістом адсорбційної та кристалізаційної води, а також, у методиці розрахунку враховувалась вся площа піку кривої ДТА разом з тепловим ефектом плавлення кристалогідрату $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ та втратою адсорбційної води в незначній кількості (близько 2%), присутній у зразку.

4.2. Теплообмін між тепловим агентом та стаціонарним шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату

Проведені експериментальні дослідження процесів теплообміну між тепловим агентом та стаціонарним шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату з метою визначення коефіцієнтів тепловіддачі на експериментальній установці, зображеній на рис. 2.1 згідно з представленими у другому розділі методиками. Експерименти проводилися в «короткому шарі» матеріалу висотою $H=10 \cdot 10^{-3}\text{ м}$ для забезпечення рівномірного розподілення теплового агента по всій поверхні та висоті шару і, як наслідок, - температура по висоті шару змінювалась незначно. Температура над шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату підтримувалась в межах $335 \pm 0,5 \text{ К}$. Дослідження проводились за фіктивних швидкостей руху теплового агента 1,16; 2,55; 3,29 та 4,14 м/с, які обрано з огляду на швидкоплинність нагрівання кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату.

За результатами трьох експериментів визначені усереднені значення температури теплового агента на виході із шару Ферум(II) сульфат гептагідрату, які реєструвалися за допомогою восьмиканального вимірювача температури РТ8-1000 з виводом інформації на персональний комп'ютер у файл даних. Результати представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.8.

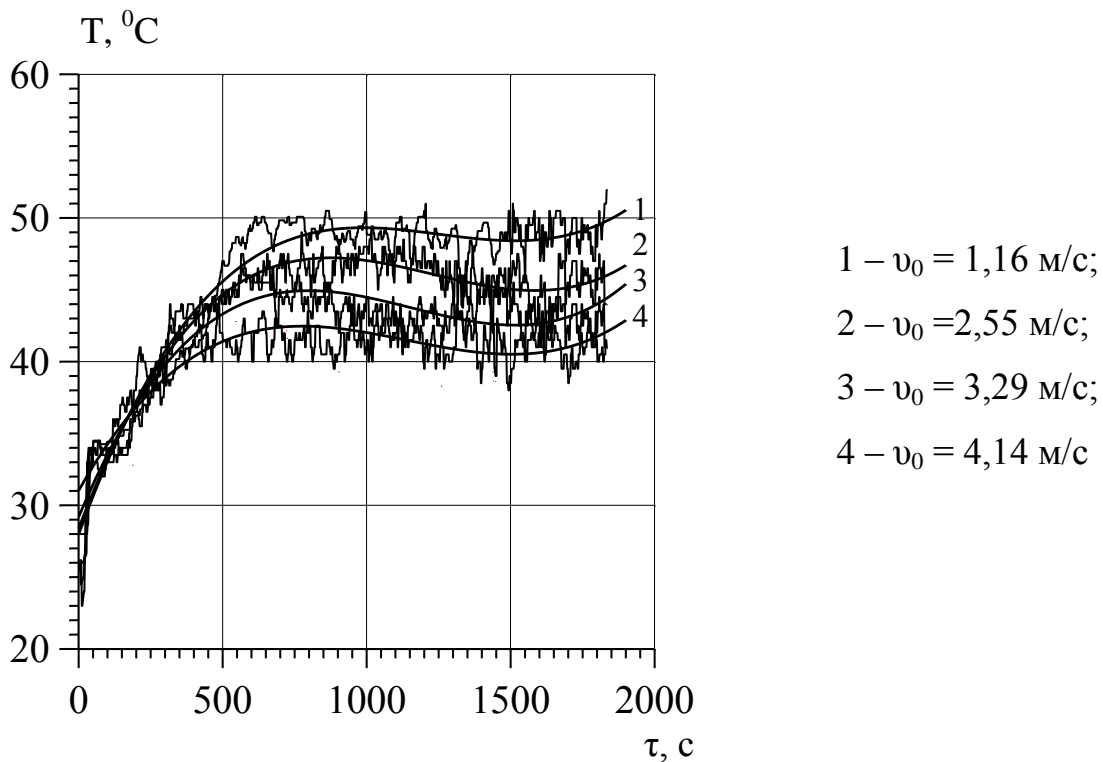


Рис. 4.8. Зміна температури T теплового агенту в часі τ на виході з шару Ферум(II) сульфат гептагідрату висотою $H=10$ мм за різних швидкостей.

Як видно з рис. 4.8, збільшення швидкості теплового агенту приводить до інтенсифікації процесу теплообміну, оскільки в шар матеріалу вноситься більша кількість теплоти за певний проміжок часу і дегідратація Ферум(II) сульфат гептагідрату відбувається за відповідних температур (за швидкості $v_0 = 4,14$ м/с дегідратація починається за температури $42,4^\circ\text{C}$ ($\tau=725\text{c} - 1500\text{ c}$), $v_0 = 3,29$ м/с ($\tau=770\text{c} - 1520\text{ c}$) – 45°C , $v_0 = 2,55$ м/с – $47,1^\circ\text{C}$ ($\tau=790\text{ c} - 1590\text{ c}$) та $v_0 = 1,16$ м/с – $49,2^\circ\text{C}$ ($\tau=1020\text{ c} - 1620\text{ c}$) і знову зростання температури під шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату і відповідно його нагрівання.

Як видно з рис. 4.8, криві, отримані за різних швидкостей профільтрування теплового агенту, можна умовно розділити на дві ділянки. Перша ділянка відображає поступове зростання температури теплового агенту на виході з шару, який прогрівається в ході процесу теплообміну. Чим більше прогрівається шар, тим менше тепла залишається у ньому і, відповідно, температура теплового агенту на виході з шару зростає. Друга ділянка (горизонтальна) характеризує «відносну постійність» температури теплового

агенту на виході з шару матеріалу, після його прогрівання. На ділянці помітними є «впадини», які характеризують зменшення температури теплового агента на виході з шару, що є наслідком процесу дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату, який відбувається з поглинанням теплоти теплового агента та теплоти шару. Після припинення процесу дегідратації, матеріал знову прогрівається і температура теплового агента на виході з шару набуває попередніх значень.

Дані щодо зміни температури теплового агента на виході із шару Ферум(II) сульфат гептагідрату (рис. 4.8) дали змогу розрахувати значення коефіцієнтів тепловіддачі α від теплового агента до кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату згідно із залежністю [20]:

$$\alpha = \frac{\Delta Q}{F \cdot (\bar{t} - \bar{T}_n) \cdot \Delta \tau}, \quad (4.4)$$

де ΔQ – кількість теплоти, затраченої на нагрівання шару, Дж;

F – поверхня всіх кристалів шару, що виступає поверхнею теплообміну, м²;

$\Delta \tau$ – час проведення теплообмінного процесу (дані з рис.4.8), с;

\bar{t} – середньоарифметичне значення температури теплового агента, розраховане з врахуванням значень на вході в шар та на виході (згідно із замірами, наведеними на рис. 4.1), К;

\bar{T}_n – середнє значення температури поверхні кристалів, К.

Кількість теплоти, що затрачається на нагрівання шару Ферум(II) сульфат гептагідрату ΔQ , визначена за рівнянням теплового балансу:

$$\Delta Q = m \cdot c_s \cdot (\bar{T} - T_0), \quad (4.5)$$

де m – маса шару, кг;

c_s – теплоємність Ферум(II) сульфат гептагідрату, Дж/кг·К;

\bar{T} – середня температура поверхні частинок всередині шару, К;

T_0 – початкова температура частинок, К.

Середнє значення температури поверхні частинок \bar{T}_n є більшим від середнього значення температури \bar{T} в шарі. Беручи до уваги те, що тепловий агент фільтрується крізь шар Ферум(II) сульфат гептагідрату і порізність шару є високою, прийняті такі допущення:

- частинки омиваються тепловим агентом з усіх сторін рівномірно;
- температура теплового агента є однаковою з усіх сторін частинок,
- розподіл температурного поля по об'єму частинки має параболічний характер.

Із врахуванням допущень, середнє значення температури поверхні частинок \bar{T}_n визначені згідно із залежністю:

$$\bar{T}_n = t - (t - T_0 \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}) \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right) \cdot e^{-\mu_n^2 \cdot Fo}, \quad (4.6)$$

де t – температура теплового агента, К;

R, r – еквівалентний радіус кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату і біжучий еквівалентний радіус відповідно ($0 < r \leq R$), м;

μ_n – корінь характеристичного рівняння;

Fo – число Фур'є.

За встановленого режиму теплообміну ($Fo > 3$) можна обмежитись застосуванням першого кореня характеристичного рівняння μ_1 залежності (4.6). Отже, з врахуванням значень, наведених на рис. 4.8 та залежностей (4.5) та (4.6), розраховані значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ за різних швидкостей руху теплового агента згідно із залежністю (4.8). Значення представлені у вигляді графічної залежності $\alpha_{експ.} = f(v)$ на рис. 4.9.

Необхідно зазначити, що тепловий агент, в ході процесу теплообміну, рухається крізь шар по криволінійних каналах, утворених проміжками між частинками, які мають змінний переріз, що спричиняє зміну швидкості

теплового агенту і як наслідок – зміну коефіцієнта тепловіддачі. Беручи до уваги складність гідродинамічної картини руху теплового агенту крізь шар, сформований з частинок Ферум(II) сульфат гептагідрату, значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ є усередненими по шару.

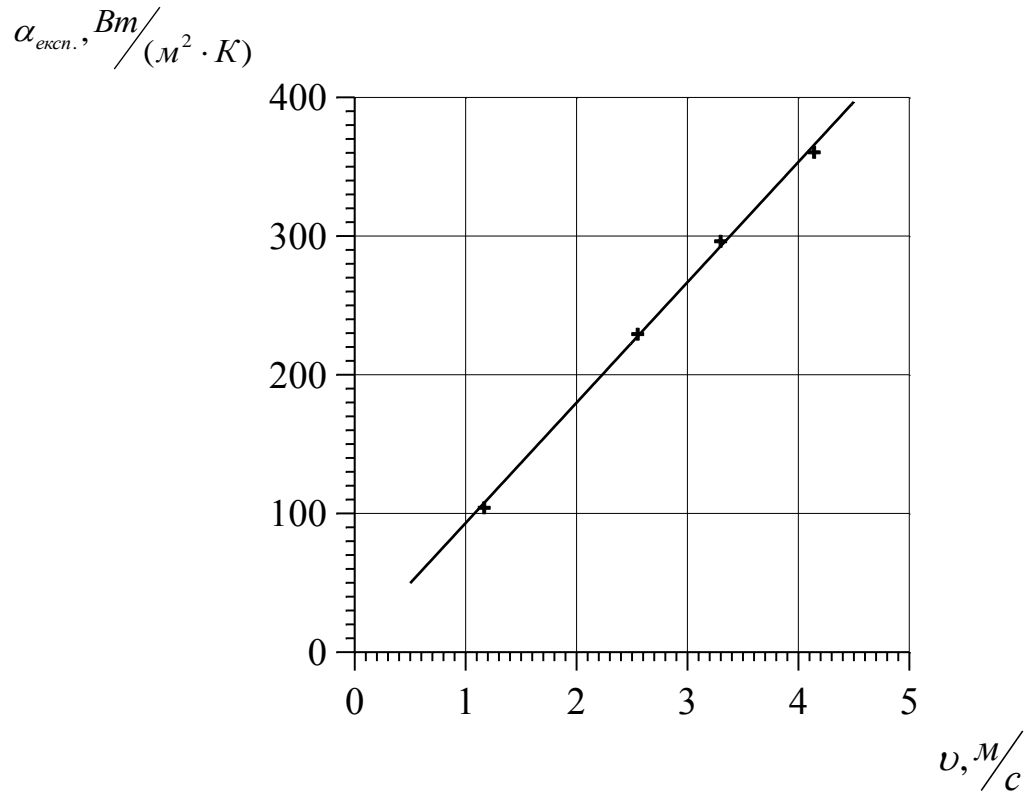


Рис. 4.9. Залежність коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ від дійсної швидкості руху теплового агенту v .

Як бачимо з графічної залежності (рис. 4.9), значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ лінійно зростають із збільшенням дійсної швидкості руху теплового агенту, що пояснюється внесенням у шар більшої кількості теплоти за певний проміжок часу. Отже, збільшуючи швидкість руху теплового агенту в науково обґрунтованих межах можна інтенсифікувати процес теплообміну під час реалізації фільтраційного сушіння кристалів Ферум(II) сульфат гептагідрату, а узагальнення експериментальних результатів дасть змогу отримати залежність для обчислення теоретичних значень коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{теор}$. Отримання такої залежності у безрозмірних комплексах

дасть змогу прогнозувати процес теплообміну між тепловим агентом і кристалами Ферум(II) сульфат гептагідрату, що дасть змогу теоретично визначати коефіцієнти тепловіддачі і, відповідно, кількість теплоти, внесеної в шар з Ферум(II) сульфат гептагідрату в межах досліджуваних швидкостей фільтрування теплового агента і можливість прогнозувати інтенсивність дегідратації Ферум(II) сульфат гептагідрату та економічну ефективність процесу на етапі проектування сушильного обладнання.

Узагальнення експериментальних даних теплообміну між тепловим агентом та стаціонарним шаром Ферум(II) сульфат гептагідрату проведені згідно із залежністю:

$$Nu = A \cdot Re_e^n \cdot Pr^m, \quad (4.7)$$

де $Nu = \frac{\alpha \cdot d_e}{\lambda}$; критерій Нуссельта;

$Re_e = \frac{v \cdot d_e}{\nu}$; критерій Рейнольдса;

$Pr = \frac{\nu}{a}$ – критерій Прандтля;

λ – коефіцієнт теплопровідності теплового агента, $\frac{Вт}{м \cdot К}$;

v – дійсна швидкість фільтрування теплового агента, м/с;

ν – коефіцієнт кінематичної в'язкості теплового агента, $\frac{м^2}{с}$;

a – коефіцієнт температуропровідності теплового агента, $\frac{м^2}{с}$.

Невідомий коефіцієнт «А» та показники степеней «n» та «m» залежності (4.4) визначають експериментальним шляхом.

Беручи до уваги те, що фізичні параметри теплового агента змінювалися у вузькому діапазоні, згідно з рекомендаціями, наведеними в [52] прийнято, що $Nu \sim Pr^{0,33}$, тобто показник степеня $m=0,33$. Для визначення невідомих коефіцієнтів "А" та "n" в залежності (4.7) експериментальні значення представлені в логарифмічній системі координат (рис. 4.10) у вигляді

$Nu / Pr^{0.33} = f(Re_e)$. Апроксимуючи експериментальні дані (рис. 4.10), степеневою функцією, визначене значення коефіцієнта $A=8,8 \cdot 10^{-2}$ та показник степеня $n=0,98$, з врахуванням яких залежність (4.7) представлена у вигляді:

$$Nu_{теор} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot Re_e^{0,98} \cdot Pr^{0,33} \quad (4.8)$$

Залежність (4.8) має межі використання ($20 \leq Re_e \leq 100$).

Для порівняння отриманих даних, беручи до уваги значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{експ}$ (рис. 4.9), розраховані значення критеріїв Нуссельта як $Nu_{експ} = \frac{\alpha_{експ} \cdot d_e}{\lambda}$ та теоретичні значення критерію Нуссельта $Nu_{теор}$. згідно із залежністю (4.8). Кореляційна залежність між значеннями $Nu_{теор}$. та $Nu_{експ}$ представлена на рис. 4.11.

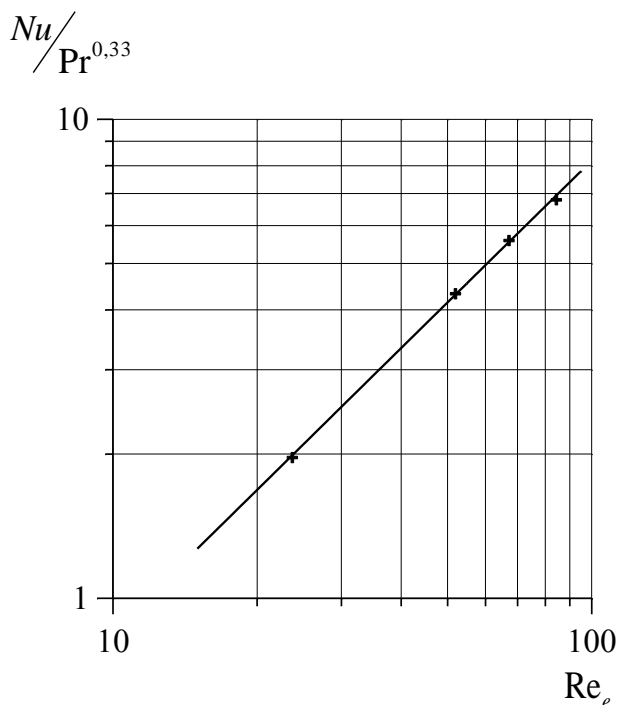


Рис. 4.10. Узагальнення результатів теплообміну: $Nu / Pr^{0.33} = f(Re_e)$.

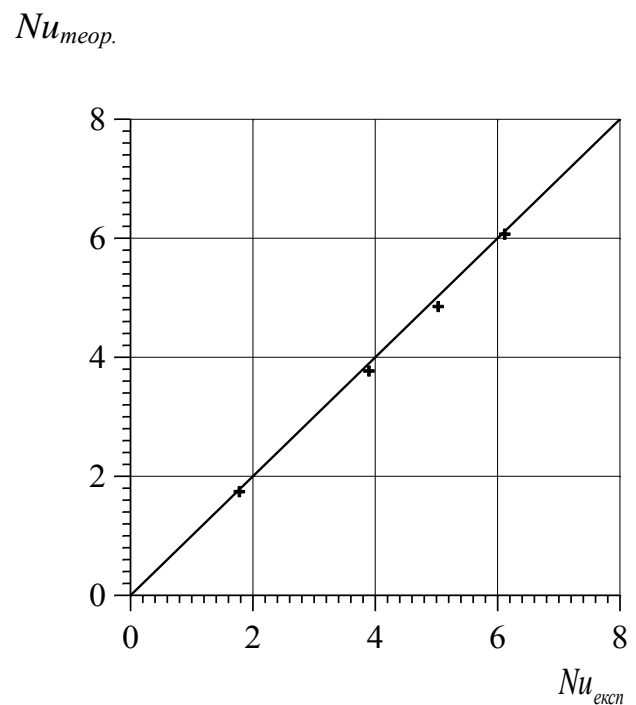


Рис. 4.11. Кореляційна залежність між значеннями $Nu_{теор}$. та $Nu_{експ}$

Максимальна відносна похибка між значеннями між теоретичними та експериментальними значеннями критеріїв Нуссельта не перевищує $\pm 5\%$. Беручи до уваги складність структури стаціонарного шару Ферум(II) сульфат

гептагідрату, значення похибки є цілком задовільною, тому залежність (4.8) можна використовувати для розрахунку значень коефіцієнтів тепловіддачі в межах значень критерію Рейнольдса від 20 до 100.

Оскільки число Нуссельта містить значення коефіцієнту тепловіддачі, залежність (4.8) може бути представлена у вигляді:

$$\alpha_{теор} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{\nu \cdot d_e}{\nu} \right)^{0,98} \cdot \left(\frac{\nu}{a} \right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda}{d_e} \quad (4.9)$$

Залежність (4.9) дає змогу обчислити з достатньою точністю значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{теор}$ під час профільтрування теплового агенту крізь стаціонарний шар Ферум(II) сульфат гептагідрату. Залежність є дійсною в межах числа Рейнольдса $20 \leq Re_e \leq 100$.

4.3. Кінетика та динаміка видалення вологи з дисперсних матеріалів під час фільтраційного сушіння

Ферум(II) сульфат гептагідрат.

Проведені дослідження зміни вологості Феруму(II) сульфат гептагідрату в часі за різних висот вологого матеріалу та різних перепадів тисків по сухому матеріалові і, як наслідок, - за різних швидкостей руху теплового агенту. Дослідження проводилися на експериментальній установці, зображеній на рис. 4.12 згідно з методикою, описаною в другому розділі.

Результати досліджень впливу висоти шару Феруму(II) сульфат гептагідрату у діапазоні зміни від 30 до 120 мм на час сушіння (за однакової температури та швидкості фільтрування теплового агенту) представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.12, з яких видно, що зростання висоти шару приводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється

зростанням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки.

Результати досліджень впливу швидкості фільтрування теплового агенту крізь шар Феруму(II) сульфат гептагідрату на процес фільтраційного сушіння представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.14. Збільшення швидкості фільтрування теплового агенту (за однакової висоти шару і температури теплового агенту) приводить до скорочення тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість внесеної теплоти в пористий шар матеріалу, а також веде до зростання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі, окрім цього збільшення швидкості фільтрування теплового агенту сприяє зменшенню товщини гідравлічного, теплового та дифузійного шарів, що сприяє інтенсифікації процесу тепло- та масоперенесення і дає змогу випарувати більше вологи.

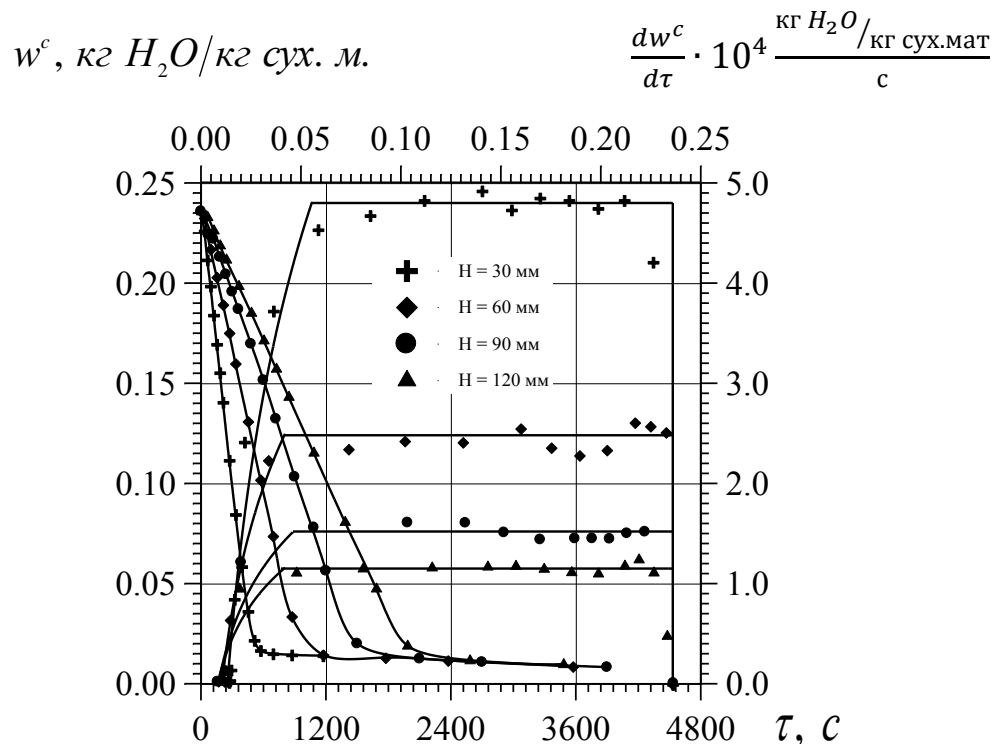


Рис. 4.12. Кінетичні криві сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату за різних висот шару матеріалу та криві швидкості сушіння.

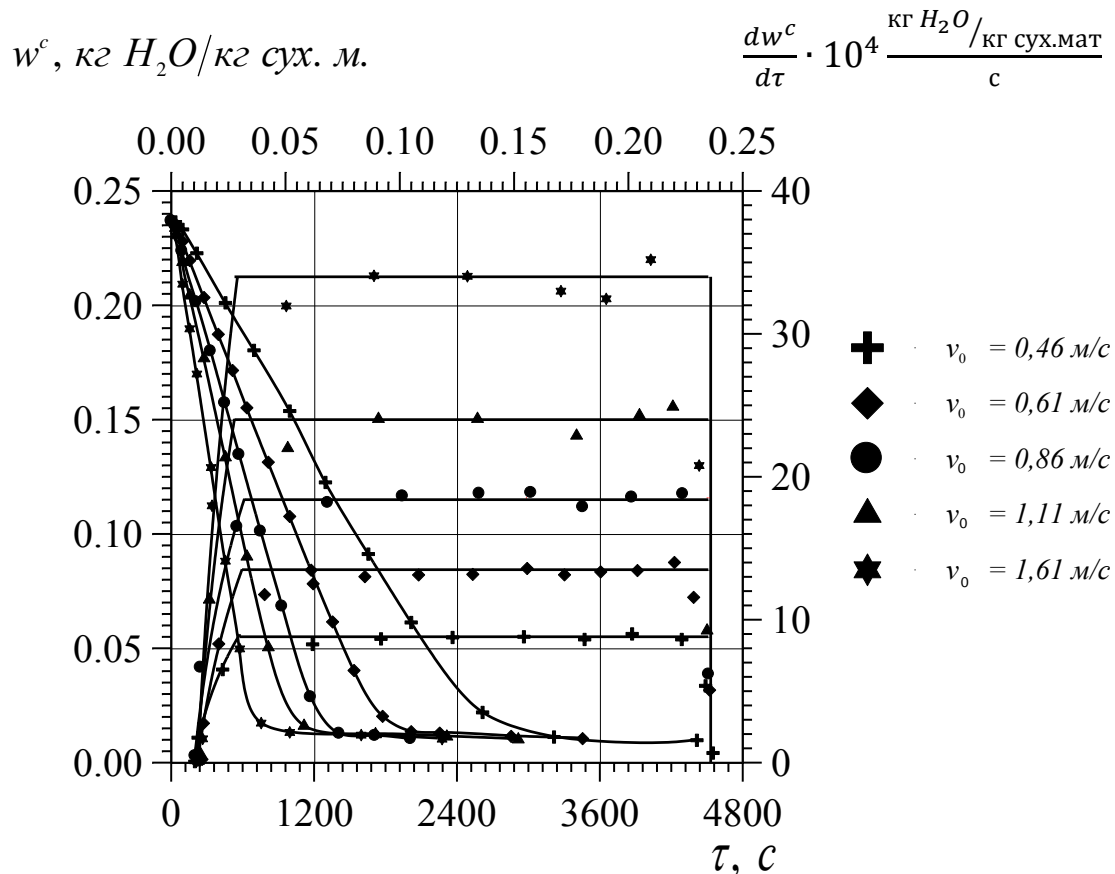


Рис. 4.13. Кінетичні криві сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату за різних швидкостей фільтрування теплового агента.

Експериментальні дані дослідження динаміки видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату представлені у вигляді залежності зміни залишкової маси вологи в шарі матеріалу від часу $G = f(\tau)$ (рис.4.14).

Представлені кінетичні криві (рис. 4.12, 4.13) характеризуються наявністю періодів повного та часткового насичення теплового агента вологою. Період повного насичення теплового агента парами вологи існує до моменту досягнення фронту масообміну перфорованої перегородки і на кінетичних кривих вказаному періоду відповідає пряма лінія, тангенс кута нахилу якої визначає швидкість переміщення зони масообміну. Тангенс кута нахилу прямолінійних ділянок кінетичних кривих зменшується із ростом висоти шару Феруму(II) сульфат гептагідрату (рис. 4.12), що свідчить не про зменшення швидкості переміщення фронту масообміну, а пояснюється зростанням шляху його переміщення до перфорованої перегородки. Із зростанням швидкості

фільтрування теплового агенту (рис. 4.13) тангенс кута нахилу прямих зростає, що пояснюється ростом сушильного потенціалу. Період часткового насичення настає після досягнення фронтом масообміну перфорованої перегородки, внаслідок цього кількість вологого матеріалу зменшується, тепловий агент тільки частково насичується парами води та його температура на виході із шару зростає. Цьому періоду відповідає криволінійна ділянка на кінетичних кривих фільтраційного сушіння (рис. 4.12, 4.13).

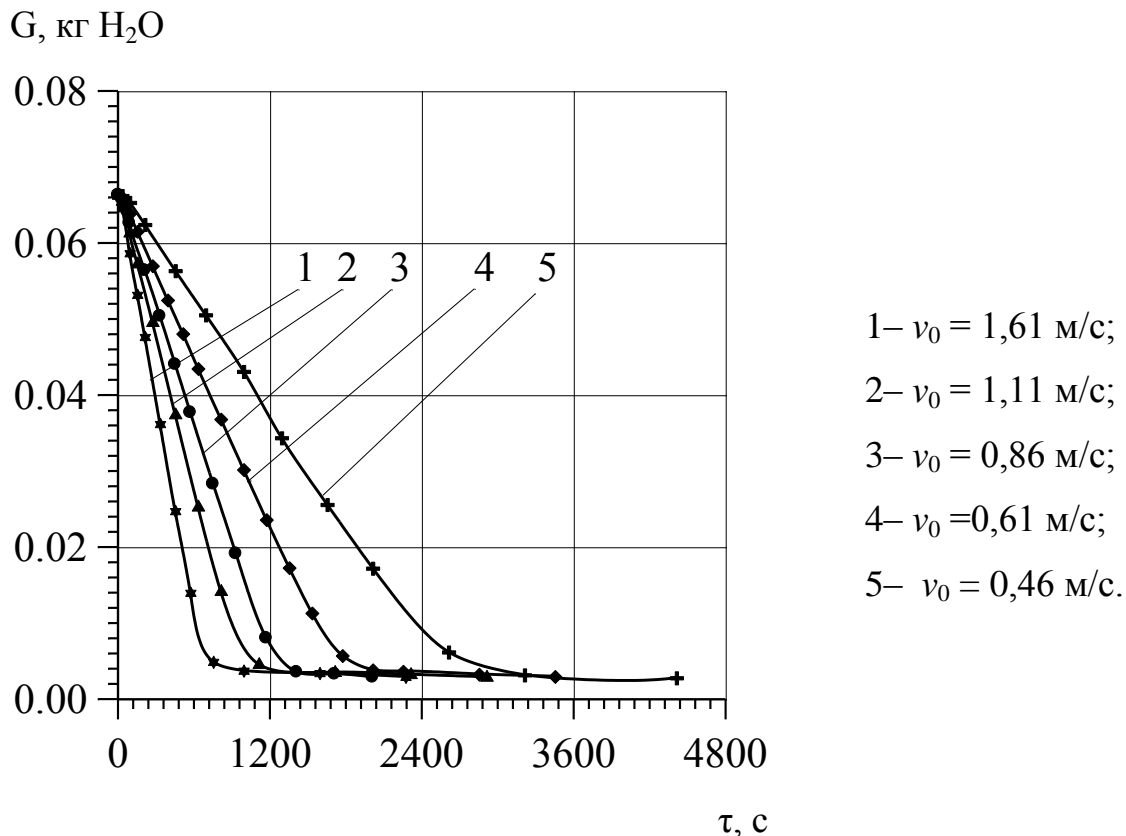


Рис. 4.14. Динаміка видалення води з шару Феруму(II) сульфат гептагідрату (зміна залишкової маси води в шарі матеріалу в часі) за різних швидкостей руху теплового агенту ($H = 60$ мм, $T = 335$ К).

У початковий момент сушіння $\tau = 0$, маса води (поверхневої та кристалізаційної) у шарі Ферум (II) сульфат гептагідрату висотою $H = 60$ мм становила 0,068 кг. Дослідження динаміки виділення води із шару матеріалу за різних швидкостей фільтрування теплового агенту (рис. 3.3) показали, що зростання швидкості теплового агенту приводить до збільшення кількості

вологи, що видаляється з шару за одиницю часу. Інтенсивність сушіння - кількість видаленої вологи з шару за одиницю часу, визначається за тангенсом кута нахилу прямолінійних частин кривих $G = f(\tau)$ до осі абсцис. Зміна кута нахилу кривих свідчить про те, що у періоді повного насичення теплового агенту вологою інтенсивність видалення вологи зростає із збільшенням швидкості руху теплового агенту.

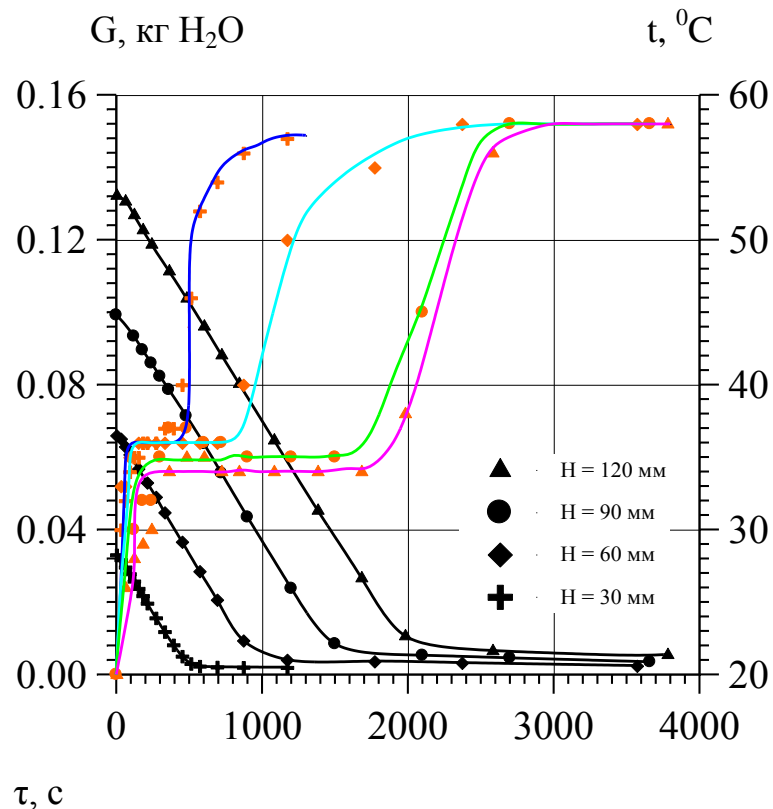


Рис. 4.15. Динаміка видалення вологи з шару Феруму(II) сульфат гептагідрату (залежність зміни залишкової маси вологи в шарі матеріалу залежно від часу) за різних висот шару та зміни температури теплового агенту на виході із стаціонарного шару ($\nu_0 = 0,86$ м/с; $T = 335$ К).

Як видно з графічної залежності, представлені на рис. 4.15, у початковий момент сушіння $\tau = 0$, кількість вологи в шарі є пропорційною його висоті - з ростом висоти шару зростає. Паралельність прямолінійних ділянок кривих свідчить про те, що динаміка видалення вологи не залежить від

висоти шару, а визначається величиною сушильного потенціалу теплового агенту, який залежить від температури і об'ємної витрати останнього.

На рис. 4.15 також представлені графічні залежності, що характеризують зміну температури теплового агенту, яка вимірювалася на виході з шарів матеріалу різної висоти. Під час фільтрування сушильного агенту крізь шар матеріалу, тепловий агент рівномірно розподіляється по їх об'єму віддаючи тепло і, як результат - весь матеріал бере участь у процесі теплопередачі. В перші секунди процесу сушіння, температура на виході із шару зростає, що свідчить про прогрівання матеріалу, після чого її значення залишається сталим, про що свідчать прямолінійні горизонтальні ділянки на графічних залежностях, довжина яких зростає із збільшенням висоти шару матеріалу. Сталість значення температури теплового агенту на виході з шару характеризує період повного насичення теплового агенту вологою. Після досягнення матеріалом значення критичного вологовмісту $W_{кр.}$, настає період часткового насичення теплового агенту вологою і у цьому періоді температура теплового агенту на виході з шару матеріалу зростає. Досягнення сталого значення температури на виході із шару, дещо нижчого від температури на вході у шар, свідчить про припинення процесу сушіння.

З метою отримання розрахункової залежності, яка дає змогу визначити зміну вологовмісту Ферум(II) сульфат гептагідрату в часі в періоді повного насичення теплового агенту вологою, проведене узагальнення результатів дослідження кінетики сушіння. Як зазначалося вище, представлені на рис. 4.12-4.14 графічні залежності характеризуються наявністю двох ділянок, що відповідають періодам повного та часткового насичення теплового агенту вологою. Точка переходу періоду повного насичення теплового агенту вологою у період часткового насичення характеризується значенням критичного вологовмісту $W_{кр.}$.

Для визначення значень критичного вологовмісту $W_{кр}$ та часу його досягнення $\tau_{кр}$ за різних перепадів тиску (швидкостей руху теплового агенту), а

також висот шару Феруму(II) сульфат гептагідрату, використаний метод, який полягає у побудові кінетичних кривих у координатах $\lg(W - W_p) = f(\tau)$ (рис. 4.16, 4.17), де W , W_p – біжуче та рівноважне значення вологовмісту матеріалу, кг/кг; τ - час сушіння, с.

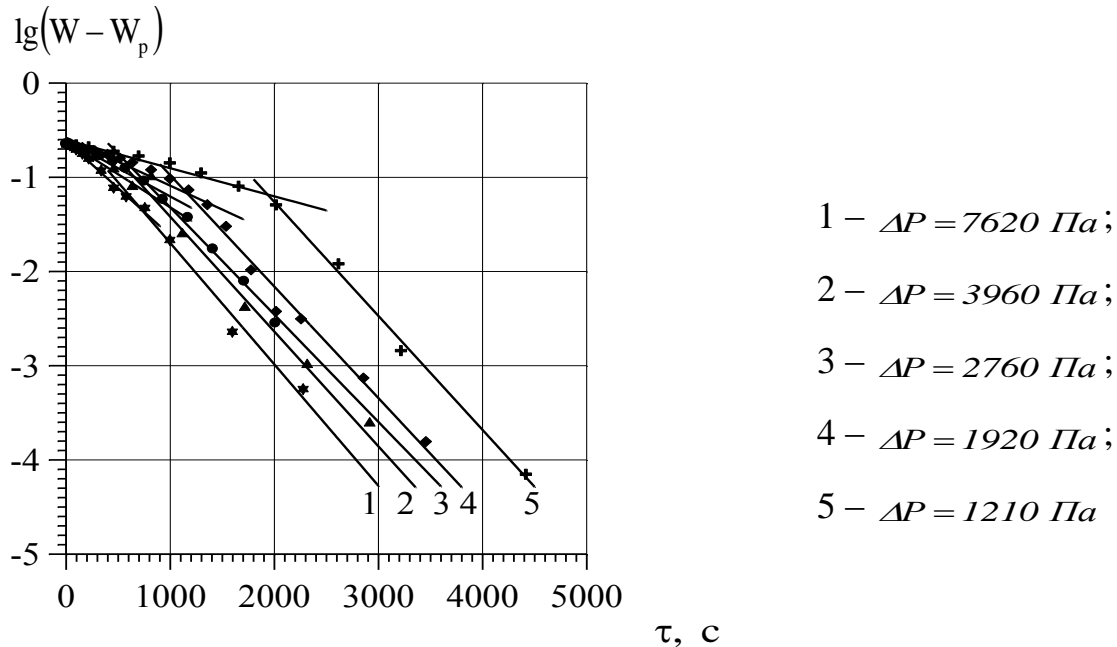


Рис. 4.16. Визначення критичного вологовмісту і часу її досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння ($H=60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, $T=333 \text{ К}$).

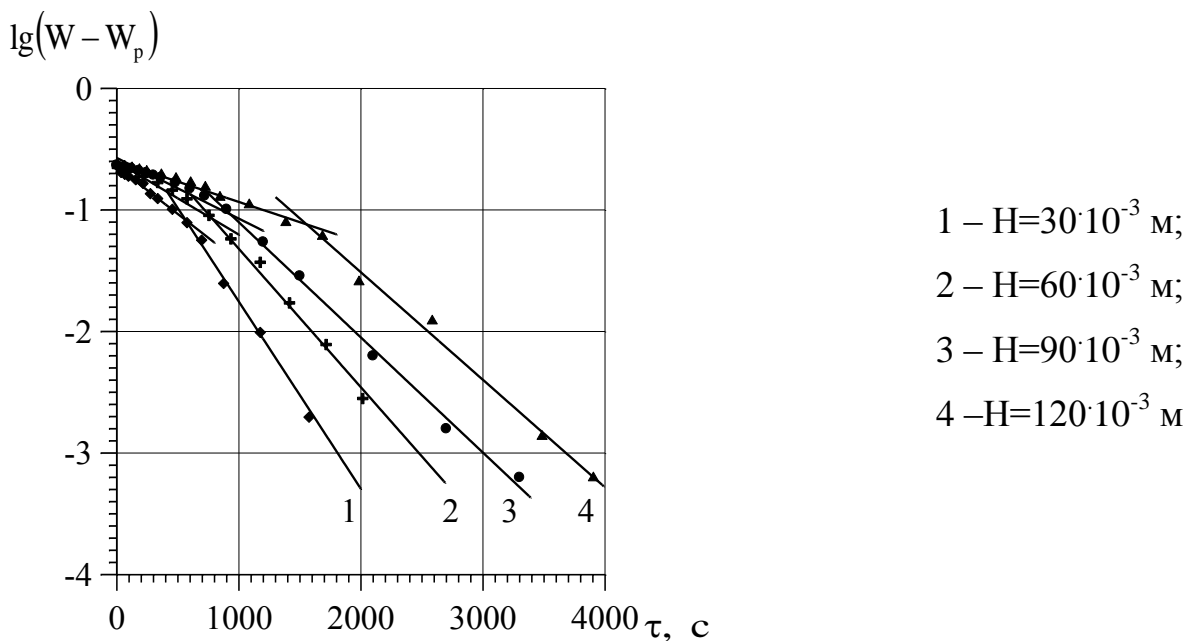


Рис. 4.17. Визначення критичного вологовмісту і часу її досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння ($\Delta P = 2760 \text{ Па}$, $T=333 \text{ К}$)

Як видно з графічних залежностей, представлених на рис. 4.16 та 4.17, періоди повного і часткового насичення теплового агенту вологою можна узагальнити прямими лініями, ордината точки перетину яких буде відповідати критичному вологовмісту $IgW_{кр}$, а абсциса – часу його досягнення. В такому випадку, значення критичного вологовмісту можна розрахувати згідно із залежністю (1.13).

Значення ординат точок перетину двох прямих, що відповідають періодам повного і часткового насичення теплового агенту вологою, на графічних залежностях (рис. 4.16 та 4.17) є однаковими та дорівнюють $x=-1,2$. Отже, значення критичного вологовмісту не залежить від швидкості руху теплового агенту та висоти шару Феруму(II) сульфат гептагідрату і його значення, розраховане згідно із залежністю (3.1) є рівними. Отже, значення $W_{кр.} = 0,043$ кг H₂O/кг сух. мат.

Збільшення перепаду тисків від $\Delta P = 1210$ Па до $\Delta P = 7620$ Па і, як наслідок - зростання швидкості руху теплового агенту приводить до збільшення швидкості сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату і, відповідно, значення $\tau_{кр}$ зменшується (рис. 4.16). Значення $\tau_{кр}$ із зростанням висоти шару матеріалу від $30 \cdot 10^{-3}$ м до $120 \cdot 10^{-3}$ м зростає (рис. 4.17). Збільшення тривалості сушіння при збільшенні висоти шару матеріалу пояснюється зростанням кількості води, яка втримується механічно між кристалами Феруму(II) сульфат гептагідрату.

Для узагальнення кінетики сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату у періоді повного насичення теплового агенту вологою, використовуємо систему диференціальних рівнянь матеріального балансу в шарі та кінетики сушіння (1.14).

Значення кінетичного коефіцієнту a , 1/м, який не залежить від параметрів процесу і залежить від структури матеріалу розраховують згідно із залежністю:

$$a = \frac{P \cdot m \cdot n}{0,622 \cdot P_s}, \quad (4.10)$$

де P – барометричний тиск, Па; P_s – тиск насиченої пари, Па.

Значення m та n , що входять у залежність (3.3), визначають як:

$$m = \frac{\rho \cdot F}{100 \cdot M} \quad (4.11) \quad \text{та} \quad n = S \cdot \beta \cdot P_s \quad (4.12),$$

де ρ – густина сушильного агенту, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;

F – площа поперечного перерізу контейнера, м^2 ;

M – масова витрата теплового агенту, $\frac{\text{кг}}{\text{с}}$;

S – внутрішня поверхня частин матеріалу, м^2 ;

β – коефіцієнт масовіддачі, $\frac{\text{кг H}_2\text{O}}{\text{с} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{Па}}$.

З урахуванням значень m та n залежність (4.10) може бути представлена у вигляді:

$$a = \frac{F \cdot \Pi \cdot \rho \cdot S \cdot \beta}{62,2 \cdot M} \quad (4.13)$$

Розв'язком системи диференціальних рівнянь (1.14) є рівняння, яке описує кінетику сушіння в періоді повного насичення теплового агенту вологою до досягнення вологості $W = W_{\text{кр}}$.

$$\frac{W}{W_0} = 1 - \alpha \cdot \tau \cdot e^{-a \cdot H}, \quad (4.14)$$

де α – коефіцієнт сушіння, $\frac{1}{\text{с}}$, який розраховують із залежності:

$$\alpha = \frac{S \cdot \beta \cdot P_s \cdot (1 - \varphi_0)}{W_0}, \quad (4.15)$$

де W_0 – початкова вологість матеріалу, $\text{кг H}_2\text{O}/\text{кг сух. мат.}$;

φ_0 – початкова відносна вологість теплового агенту, %.

Підставивши у рівняння (4.14) значення коефіцієнту a із залежності (4.13) та значення α із залежності (4.15), отримане рівняння:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - \frac{S \cdot \beta \cdot P_s \cdot (1 - \varphi_0)}{W_0} \cdot \tau \cdot e^{-\frac{F \cdot \Pi \cdot \rho \cdot S \cdot \beta}{62,2 \cdot M} \cdot H} \quad (4.16)$$

Рівняння (4.16) можна подати у вигляді:

$$\frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\tau} = \alpha \cdot e^{-a \cdot H} \quad (4.17)$$

Якщо позначити: $y = \alpha \cdot e^{-a \cdot H}$, (4.18) тоді $\frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\tau} = y$ (4.19).

Прологарифмувавши рівняння (4.18), отримана залежність:

$$\ln(y) = \ln(\alpha) - a \cdot H \cdot \ln(e) \quad \text{або} \quad \ln(y) = \ln(\alpha) - a \cdot H \quad (4.20)$$

Для того, щоб описати кінетику процесу сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату за допомогою рівняння (4.14), необхідно визначити кінетичні коефіцієнти α і a . Кінетичні коефіцієнти α і a визначаються із експериментальних даних шляхом побудови графічної залежності $\ln(y) = f(H)$

або $\ln\left(\left(1 - \frac{W}{W_0}\right) / \tau\right) = f(H)$ згідно з рівнянням (4.19). Експериментальні дані можна узагальнити прямою лінією (рис. 4.18).

$$\ln\left(\left(1 - \frac{W}{W_0}\right) / \tau\right)$$

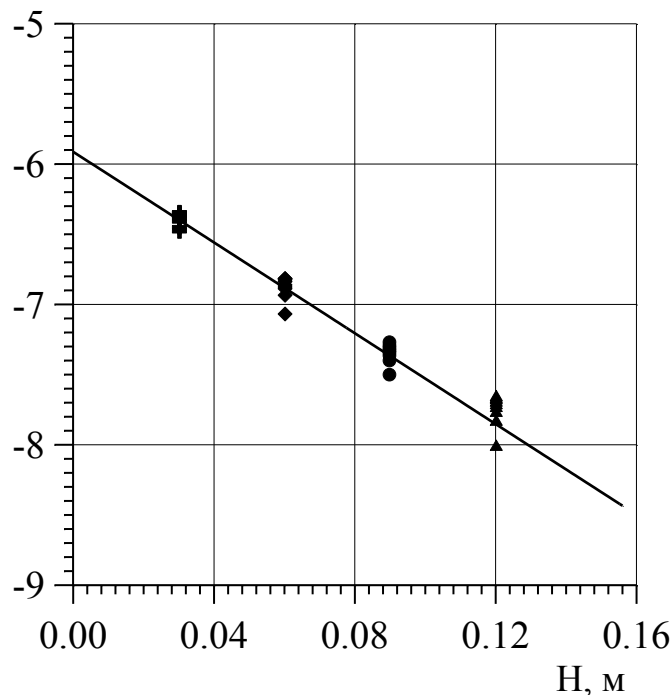


Рис. 4.18. Визначення коефіцієнтів α і a .

З наведеної графічної залежності (рис. 4.18), величина $\ln(\alpha)$ визначена за відрізком, який пряма відтинає на осі ординат, звідки значення коефіцієнта $\alpha = 3,03 \cdot 10^{-3}$ 1/с. Значення кінетичного коефіцієнта α , як впливає із рівняння (4.15), залежить від коефіцієнта масовіддачі β і як наслідок - від параметрів сушіння. За тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначене значення кінетичного коефіцієнта $a = 15,75 \frac{1}{M}$. Стале значення кінетичного коефіцієнта a визначає постійність співвідношення між масовою швидкістю M та коефіцієнтом масовіддачі β , які пропорційно зростають при збільшенні швидкості руху теплового агенту.

Розв'яжемо рівняння (4.19) відносно α :

$$\alpha = \frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\tau \cdot e^{-a \cdot H}} \quad (4.21)$$

Коефіцієнт α залежить від біжучої вологості матеріалу. Зміна вологості матеріалу в періоді повного насичення лімітується зовнішніми умовами процесу сушіння, а саме швидкістю руху та температурою теплового агенту. Швидкість руху теплового агенту, як відомо, є прямо пропорційною до гідравлічного опору сухого матеріалу. Це означає, що коефіцієнт α буде прямо пропорційно залежати як від температури теплового агенту, так і від гідравлічного опору сухого матеріалу.

Беручи до уваги те, що α є функцією гідравлічного опору сухого матеріалу (температура теплового агенту в даному випадку є величиною сталою), залежність кінетичного коефіцієнта α від параметрів процесу може бути представлена, виходячи з методу аналізу розмірностей [23], рівнянням:

$$\alpha = A \cdot \Delta p_c^n, \quad (4.22)$$

де Δp_c - перепад тисків по сухому матеріалу, Па.

Значення коефіцієнта A та показника степеня n є сталими для даного матеріалу і визначаються, виходячи з результатів експериментів, проведених за різних параметрів сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату.

Для знаходження значень A та n складено систему з двох рівнянь, розв'язок якої дає можливість знайти невідомі коефіцієнти:

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \cdot \Delta p_1^n \\ \alpha_2 = A \cdot \Delta p_2^n \end{cases} \quad (4.23)$$

Кожне рівняння відповідає наступним параметрам сушіння:

- шар висотою $H=60 \cdot 10^{-3}$ м, температура теплового агента $T=333$ К;
- перепад тисків по сухому матеріалові в межах 1210 – 7620 Па.

Коефіцієнт α визначається, виходячи з експериментальних даних, відповідно для кожного параметру сушіння за рівнянням (4.21). Розраховані значення α згідно рівняння (4.23) є в межах похибки $\pm 5\%$ від визначеного графічним методом коефіцієнта $\alpha = 3,03 \cdot 10^{-3}$ 1/с (рис. 4.18).

Розв'язавши систему рівнянь (4.23), отримаємо значення коефіцієнта $A = 6,5 \cdot 10^{-4}$ та показника степеня $n=0,2$, який показує степінь впливу опору сухого матеріалу і, як наслідок, – швидкості руху теплового агента.

Отже, кінетичне рівняння (4.16), яке дає змогу прогнозувати фільтраційне сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату в періоді повного насичення вологою можна представити у вигляді:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 6,5 \cdot 10^{-4} \Delta P_c^{0,2} \cdot \tau \cdot e^{-15,75 \cdot H} \quad (4.24)$$

Залежність (4.24) дає змогу розрахувати зміну вологовмісту Феруму(II) сульфат гептагідрату в часі в періоді повного насичення теплового агента вологою в діапазоні зміни висот від $30 \cdot 10^{-3}$ до $120 \cdot 10^{-3}$ м та швидкостей теплового агента від 0,46 до 1,61 м/с.

Рівняння кривої швидкості сушіння в періоді часткового насичення теплового агенту вологою має вигляд [24]:

$$-\frac{dW}{d\tau_0} = K \cdot (W - W_p), \quad (4.25)$$

де K – коефіцієнт сушіння, 1/с, який розраховується як:

$$K = \chi \cdot N, \quad (4.26)$$

де χ - відносний коефіцієнт сушіння, який є сталим для даного матеріалу, кг/кг;
 N – швидкість сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою, (кг/кг·с).

Представимо рівняння (4.26) в інтегральній формі:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = e^{-K(\tau - \tau_{кр})} \quad (4.27)$$

Прологарифмувавши рівняння (4.27) отримаємо:

$$\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр}) \quad (4.28)$$

Для визначення коефіцієнту сушіння K , експериментальні значення представлені в координатах $\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр})$ (рис. 4.17 та рис. 4.18) і за тангенсом кута нахилу прямих визначали значення останнього. Як видно з графічних залежностей, представлених на рис. 4.19 та рис. 4.20, коефіцієнт сушіння K залежить від висоти шару Ферум(II) сульфат гептагідрату та від швидкості руху теплового агенту.

Залежність (4.28) із врахуванням залежності (3.26) можна представити у вигляді:

$$\frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = e^{-\chi N(\tau - \tau_{кр})} \quad (4.29)$$

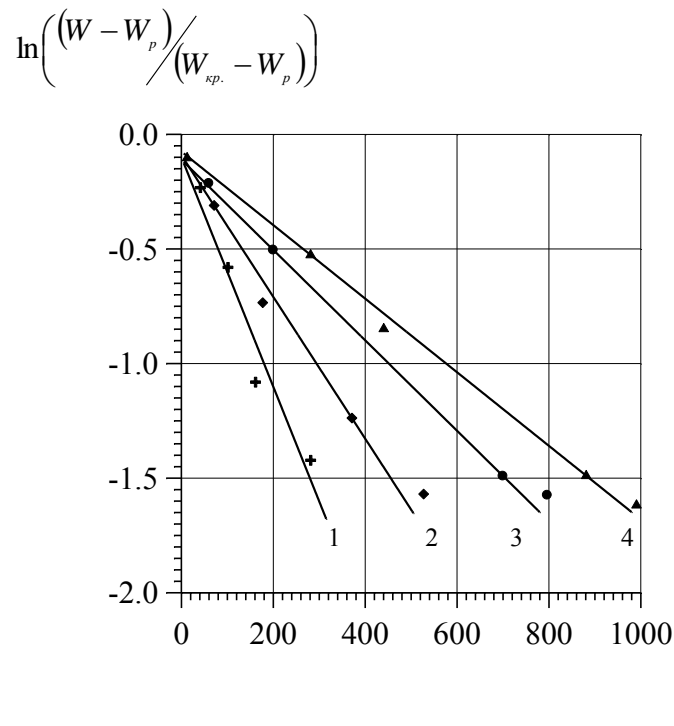


Рис. 4.19. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($v_0 = 0,86 \text{ м/с}$; $T=335 \text{ К}$)

1 – $H=30 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 2 – $H=60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 3 – $H=90 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, 4 – $H=120 \cdot 10^{-3} \text{ м}$

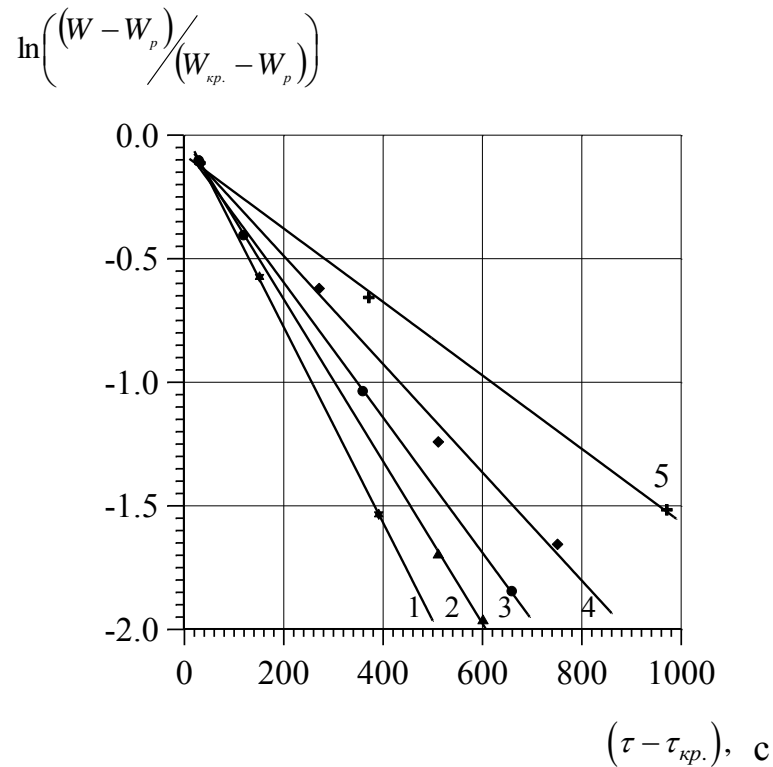


Рис. 4.20. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($H=60 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $T=335 \text{ К}$)

1 – $v_0 = 1,61 \text{ м/с}$; 2 – $v_0 = 1,11 \text{ м/с}$; 3 – $v_0 = 0,86 \text{ м/с}$;

4 – $v_0 = 0,61 \text{ м/с}$; 5 – $v_0 = 0,46 \text{ м/с}$

Значення коефіцієнтів сушіння K (отриманих з рис. 4.19 та рис. 4.20) та швидкостей сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою N подані у табл. 4.3.

Швидкість сушіння N у періоді повного насичення теплового агенту вологою визначали за залежністю:

$$N = \frac{W_0 - W_{кр}}{\tau_{кр}} = \frac{(W_0 - W_{кр}) \cdot \alpha \cdot e^{-a \cdot H}}{1 - \frac{W_{кр}}{W_0}} \quad (4.30)$$

Таблиця 4.3

Швидкість сушіння N у періоді повного насичення теплового агенту та значення коефіцієнту сушіння K

T=335 K			$v_0 = 0,86$ м/с		
v_0 , м/с	$N \cdot 10^4$, кг/(кг·с)	$K \cdot 10^3$, 1/с	$H \cdot 10^3$, м	$N \cdot 10^4$, кг/(кг·с)	$K \cdot 10^3$, 1/с
0,46	0,9	1,5	30	4,6	5,1
0,61	1,32	2,2	60	2,4	3,1
0,86	1,84	2,7	90	1,5	1,97
1,11	2,34	3,3	120	1,1	1,61
1,61	3,34	4,0			

Відносний коефіцієнт сушіння χ є величиною сталою для досліджуваного матеріалу і його числове значення дає змогу розрахувати час сушіння Феруму(II) сульфат гептагідрату, а також визначити параметри для здійснення фільтраційного процесу сушіння. Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ , результати представлені у вигляді графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.21.) і значення коефіцієнту визначені за тангенсом кута нахилу прямої.

З рис. 4.21 визначений відносний коефіцієнт сушіння χ , який для Феруму(II) сульфат гептагідрату є рівним $\chi = 10,47$ кг/кг. Виходячи з рівняння

(4.29) та враховуючи значення λ , виведена залежність для розрахунку зміни вологовмісту Феруму(II) сульфат гептагідрату в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,47 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})} + W_p \quad (4.31)$$

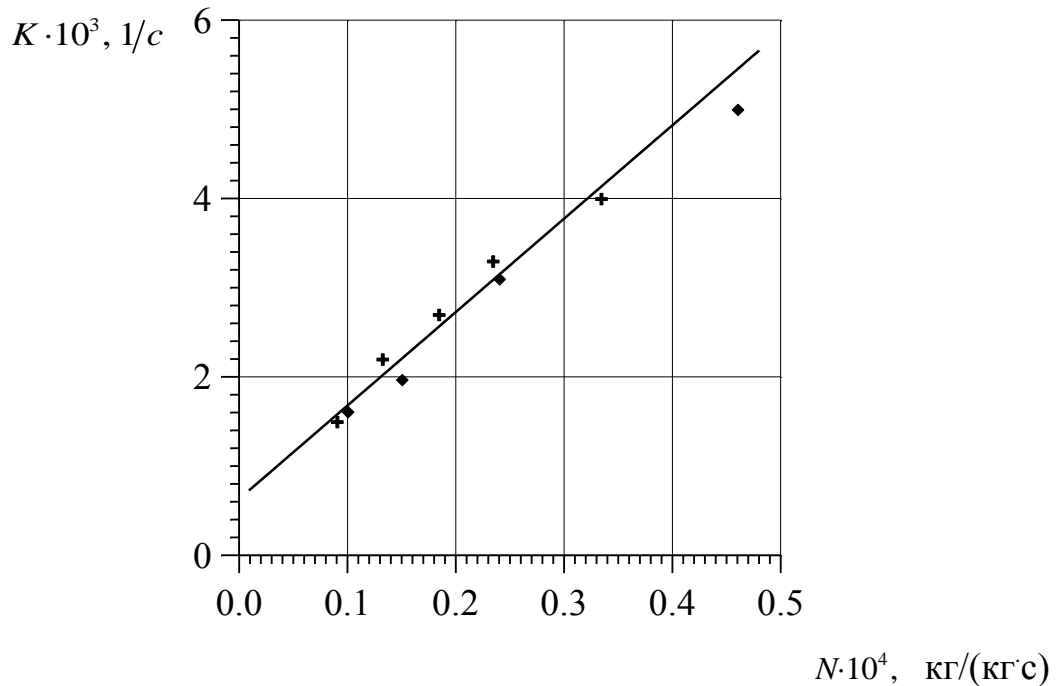


Рис. 4.21. Залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N .

Оскільки значення часу досягнення критичного вологовмісту є функцією критичного вологовмісту, тобто, $\tau_{кр} = f(W_{кр})$, то згідно залежності (4.30) значення останнього можна розрахувати як:

$$\tau_{кр} = \frac{W_0 - W_p}{N} \quad (4.32)$$

Із урахуванням залежності (4.32), залежність (4.31) можна записати у вигляді:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,47 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{кр}}{N})} + W_p \quad (4.33)$$

Залізоокисний пігмент

Проведені дослідження зміни вологості залізоокисного пігменту в часі за різних висот шару вологого матеріалу, за різних перепадів тиску по сухому матеріалові, а також за різних температур теплового агенту. Для здійснення експериментів використовувалась експериментальна установка, зображена на рис. 4.12, та методика, представлена у другому розділі.

Результати досліджень впливу висоти шару залізоокисного пігменту у діапазоні зміни від 30 до 60 мм на час сушіння (за однакової температури та швидкості фільтрування теплового агенту) представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.22, з яких видно, що зростання висоти шару приводить до збільшення тривалості сушіння, що пояснюється зростанням кількості води, що міститься в шарі та збільшенням шляху переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки.

w^c , кг H_2O /кг сух. м.

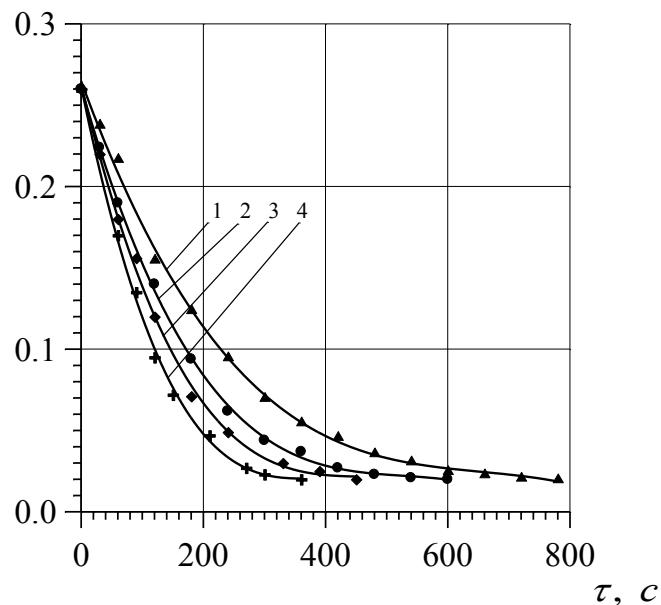


Рис. 4.22. Кінетичні криві сушіння залізоокисного пігменту за різних висот шару матеріалу: 1 – $H = 60$ мм, 2 – $H = 50$ мм, 3 – $H = 40$ мм, 4 – $H = 30$ мм

Результати досліджень впливу перепадів тисків по сухому матеріалові (як результат - швидкості фільтрування теплового агенту) на процес

фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.23.

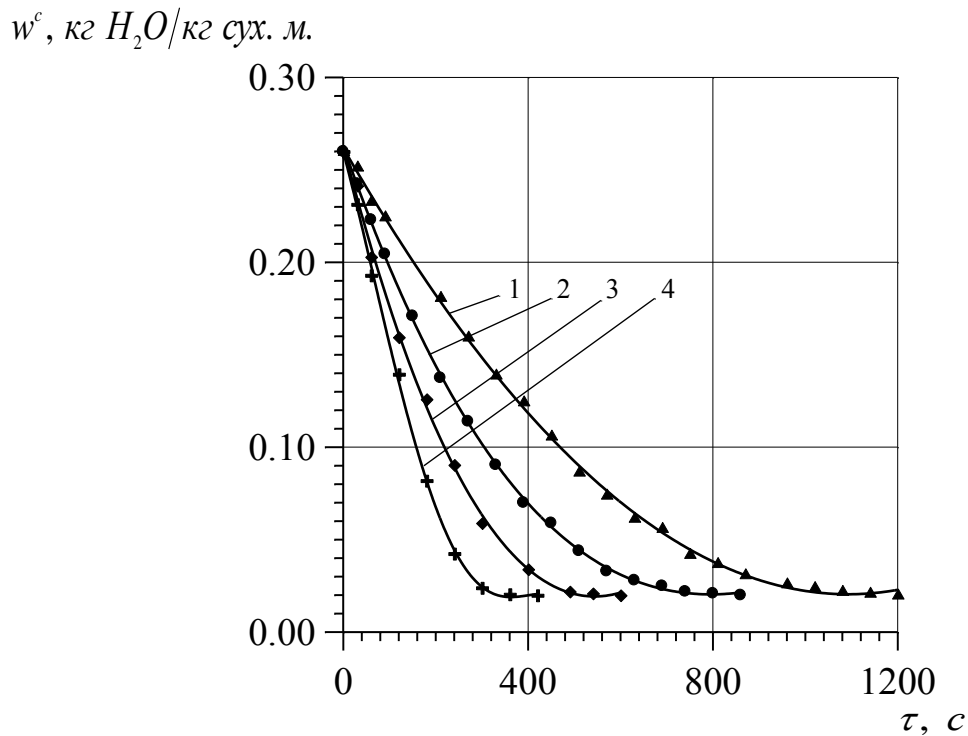


Рис. 4.23. Кінетичні криві сушіння залізоокисного пігменту за різних перепадів тисків по сухому матеріалові: 1 – $\Delta P = 16000$ Па, 2 – $\Delta P = 20000$ Па, 3 – $\Delta P = 25000$ Па, 4 – $\Delta P = 35000$ Па

Збільшення перепаду тисків (за однакової висоти шару і температури теплового агенту) приводить до скорочення тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість внесеної теплоти в пористий шар матеріалу за одиницю часу, що приводить до інтенсифікації процесу внаслідок зростання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі між тепловим агентом та частинками матеріалу.

Результати досліджень впливу температури теплового агенту на тривалість процесу фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.24. Скорочення тривалості сушіння за збільшення температури теплового агенту пояснюється зростанням сушильного потенціалу останнього, а також зростанням коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи із частин матеріалу.

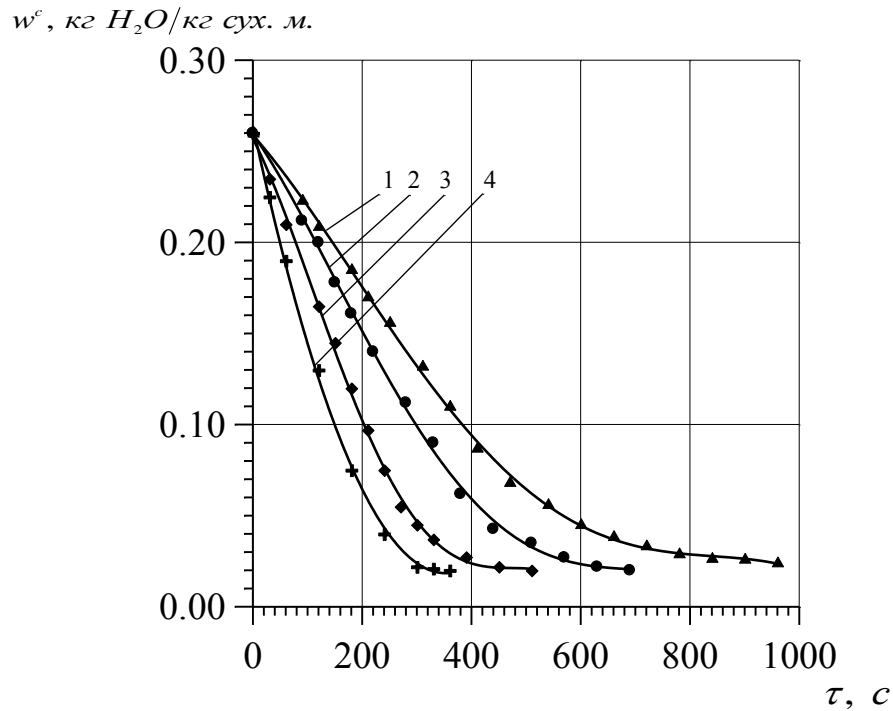


Рис. 4.24. Кінетичні криві сушіння залізоокисного пігменту за різних температур теплового агента: 1 – $t=40^{\circ}\text{C}$, 2 – $t=60^{\circ}\text{C}$, 3 – $t=80^{\circ}\text{C}$, 4 – $t=100^{\circ}\text{C}$

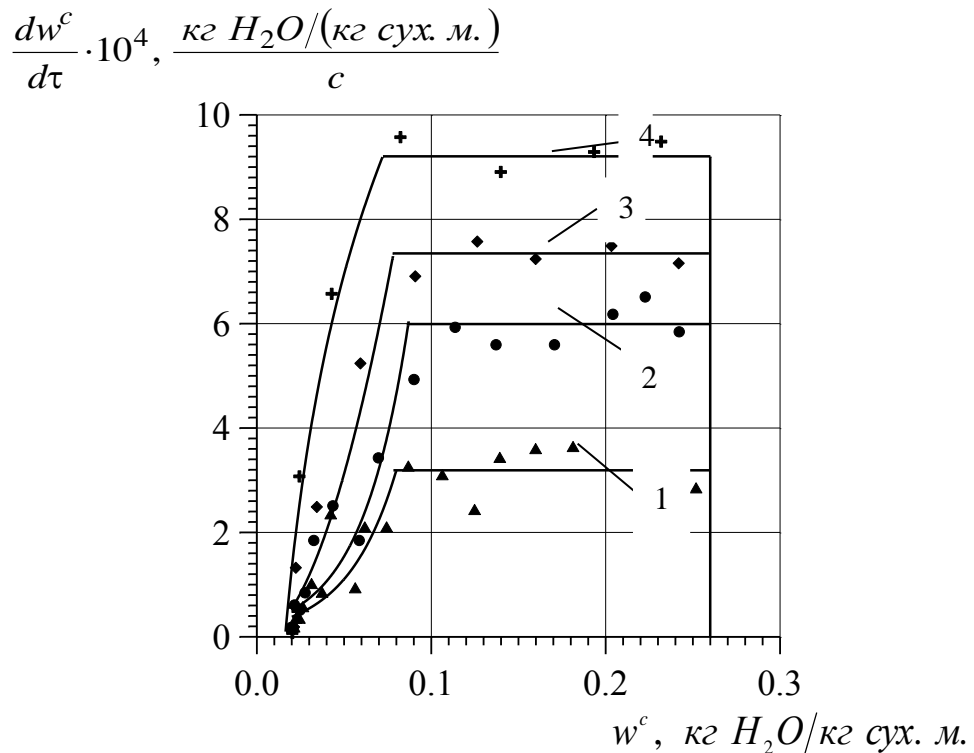


Рис. 4.25. Криві швидкості сушіння залізоокисного пігменту ($H=30\text{ мм}$, $T=100^{\circ}\text{C}$) за різних перепадів тисків по сухому матеріалові: 1 – $\Delta P = 16000\text{ Па}$, 2 – $\Delta P = 20000\text{ Па}$, 3 – $\Delta P = 25000\text{ Па}$, 4 – $\Delta P = 35000\text{ Па}$

На рис. 4.25 подано графічну залежність швидкості сушіння залізоокисного пігменту від вологовмісту $dw^c / d\tau = f(w^c)$ за різних перепадів тисків по сухому матеріалові. Аналіз рис. 4.25 показує, що процес сушіння залізоокисного пігменту відбувається в двох періодах. Точка переходу горизонтальної лінії у вертикальну відповідає завершенню періоду повного насичення теплового агенту парами вологи й переходу процесу фільтраційного сушіння залізоокисного пігменту до періоду часткового насичення теплового агенту. Зростання перепаду тисків по сухому матеріалові (швидкості фільтрування теплового агенту) приводить до зростання швидкості сушіння, що пояснюється зростанням коефіцієнтів тепло- й масоперенесення.

Для визначення критичного вологовмісту залізоокисного пігменту і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння використаний метод побудови кінетичних кривих у координатах $\lg(W - W_p) = f(\tau)$ (рис. 4.26 - 4.28).

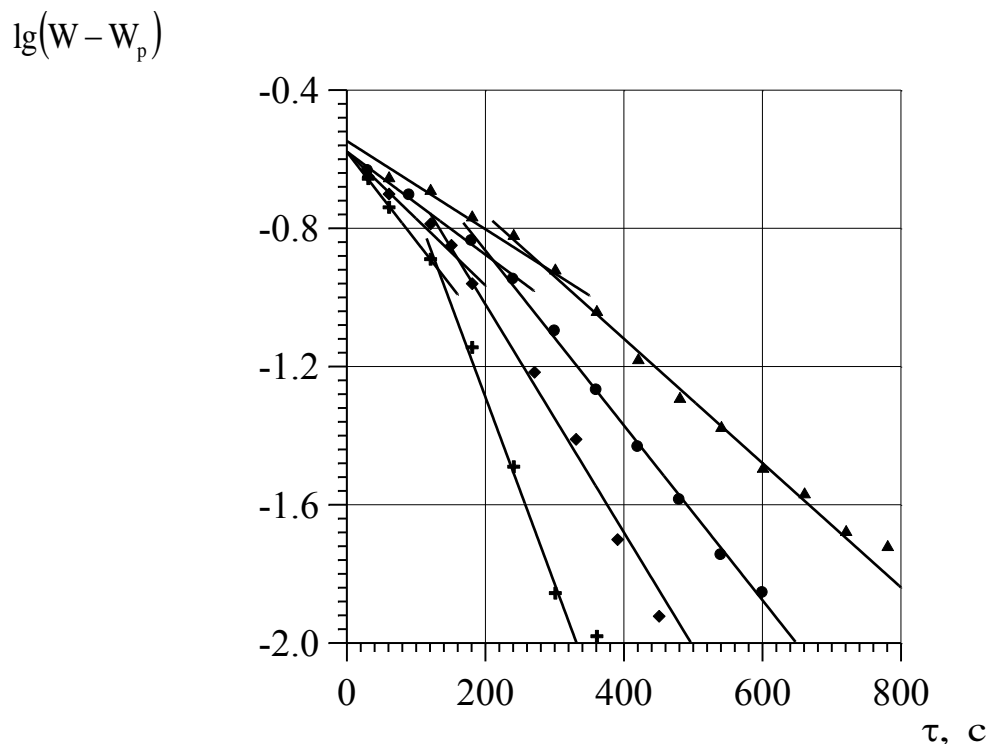


Рис. 4.26. Визначення критичного вологовмісту залізоокисного пігменту і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння ($t=100^{\circ}\text{C}$, $\Delta P = 35000 \text{ Па}$) ▲ – $H = 60$ мм, ● – $H = 50$ мм, ◆ – $H = 40$ мм, + – $H = 30$ мм

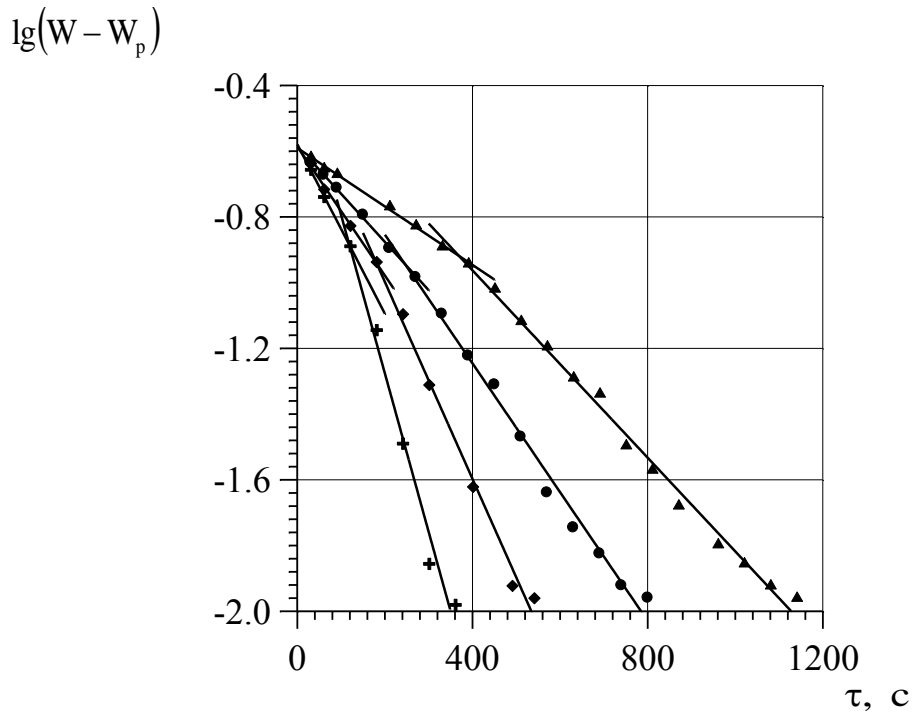


Рис. 4.27. Визначення критичного вологовмісту залізоокисного пігменту і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння ($H=30$ мм, $t=100^{\circ}\text{C}$):

▲ – $\Delta P = 16000$ Па; ● – $\Delta P = 20000$ Па; ◆ – $\Delta P = 25000$ Па; + – $\Delta P = 35000$ Па

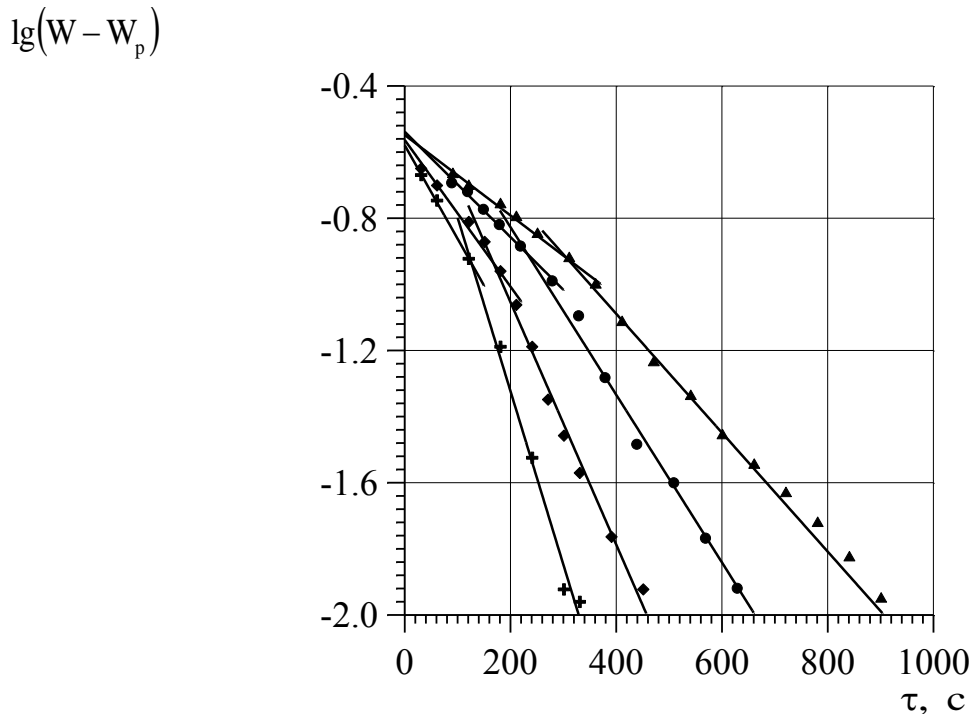


Рис. 4.28. Визначення критичного вологовмісту залізоокисного пігменту і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння ($\Delta P = 35000$ Па; $H = 30$ мм): ▲ – $t = 40^{\circ}\text{C}$, ● – $t = 60^{\circ}\text{C}$, ◆ – $t = 80^{\circ}\text{C}$, + – $t = 100^{\circ}\text{C}$

Як видно з графічних залежностей, представлених на рис. 4.26 - 4.28, періоди повного і часткового насичення теплового агенту вологою узагальнені прямими лініями, ордината точки перетину яких відповідає критичному вологовмісту $lgW_{кр}$, а абсциса – часу його досягнення. Значення ординат точок перетину двох прямих, що відповідають періодам повного і часткового насиченню теплового агенту вологою, на графічних залежностях (рис. 4.26 - 4.28) є однаковими та дорівнюють $x=-0,9$. Отже, значення критичного вологовмісту не залежить від швидкості руху теплового агенту, висоти шару матеріалу та температури теплового агенту. В такому випадку, значення критичного вологовмісту можна розрахувати згідно залежності (1.13). Отож, значення $W_{кр}=0,22$ кг H_2O /кг сух. мат.

Значення $\tau_{кр}$ із зростанням висоти шару матеріалу від $H=30 \cdot 10^{-3}$ м до $H=120 \cdot 10^{-3}$ м зростає (рис. 4.26). Збільшення тривалості сушіння при збільшенні висоти шару матеріалу пояснюється зростанням кількості води, яка втримується механічно між частинками залізоокисного пігменту. За збільшення перепаду тисків від $\Delta P = 16000$ Па до $\Delta P = 35000$ Па і, як наслідок - зростання швидкості руху теплового агенту (рис. 4.27), а також за збільшення температури теплового агенту від $t=40$ до $t=100^{\circ}C$ (рис. 4.28) значення $\tau_{кр}$ зменшується. Результати визначення часу досягнення критичного вологовмісту $\tau_{кр}$ представлені у табл. 4.4.

Таблиця 4.4.

Час досягнення критичного вологовмісту залізоокисного пігменту

$H = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $\Delta P=35000$ Па		$H = 30 \cdot 10^{-3}$ м, $T =$ $100^{\circ}C$		$T = 100^{\circ}C$, $\Delta P=35000$ Па	
$t, ^{\circ}C$	$\tau_{кр}, c$	P, Pa	$\tau_{кр}, c$	$H \cdot 10^3, m$	$\tau_{кр}, c$
100	120	35000	120	30	120
80	176	25000	180	40	160
60	230	20000	242	50	210
40	320	16000	360	60	290

Щоб описати кінетику процесу сушіння залізоокисного пігменту за допомогою рівняння (4.14), необхідно визначити кінетичні коефіцієнти α і a . Кінетичні коефіцієнти α і a визначаються із експериментальних даних, шляхом побудови графічної залежності $\ln(y) = f(H)$ або $\ln\left(\left(1 - \frac{W}{W_0}\right)/\tau\right) = f(H)$ згідно з рівнянням (4.19). Експериментальні дані можна узагальнити прямою лінією (рис. 4.29).

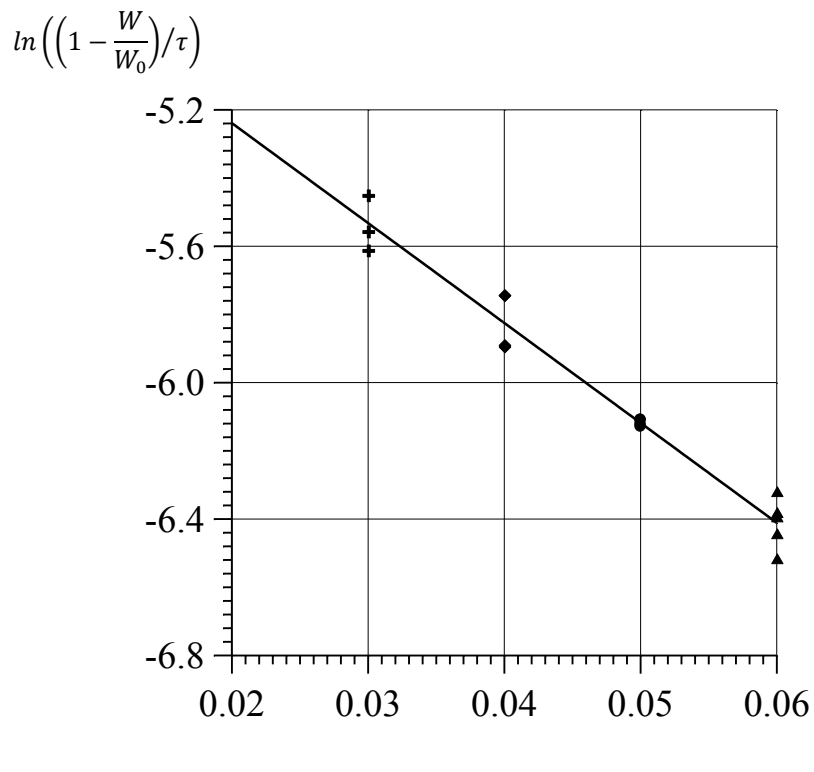


Рис. 4.29. Визначення коефіцієнтів α і a залізоокисного пігменту.

З наведеної графічної залежності (рис. 4.29), величина $\ln(\alpha)$ визначена за відрізком, який пряма відтинає на осі ординат, а саме, $\ln(\alpha) = -4,65$, звідки значення коефіцієнта $\alpha = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$. Значення кінетичного коефіцієнта α , як впливає із рівняння (4.15), залежить від коефіцієнта масовіддачі β і як наслідок - від параметрів сушіння. За тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначене значення кінетичного коефіцієнта $a = 29,31 \frac{1}{\text{м}}$.

Як бачимо, коефіцієнт α залежить від біжучої вологості матеріалу. Зміна вологості матеріалу в періоді повного насичення теплового агенту

вологою лімітується зовнішніми умовами процесу сушіння, а саме швидкістю руху та температурою теплового агента. Швидкість руху теплоносія, як відомо прямо пропорційна гідравлічному опору сухого матеріалу. Це означає, що коефіцієнт α буде прямо пропорційно залежати як від температури теплового агента так і від гідравлічного опору сухого матеріалу.

Враховуючи те, що α є функцією гідравлічного опору сухого матеріалу та температури теплового агента, залежність кінетичного коефіцієнта α від параметрів процесу може бути представлена, виходячи з методу аналізу розмірностей, рівнянням:

$$\alpha = A \cdot \Delta p_c^n \cdot t^m \quad (4.34)$$

де Δp_c - перепад тисків по сухому матеріалу, Па;

t – температура теплового агента, °С.

Коефіцієнти A, n, m є сталими для даного матеріалу і визначаються, виходячи з результатів експериментів, проведених при різних параметрах сушіння залізоокисного пігменту.

Для знаходження коефіцієнтів A, n, m складемо систему з трьох рівнянь, розв'язок якої дасть можливість знайти невідомі коефіцієнти:

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \cdot \Delta p_1^n \cdot t_1^m \\ \alpha_2 = A \cdot \Delta p_2^n \cdot t_2^m \\ \alpha_3 = A \cdot \Delta p_3^n \cdot t_3^m \end{cases} \quad (4.35)$$

Кожне рівняння відповідає наступним параметрам сушіння:

- шар висотою $H=30 \cdot 10^{-3}$ м,
- температура теплового агента в межах 40 – 100 °С;
- перепад тисків по сухому матеріалові в межах 16000 – 35000 Па.

Коефіцієнт α визначається, виходячи з експериментальних даних відповідно для кожного параметру сушіння за рівнянням (4.21). Розраховані

значення α згідно рівняння (4.21) є в межах похибки $\pm 5\%$ від визначеного графічним методом з рис. 4.29 коефіцієнта ($\alpha = 9,5 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с}$).

Розв'язавши систему рівнянь (4.35), отримаємо значення коефіцієнтів $\mathbf{A}=0,008$; $\mathbf{n} = 0,01$; $\mathbf{m}=0,03$. Показник степеня \mathbf{n} відображає степiнь впливу швидкостi руху теплового агента i , як наслідок, – опору сухого матеріалу на зміну вологовмісту матеріалу. В свою чергу, показник степеня \mathbf{m} показує степiнь впливу температури теплового агента на зміну вологовмісту. Отже, кінетичне рівняння, яке дозволяє прогнозувати фільтраційне сушіння залізоокисного пігменту у періоді повного насичення теплового агента вологою можна представити у вигляді:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 0.008 \cdot \Delta p_c^{0.01} \cdot t^{0.03} \cdot \tau \cdot e^{-29.31 \cdot H} \quad (4.36)$$

Залежність (4.36) дає змогу розрахувати зміну вологовмісту залізоокисного пігменту в часі в періоді повного насичення теплового агента вологою в діапазоні висот $30 \cdot 10^{-3} - 60 \cdot 10^{-3}$ м, температур теплового агента $40 - 100^\circ\text{C}$, перепадів тисків по сухому матеріалу $16000 - 35000$ Па.

Узагальнення результатів дослідження для періоду часткового насичення теплового агента вологою під час сушіння залізоокисного пігменту проводилося на основі рівнянь (4.25) – (4.28). Для визначення коефіцієнту сушіння K , експериментальні значення представляли у координатах

$$\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр}) \quad (\text{рис. 4.30} - 4.32) \quad \text{і за тангенсом кута нахилу прямих}$$

визначали його значення.

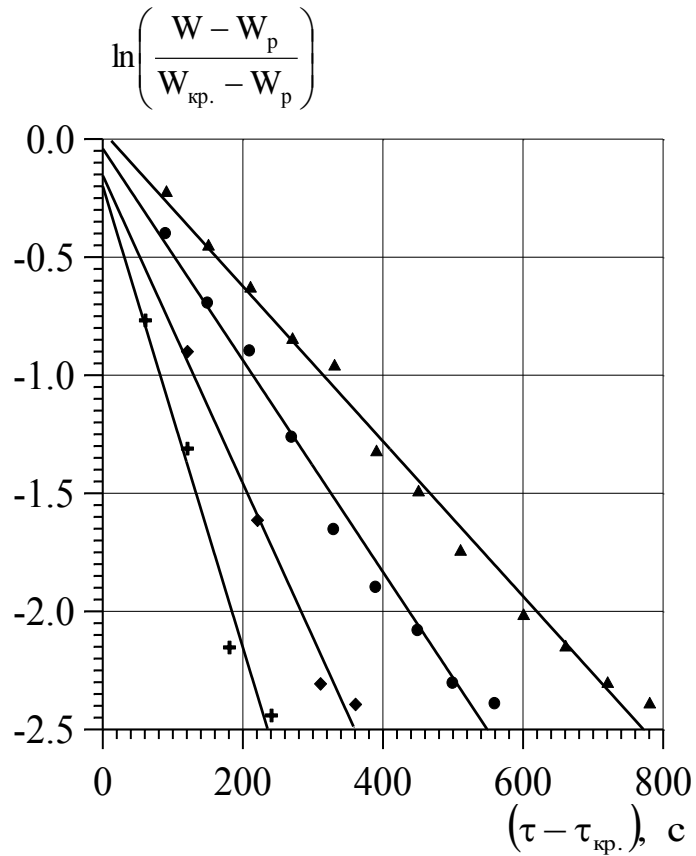


Рис. 4.30. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($H=30$ мм, $t=100^{\circ}\text{C}$):

▲ – $\Delta P = 16000$ Па; ● – $\Delta P = 20000$ Па; ◆ – $\Delta P = 25000$ Па; + – $\Delta P = 35000$ Па

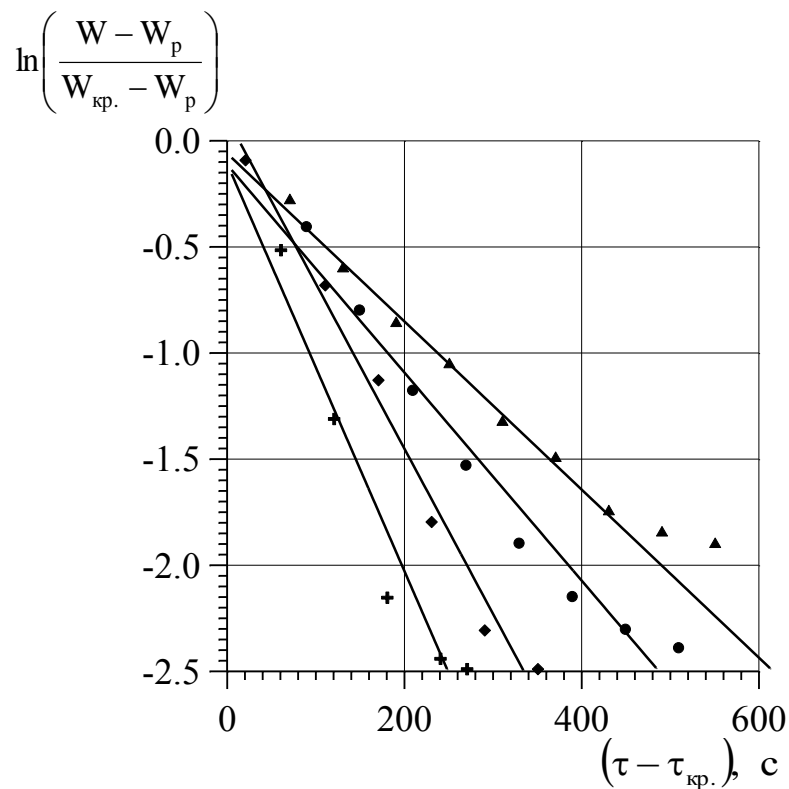


Рис. 4.31. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($t=100^{\circ}\text{C}$, $\Delta P = 35000$ Па):

▲ – $H = 60$ мм, ● – $H = 50$ мм, ◆ – $H = 40$ мм, + – $H = 30$ мм

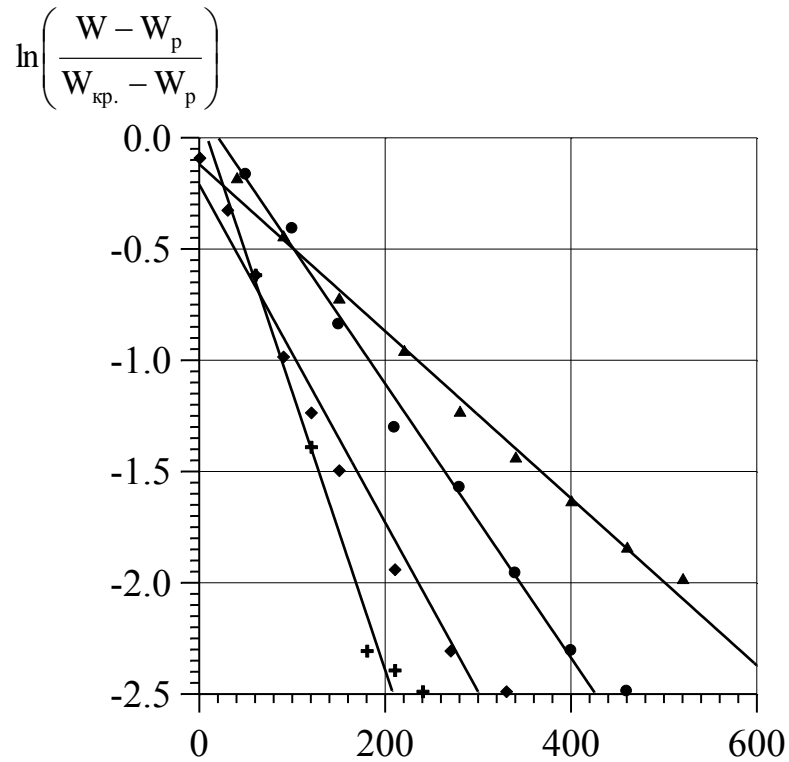


Рис. 4.32. Визначення коефіцієнту сушіння K ($\Delta P = 35000 \text{ Па}$; $H = 30 \text{ мм}$):

▲ – $t = 40 \text{ }^\circ\text{C}$, ● – $t = 60 \text{ }^\circ\text{C}$, ◆ – $t = 80 \text{ }^\circ\text{C}$, + – $t = 100 \text{ }^\circ\text{C}$

Значення коефіцієнтів сушіння K та швидкостей сушіння у періоді повного насичення теплового агенту вологою N подані у табл. 4.5.

Таблица 4.5.

Залежність K і N від параметрів процесу сушіння та висоти шару матеріалу

$N \cdot 10^4, \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$	$K \cdot 10^3, \frac{1}{\text{с}}$	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	$H \cdot 10^3, \text{ м}$	$\Delta P, \text{ Па}$
9,89	9,77	100	30	35000
7,65	6,52			25000
5,97	4,48			20000
3,73	3,28			16000
10,24	9,78	100	30	35000
7,68	7,59	80		
5,5	6,16	60		

4,2	3,75	40	
4,37	4,1	100	60
5,69	4,9		50
7,41	7,78		40
9,89	9,6		30

Швидкість сушіння N у періоді повного насичення теплового агента вологою під час сушіння залізоокисного пігменту визначали за залежністю (4.30).

Відносний коефіцієнт сушіння χ є величиною сталою для досліджуваного матеріалу і його числове значення дає змогу розрахувати час сушіння залізоокисного пігменту, а також визначити параметри для здійснення фільтраційного процесу сушіння. Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ , результати представляли у вигляді графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.33) і значення коефіцієнту визначали за тангенсом кута нахилу прямої.

$$K \cdot 10^3, 1/c$$

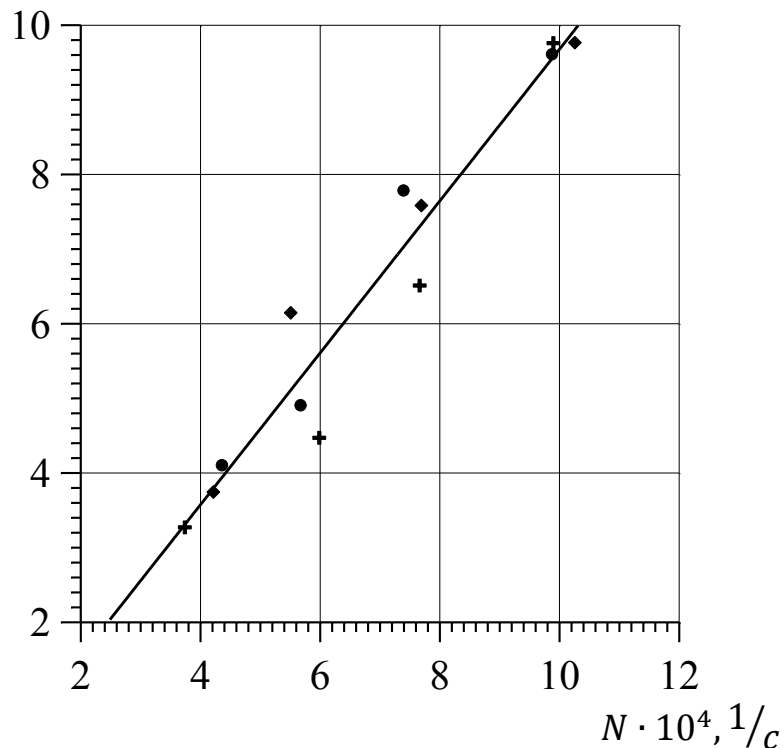


Рис. 4.33. Залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N .

З рис. 4.33 визначений відносний коефіцієнт сушіння χ , який для залізоокисного пігменту є рівним $\chi = 10,2$ кг/кг. Виходячи з рівняння (4.29) та враховуючи із значення χ , виведена залежність для розрахунку зміни вологовмісту залізоокисного пігменту в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,2 \cdot N \cdot (\tau - \tau_{кр})} + W_p \quad (4.37)$$

Із врахуванням залежності (4.32), залежність (4.37) для розрахунку зміни вологовмісту залізоокисного пігменту в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою можна записати у вигляді:

$$W = (W_{кр} - W_p) \cdot e^{-10,2 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{кр}}{N})} + W_p \quad (4.38)$$

Органічні відходи виробництва пігментного Ti(IV) оксиду

Дослідження зміни вологості органічних відходів виробництва пігментного Ti(IV) оксиду (відпрацьованого деревного борошна) в часі за різних висот шару вологого матеріалу, температур теплового агенту, а також перепадів тиску по сухому матеріалові здійснені на експериментальній установці, зображеній на рис. 4.12 згідно з методикою, описаною в другому розділі. Результати досліджень представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.34 - 4.36.

Високе значення початкового вологовмісту відпрацьованого деревного борошна 8 кг H₂O/кг сух. мат. зумовлене наявністю внутрішньої вологи в порах частинок матеріалу, поверхневої вологи частинок та вільної вологи, яка утримується силами поверхневого натягу в порах і каналах між частинками.

Загалом, вологовміст відпрацьованого деревного борошна в результаті сушіння змінюється від 8 до 0,01 кг H_2O /кг сух. мат.

Результати досліджень впливу висоти шару відпрацьованого деревного борошна у діапазоні зміни від 30 до 60 мм на час сушіння (за однакової температури та швидкості фільтрування теплового агенту) представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.34, з яких видно, що зростання висоти шару приводить до збільшення тривалості сушіння, оскільки кількість води, що міститься в шарі і яку необхідно видалити збільшується, а також збільшується шлях переміщення фронту масообміну до перфорованої перегородки.

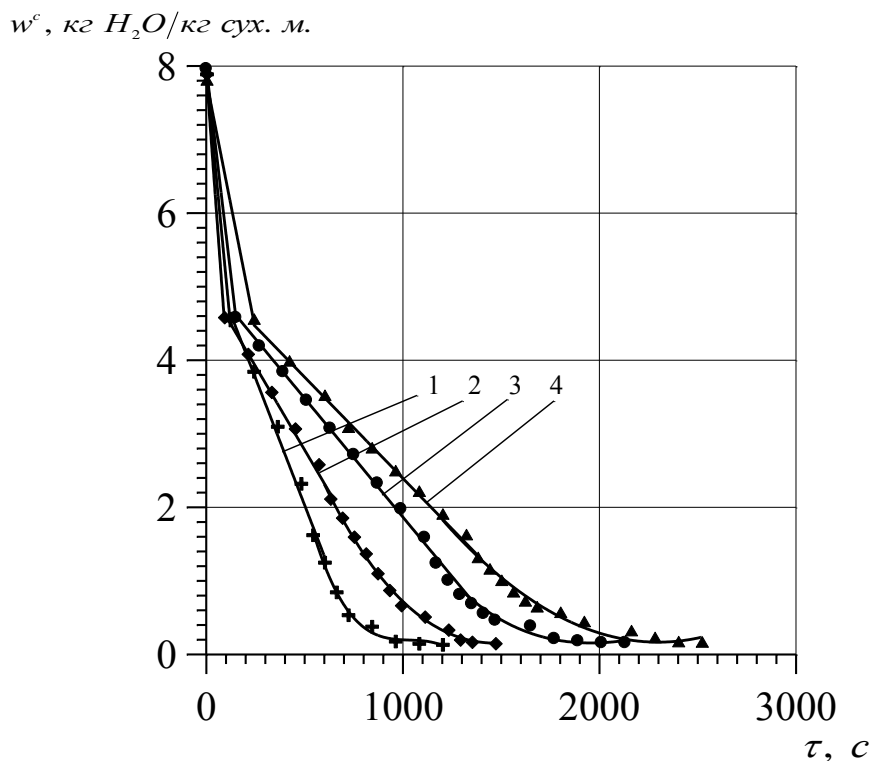


Рис. 4.34. Кінетичні криві сушіння відпрацьованого деревного борошна за різних висот шару матеріалу ($\Delta P_c = 6000$ Па, $t = 100$ °С):

1 – $H = 30$ мм, 2 – $H = 40$ мм, 3 – $H = 50$ мм, 4 – $H = 60$ мм

Результати досліджень впливу температури теплового агенту на тривалість процесу фільтраційного сушіння відпрацьованого деревного борошна представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.35. Скорочення тривалості сушіння за збільшення температури теплового агенту

пояснюється зростанням сушильного потенціалу останнього, а також зростанням коефіцієнту внутрішньої дифузії вологи із частин матеріалу.

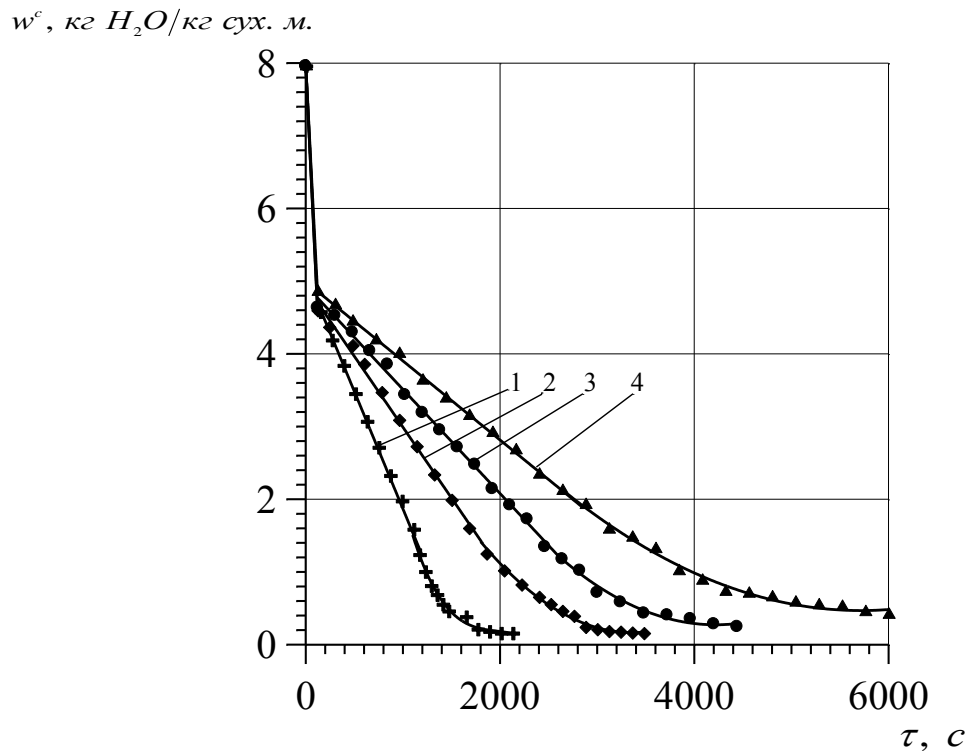


Рис. 4.35. Кінетичні криві сушіння відпрацьованого деревного борошна за різних температур теплового агенту ($\Delta P_c = 6000$ Па, $H = 50$ мм):

1 – $t=100$ °С, 2 – $t=80$ °С, 3 – $t=60$ °С, 4 – $t=40$ °С

Результати досліджень впливу перепадів тисків по сухому матеріалові (як результат - швидкості фільтрування теплового агенту) на процес фільтраційного сушіння відпрацьованого деревного борошна представлені у вигляді графічних залежностей на рис. 4.36. Збільшення перепаду тисків (за однакової висоти шару і температури теплового агенту) приводить до скорочення тривалості сушіння, оскільки збільшується кількість внесеної теплоти в пористий шар матеріалу за одиницю часу, що приводить до інтенсифікації процесу внаслідок зростання коефіцієнтів тепло- і масовіддачі між тепловим агентом та частинками матеріалу.

w^e , кг H_2O /кг сух. м.

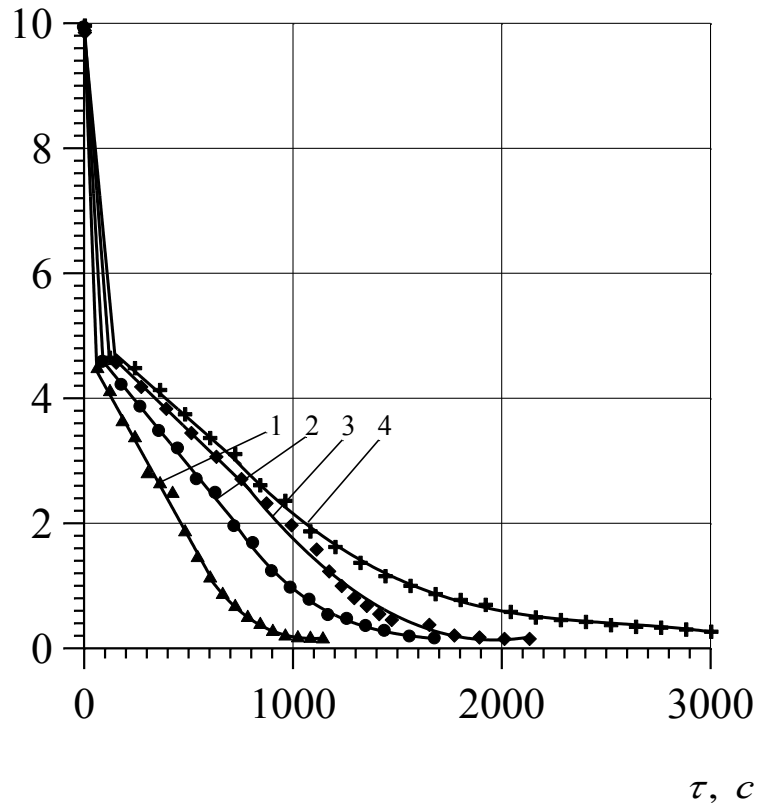


Рис. 4.36. Кінетичні криві сушіння відпрацьованого деревного борошна за різних перепадів тисків по сухому матеріалові ($t = 100\text{ }^{\circ}\text{C}$, $H = 50\text{ мм}$):
1 – $\Delta P = 9000\text{ Па}$, 2 – $\Delta P = 7000\text{ Па}$, 3 – $\Delta P = 6000\text{ Па}$, 4 – $\Delta P = 5000\text{ Па}$

Як видно з представлених графічних залежностей (рис. 4.34 - 4.36), для відпрацьованого деревного борошна є наявним період механічного витіснення та винесення вологи з стаціонарного шару, що забезпечуватиме зменшення енергозатрат на реалізацію процесу сушіння. У вказаний період рухомим тепловим агентом видаляється волога, яка втримується частинками матеріалу та міститься у проміжках між ними.

Для визначення критичного вологовмісту відпрацьованого деревного борошна і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння, дані представлені у координатах $\lg(W - W_p) = f(\tau)$ (рис. 4.37 - 4.39).

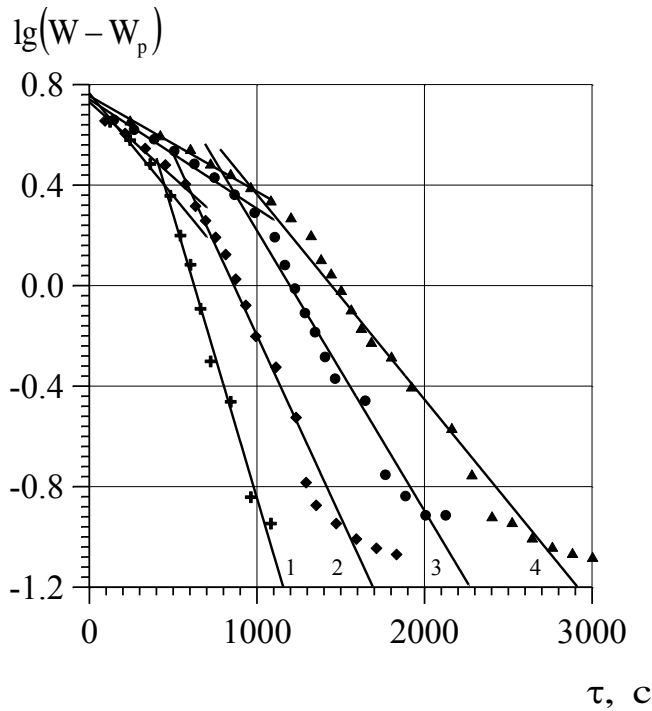


Рис. 4.37. Визначення критичного вологовмісту і часу його досягнення ($t=100^{\circ}\text{C}$, $\Delta P_c = 6000\text{Па}$):
1 – $H = 30\text{ мм}$, 2 – $H = 40\text{ мм}$,
3 – $H = 50\text{ мм}$, 4 – $H = 60\text{ мм}$

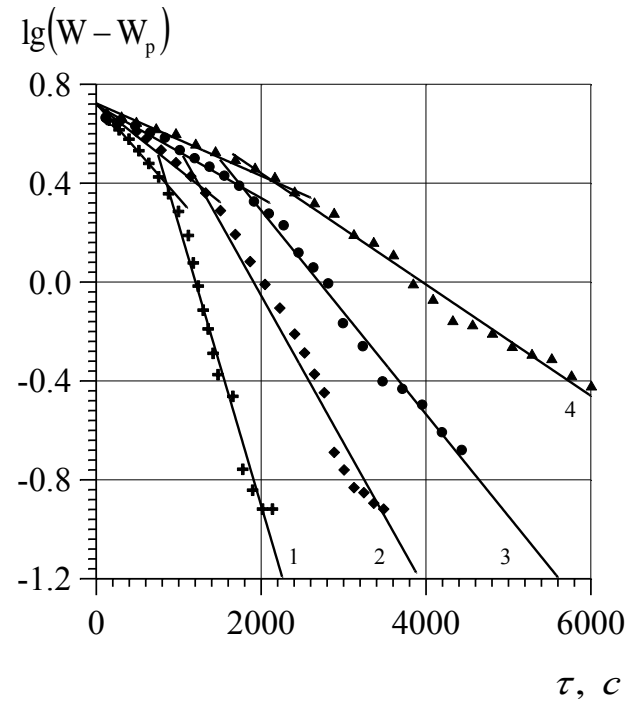


Рис. 4.38. Визначення критичного вологовмісту і часу його досягнення ($\Delta P_c = 6000\text{Па}$; $H = 50\text{ мм}$):
1 – $t = 100^{\circ}\text{C}$, 2 – $t = 80^{\circ}\text{C}$,
3 – $t = 60^{\circ}\text{C}$, 4 – $t = 40^{\circ}\text{C}$

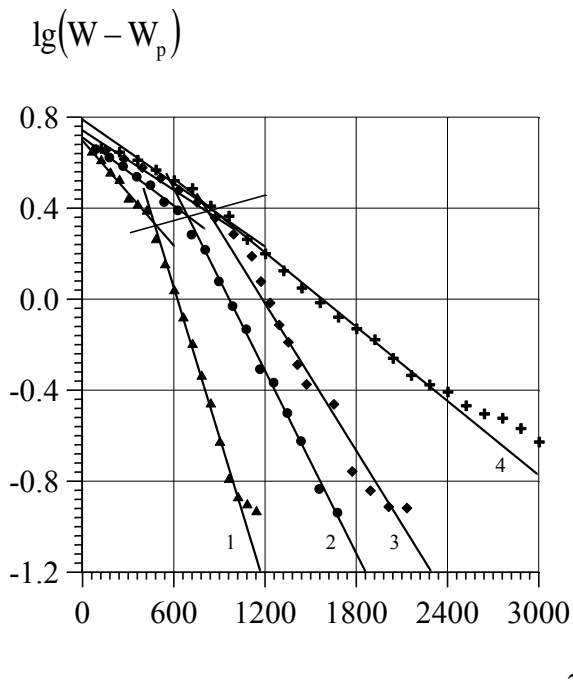


Рис. 4.39. Визначення критичного вологовмісту відпрацьованого деревного борошна і часу його досягнення під час реалізації фільтраційного сушіння. ($t = 100^{\circ}\text{C}$, $H = 50\text{ мм}$):
1 – $\Delta P_c = 9000\text{ Па}$, 2 – $\Delta P_c = 7000\text{ Па}$, 3 –
 $\Delta P_c = 6000\text{ Па}$, 4 – $\Delta P_c = 5000\text{ Па}$

Представлені на рис. 4.37 - 4.39 графічні залежності дали змогу визначити значення критичного вологовмісту згідно із залежністю (1.13), значення яких представлені в табл. 4.6.

Значення $\tau_{кр}$ із зростанням висоти шару матеріалу від $H=30 \cdot 10^{-3}$ м до $H=600 \cdot 10^{-3}$ м зростає (рис. 4.37). За збільшення температури теплового агенту від $t=40$ до $t=100^{\circ}\text{C}$ (рис. 4.38) та перепаду тисків від $\Delta P_c=5000$ Па, до $\Delta P_c = 9000$ Па (рис. 4.39) значення $\tau_{кр}$ зменшуються. Результати визначення часу досягнення критичного вологовмісту $\tau_{кр}$ під час реалізації фільтраційного сушіння деревного борошна представлені у табл. 4.6.

Таблиця 4.6.

Час досягнення критичного вологовмісту та критичний вологовміст відпрацьованого деревного борошна

H = 50 · 10 ⁻³ м, ΔP=6000 Па			H = 50 · 10 ⁻³ м, T = 100 ⁰ С			T = 100 ⁰ С, ΔP=6000 Па		
t, °С	τ _{кр} , с	W _{кр} , кгН ₂ О/кг г сух.м.	ΔP, Па	τ _{кр} , с	W _{кр} , кгН ₂ О/кг сух.м.	H · 10 ³ , м	τ _{кр} , с	W _{кр} , кгН ₂ О/кг сух.м.
100	840	2,38	9000	480	2,13	30	480	2,38
80	1250	2,38	7000	700	2,33	40	600	2,38
60	1800	2,38	6000	840	2,38	50	840	2,38
40	2200	2,38	5000	900	2,52	60	990	2,38

Для опису кінетики процесу сушіння відпрацьованого деревного борошна за допомогою рівняння (4.14), необхідними є значення кінетичних коефіцієнтів α і a , які визначаються із експериментальних даних, шляхом побудови графічної залежності $\ln\left(\left(1-\frac{W}{W_0}\right)/\tau\right) = f(H)$. Експериментальні дані можна узагальнити прямою лінією (рис. 4.40).

$$\ln \left(\frac{1 - \frac{W}{W_0}}{\tau} \right)$$

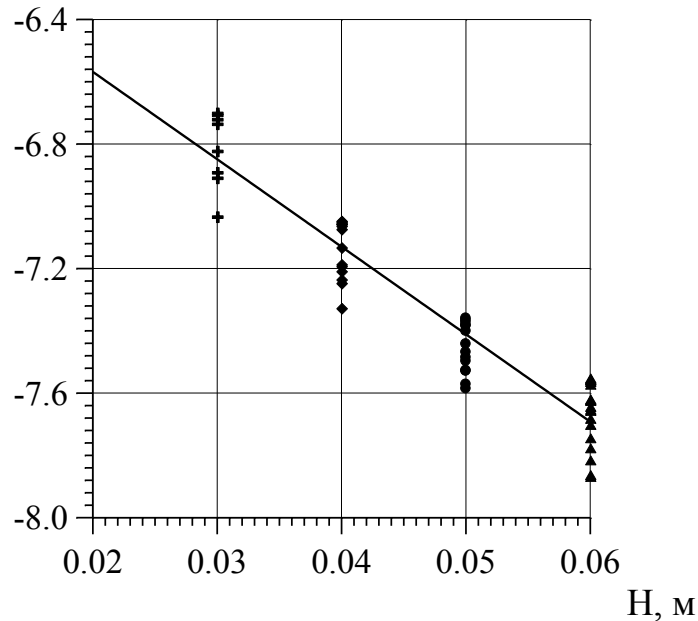


Рис. 4.40. Визначення коефіцієнтів α і a .

З наведеної графічної залежності (рис. 4.40), величина $\ln(\alpha) = -6$, звідки значення коефіцієнта $\alpha = 2,48 \cdot 10^{-3}$ 1/с. За тангенсом кута нахилу прямої до осі абсцис визначене значення кінетичного коефіцієнта $a = 28,1 \frac{1}{\text{м}}$.

Враховуючи те, що α є функцією температури теплового агента та гідравлічного опору сухого матеріалу, залежність кінетичного коефіцієнта α від параметрів процесу може бути представлена:

$$\alpha = A \cdot \Delta p_c^n \cdot t^m \quad (4.39)$$

Для знаходження коефіцієнтів A , n , m складемо систему з трьох рівнянь, розв'язок якої дасть можливість знайти невідомі коефіцієнти:

$$\begin{cases} \alpha_1 = A \cdot \Delta p_1^n \cdot t_1^m \\ \alpha_2 = A \cdot \Delta p_2^n \cdot t_2^m \\ \alpha_3 = A \cdot \Delta p_3^n \cdot t_3^m \end{cases} \quad (4.40)$$

Кожне рівняння відповідає наступним параметрам сушіння:

- шар висотою $H=50 \cdot 10^{-3}$ м,
- температура теплового агента в межах $40 - 100$ °С;
- перепад тисків по сухому матеріалові в межах $5000 - 9000$ Па.

Розраховані значення α , згідно рівняння (4.21), є в межах похибки $\pm 5\%$ від визначеного графічним методом з рис. 4.40 коефіцієнта ($\alpha = 2,48 \cdot 10^{-3}$ 1/с).

Розв'язавши систему рівнянь (4.35), отримаємо значення коефіцієнтів $A=5,13 \cdot 10^{-4}$; $n = 0,22$; $m=0,03$. Отже, кінетичне рівняння, яке дає змогу прогнозувати фільтраційне сушіння відпрацьованого деревного борошна в періоді повного насичення теплового агента вологою в діапазоні висот $30 \cdot 10^{-3} - 60 \cdot 10^{-3}$ м, температур теплового агента $40 - 100$ °С, перепадів тисків по сухому матеріалу $5000 - 9000$ Па можна представити у вигляді:

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 5.13 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p_c^{0.22} \cdot t^{0.03} \cdot \tau \cdot e^{-28.1 \cdot H} \quad (4.41)$$

Узагальнення результатів дослідження для періоду часткового насичення теплового агента вологою під час сушіння відпрацьованого деревного борошна проведене на основі рівнянь (4.25) – (4.28).

Експериментальні значення представляли у координатах $\ln \frac{W - W_p}{W_{кр} - W_p} = f(\tau - \tau_{кр})$

(рис. 4.41 – 4.43) і за тангенсом кута нахилу прямих визначали значення коефіцієнту сушіння K .

$$\ln \left(\frac{W - W_p}{W_{кр.} - W_p} \right)$$

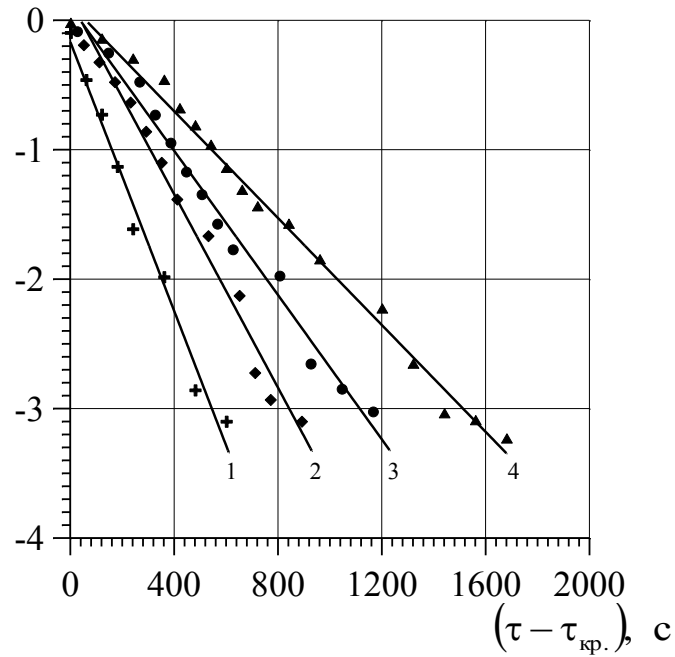


Рис. 4.41. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($t=100^{\circ}\text{C}$, $\Delta P_c = 6000\text{Па}$):

1 – $H = 30$ мм, 2 – $H = 40$ мм, 3 – $H = 50$ мм, 4 – $H = 60$ мм

$$\ln \left(\frac{W - W_p}{W_{кр.} - W_p} \right)$$

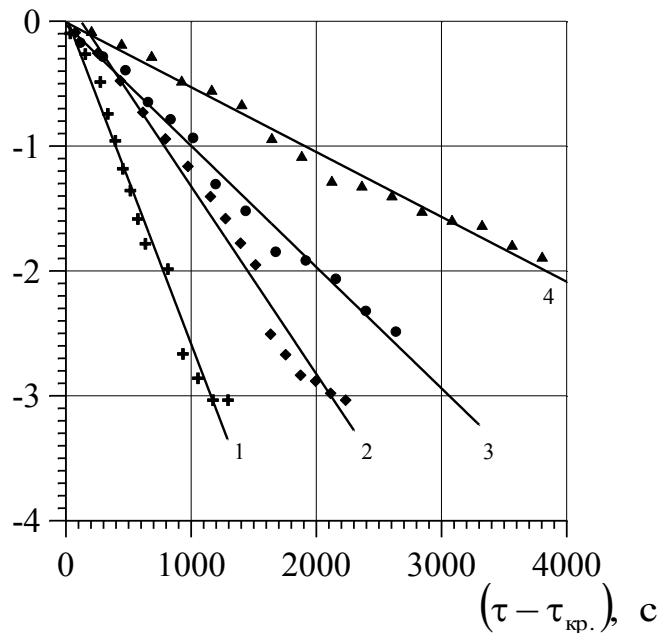


Рис. 4.42. Визначення коефіцієнту сушіння K ($\Delta P_c = 6000\text{Па}$; $H = 50$

мм):

1 – $t = 100^{\circ}\text{C}$, 2 – $t = 80^{\circ}\text{C}$, 3 – $t = 60^{\circ}\text{C}$, 4 – $t = 40^{\circ}\text{C}$

$$\ln \left(\frac{W - W_p}{W_{кр.} - W_p} \right)$$

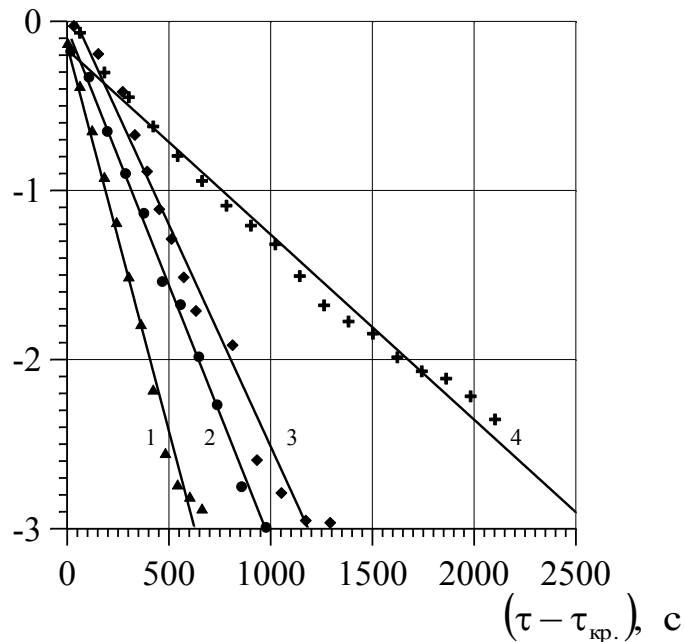


Рис. 4.43. Визначення коефіцієнту сушіння K : ($H=50$ мм, $t=100^{\circ}\text{C}$):

1 – $\Delta P_c=9000$ Па, 2 – $\Delta P_c=7000$ Па, 3 – $\Delta P_c=6000$ Па, 4 – $\Delta P_c = 5000$ Па

Значення коефіцієнтів сушіння K та швидкостей сушіння N у періоді повного насичення теплового агенту вологою, визначених за залежністю (4.30), представлені у табл. 4.7.

Таблиця 4.7.

Залежність K і N від параметрів процесу сушіння та висоти шару матеріалу

$N \cdot 10^3, \frac{\text{кг}}{\text{кг} \cdot \text{с}}$	$K \cdot 10^3, \frac{1}{\text{с}}$	$t, ^{\circ}\text{C}$	$H \cdot 10^3, \text{м}$	$\Delta P, \text{Па}$
6,04	4,56	100	50	9000
4,07	3,04			7000
3,23	2,63			6000
2,93	1,09			5000
3,23	2,63	100	50	6000
1,95	1,50	80		
1,43	0,097	60		
1,09	0,052	40		
2,75	2,06	100	60	6000
3,23	2,63		50	
4,55	3,74		40	
6,91	5,20		30	

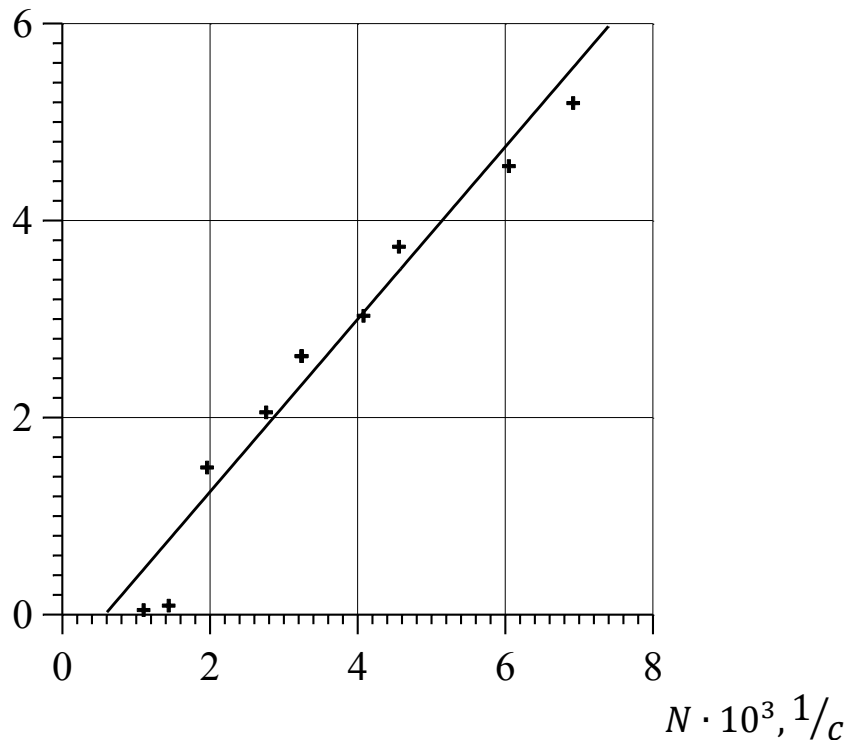
$K \cdot 10^3, 1/c$


Рис. 4.44. Залежність коефіцієнта сушіння K від швидкості сушіння N .

Для визначення відносного коефіцієнта сушіння χ , результати представляли у вигляді графічної залежності $K = f(N)$ (рис. 4.44) і значення коефіцієнту визначали за тангенсом кута нахилу прямої.

Визначений відносний коефіцієнт сушіння $\chi = 0,88 \text{ кг/кг } \chi$. Виходячи з рівняння (4.29) та враховуючи із значення χ , отримана залежність для розрахунку зміни вологовмісту відпрацьованого деревного борошна в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою:

$$W = (W_{kp} - W_p) \cdot e^{-0,88N \cdot (\tau - \tau_{kp})} + W_p \quad (4.42)$$

Із врахуванням залежності (4.32), залежність (4.42) можна записати у вигляді:

$$W = (W_{kp} - W_p) \cdot e^{-0,88N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{kp}}{N})} + W_p \quad (4.43)$$

Отже, запропонована розрахункова залежність (4.43) дає змогу розрахувати зміну вологовмісту відпрацьованого деревного борошна в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу фільтраційного сушіння для періоду часткового насичення теплового агента вологою.

Висновки до четвертого розділу

1. Розраховане значення теплового ефекту відповідає фазовому переходу шести молекул кристалізаційної води із зразка Ферум(II) сульфат гептагідрату у середовище теплового агента під час реалізації процесу дегідратації фільтраційним методом. Значення наведені у таблиці 4.3 можуть бути використані для доповнення відомостей щодо термодинамічних властивостей Ферум(II) сульфат гептагідрату в середовищі повітря, які є практично відсутніми.

2. Досліджено вплив швидкості руху теплового агента (в межах зміни фіктивних швидкостей від 1,16 м/с до 4,14 м/с) на хід процесу теплообміну.

Отримана розрахункова залежність $\alpha_{теор} = 8,8 \cdot 10^{-2} \cdot \left(\frac{v \cdot d_e}{\nu}\right)^{0,98} \cdot \left(\frac{\nu}{a}\right)^{0,33} \cdot \frac{\lambda}{d_e}$, що дає

змогу розрахувати значення коефіцієнтів тепловіддачі $\alpha_{теор}$ під час профільтрування теплового агента через стаціонарний шар Ферум(II) сульфат гептагідрату з достатньою точністю в межах значень числа Рейнольдса $20 \leq Re_e \leq 100$.

3. Досліджена кінетика видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату, залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна під час процесу зневоднення фільтраційним методом за різних швидкостей руху теплового агента (рис. 4.13, 4.23, 4.36), висот шару матеріалу (рис. 4.12, 4.22, 4.34) та температур, динаміка насичення теплового агента вологою та зміна температури теплового агента на виході із стаціонарного шару (рис. 4.24, 4.35).

4. Визначені значення критичного вологовмісту $W_{кр.} = 0,043$ кг H_2O /кг сух. мат (залізний купорос), $W_{кр.} = 0,22$ кг H_2O /кг сух. мат. (залізоокисний пігмент), а $W_{кр.}$ для деревного борошна змінне за різних перепадів тисків, тож відповідні значення внесені в табл.4.5.

5. На основі розв'язку системи диференційних рівнянь матеріального балансу в шарі та кінетики сушіння визначені кінетичні коефіцієнти для Феруму(II) сульфат гептагідрату $a = 15,75 \frac{1}{м}$, $\alpha = 3,03 \cdot 10^{-3}$ 1/с (рис. 4.18), для залізоокисного пігменту $a = 29,31 \frac{1}{м}$, $\alpha = 9,5 \cdot 10^{-3}$ 1/с (рис. 4.29), для відпрацьованого деревного борошна $a = 28,1 \frac{1}{м}$, $\alpha = 2,48 \cdot 10^{-3}$ 1/с (рис. 4.40).

6. Запропоновані розрахункові залежності кінетики сушіння, які прогнозують характер зміни вологовмісту матеріалу в часі в періоді повного насичення теплового агенту вологою.

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 6,5 \cdot 10^{-4} \Delta p_c^{0,2} \cdot \tau \cdot e^{-15,75 \cdot H} \quad (\text{залізний купорос});$$

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 0,008 \cdot \Delta p_c^{0,01} \cdot t^{0,03} \cdot \tau \cdot e^{-29,31 \cdot H} \quad (\text{залізоокисний пігмент})$$

$$\frac{W}{W_0} = 1 - 5,13 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta p_c^{0,22} \cdot t^{0,03} \cdot \tau \cdot e^{-28,1 \cdot H} \quad (\text{деревне борошно})$$

7. Визначені значення коефіцієнтів K , 1/с та швидкостей сушіння N , кг/кг·с для періоду повного насичення теплового агенту вологою, які представлені у табл. 4.2, 4.4, 4.6.

8. Запропоновані розрахункові залежності для визначення зміни вологовмісту Феруму(II) сульфат гептагідрату, залізоокисного пігменту та відпрацьованого деревного борошна в часі у широкому діапазоні зміни параметрів процесу фільтраційного сушіння для періоду часткового насичення теплового агенту вологою:

$$W = (W_{kp} - W_p) \cdot e^{-10,47 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{kp}}{N})} + W_p \text{ (залізний купорос);}$$

$$W = (W_{kp} - W_p) \cdot e^{-10,2 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{kp}}{N})} + W_p \text{ (залізоокисний пігмент)}$$

$$W = (W_{kp} - W_p) \cdot e^{-0,88 \cdot N \cdot (\tau - \frac{W_0 - W_{kp}}{N})} + W_p \text{ (деревне борошно)}$$

Основні результати опубліковані у працях[64, 65, 107, 133, 150, 151, 153]

РОЗДІЛ 5

КОНСТРУКТИВНЕ РІШЕННЯ ТА РОЗРАХУНОК УСТАНОВКИ ФІЛЬТРАЦІЙНОГО СУШІННЯ

5.1. Установа фільтраційного сушіння

Результати досліджень гідродинаміки і тепломасообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів дали змогу запропонувати установку для промислової реалізації сушіння, розробити методику теплового та конструктивного розрахунку обладнання, його ефективність, які забезпечують високу продуктивність процесу фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів та його широке застосування як в промисловості так і в народному господарстві.

Установки фільтраційного сушіння широко розповсюджені та запатентовані [155-160]. Зазвичай вони містять камеру для подачі сипкого матеріалу, для підводу теплового агента, засіб для транспортування висушеного матеріалу виготовлений у вигляді транспортеру, камеру розрідження і розвантажувальний бункер.

Однак інтенсивність сушіння сипких матеріалів на таких установках є невисокою, оскільки процес фільтраційного сушіння носить зональний характер [74, 154] і сипкий матеріал, який першим контактує із тепловим агентом висихає швидше, ніж нижні шари матеріалу і контактуючи із тепловим агентом він забирає частину теплової енергії, що призводить до збільшення часу сушіння нижніх шарів матеріалу. У випадку сушіння досліджуваних матеріалів важливим є рівномірність просушування, особливо у випадку сушіння залізного купоросу ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$), де видалення кристалізаційної води та її фільтрація крізь вологий шар матеріалу призводить до його розчинення та утворення грудочок, що в свою чергу також призводить до зростання часу сушіння та погіршення якості готового продукту.

Також широко розповсюдженими є сушарки з засобами для переміщення матеріалу [70]. Наприклад, гребкова вакуумна сушарка яка обертається навколо горизонтальної осі, містить барабан, що обігривається тепловим агентом із завантажувальним і розвантажувальним патрубками, а також вал з нахиленими лопатками для транспортування від завантажувального до розвантажувального патрубка матеріалу що висушується.

Недоліком такої сушарки є передача теплоти через стінку барабану, яка має відповідний термічний опір, що залежить від матеріалу з якого виготовлений барабан, а також додатковий термічний опір, що залежить від товщини вологого матеріалу, який налипає на поверхню барабану. Окрім цього, поверхнею теплообміну є поверхня з якою контактує матеріал. Залежно від коефіцієнту завантаження барабану поверхня теплообміну становить від 15 до 30% загальної поверхні барабану, що в свою чергу обмежує інтенсивність теплообміну і відповідно час висушування вологого матеріалу зростає.

Зважаючи на вище вказані недоліки, спроектована установка фільтраційного сушіння сипких матеріалів, у якій нове виконання сушильного барабану дає змогу забезпечити високу інтенсивність та рівномірність висушування вологого дисперсного матеріалу, виключити його пересушування, зменшити час висушування, і відповідно, енергетичні затрати на процес.

Для цього нижню частину корпусу виконуємо перфорованою, до якої під'єднано камеру розрідження, до якої під'єднано патрубок видалення теплового агенту, при цьому патрубок подачі теплового агенту під'єднано у верхній частині корпусу, а механізм перемішування і транспортування матеріалу виконаний у вигляді шнеку.

Виконання нижньої частини сушильного барабану перфорованим та під'єднання до неї камери розрідження забезпечує фільтрування теплового агенту крізь шар вологого дисперсного матеріалу, який перемішується шнеком. Фільтрування теплового агенту крізь шар вологого дисперсного матеріалу забезпечує максимально можливу поверхню висушування, яка визначається поверхнею всіх частинок дисперсного матеріалу, високими коефіцієнтами

тепломасообміну, що відповідно скорочує час сушіння та енергетичні затрати на процес, а інтенсивне перемішування волого дисперсного матеріалу забезпечує його рівномірне висушування і виключає його перегрівання.

На рис. 5.1 схематично зображена установка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, на рис. 5.2 показано її переріз А–А. Де 1 – корпус, 2 – шнек, 3 – редуктор, 4 – двигун, 5 – патрубок подачі теплового агента, 6 – камера розрідження, 7 – патрубок подачі волого матеріалу, 8 – патрубок вивантаження сухого матеріалу, 9 – патрубок відпрацьованого теплового агента, 10 – вентилятор.

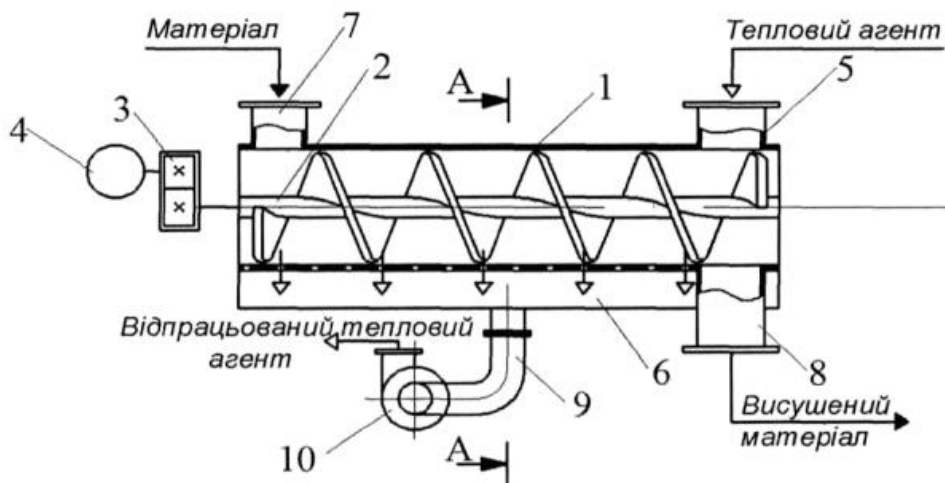


Рис. 5.1. Установка фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів

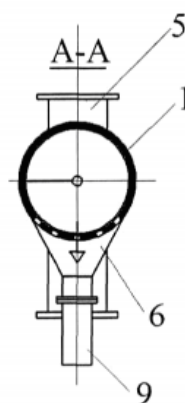


Рис. 5.2. Переріз А–А установки фільтраційного сушіння

Установка фільтраційного сушіння містить сушильний барабан 1, нижня частина якого виконана перфорованою, у якому розташований вал 2 з

нахиленими лопатками для транспортування і перемішування вологого дисперсного матеріалу, обертання валу забезпечує редуктор 3 і двигун 4, які жорстко з'єднані з валом 2, до барабану під'єднано патрубок для подачі теплового агента 5 і патрубок 9 для відведення відпрацьованого теплового агента, а також патрубок для подачі вологого дисперсного матеріалу 7. Фільтрування теплового агента крізь шар волого матеріалу забезпечує вентилятор 10, що під'єднаний патрубком 9 до камери розрідження 6. Вивантаження висушеного матеріалу здійснюється через патрубок 8, що під'єднаний до барабану 1.

Установка працює так: через патрубок 5 у зону сушіння барабану 1 подають тепловий агент. Включають вентилятор 10, який під'єднаний через патрубок 9 до камери розрідження 6, вмикають двигун 4, який через редуктор 3 передає обертання валу 2 з нахиленими лопатками. Через патрубок 7 падають у барабан 1 вологий залізний купорос. Внаслідок обертання валу 2 з нахиленими лопатками вологий матеріал перемішується та переміщується від патрубку 7 до патрубку 8, а створене розрідження у зоні сушіння вентилятором 10 забезпечує фільтрування теплового агента крізь вологий дисперсний матеріал і перфоровану поверхню барабану 1 та відповідно його висушування.

Внаслідок виконання нижньої частини сушильного барабану перфорованою забезпечується фільтрування теплового агента крізь вологий матеріал, що забезпечує максимально можливу поверхню висушування. Рівномірність висушування вологого дисперсного матеріалу забезпечується його перемішуванням під час транспортування від патрубку для подачі вологого і патрубку для вивантаження сухого матеріалу.

5.2. Методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів

Для розрахунку установки фільтраційного сушіння (рис. 5.1) необхідно:

1. визначити середні розміри частинок, початкову, критичну і кінцеву вологість, пористість частинок ε_{en} , пористість шару $\varepsilon_{ш}$, кількість зовнішньої і внутрішньої води, яку необхідно видалити, а також всі необхідні довідникові дані (уявну і насипну густину, питому поверхню, теплофізичні характеристики);
2. виходячи із особливостей дисперсного матеріалу задатися температурою і швидкістю фільтрування теплового агента;
3. задатися товщиною шару дисперсного матеріалу в межах 60 – 100 мм, залежно від початкової вологості матеріалу та необхідної продуктивності;
4. розрахувати час висушування стаціонарного шару, узагальнюючі результати експериментальних досліджень кінетики та тепломасообміну під час фільтраційного сушіння;
5. розраховувати сумарні енергетичні затрати на випаровування води, а саме: теплоту для нагрівання вологого матеріалу, теплоту для нагрівання повітря, теплоту на випаровування води, втрати в навколишнє середовище;
6. розрахувати шнек для перемішування та переміщення матеріалу, а саме: швидкість обертів шнеку, діаметр та довжину шнеку та діаметр та довжину барабана, потужність приводу гвинта шнека.
7. розрахувати середні втрати тиску в шарі вологого дисперсного матеріалу.

Розрахунок шнека

Швидкість фільтрування теплового агента і його температуру, а також швидкість обертання валу 2 визначають на основі теоретичних розрахунків

необхідного часу висушування або продуктивності, залежно від початкової та необхідної кінцевої вологості дисперсного матеріалу.

Розрахуємо шнек для переміщення залізного купоросу. Насипна густина $\rho_n = 902,75$ кг/м³. Продуктивність $Q = 1200$ кг/год.

Залізний купорос – вологий матеріал за групою абразивності є середньо абразивним (група С), за зернистістю – дрібнозернистий ($d_{\text{ч}}=0,77$ м).

Діаметр гвинта шнека D підбираємо найбільший зі стандартизованого ряду $D=800$ мм, тому, що такий шнек необхідний для перемішування та переміщення матеріалу, який підлягає сушінню. Час перебування вологого залізного купоросу в зоні сушіння має приблизно дорівнювати часу сушіння. Крок s гвинта – 800 мм, як для добре сипкого матеріалу.

Частоту обертів гвинта шнеку розрахуємо, згідно з рівнянням:

$$n = \frac{4 \cdot G}{\pi \cdot D^2 \cdot s \cdot \varphi \cdot \rho_n \cdot f \cdot E}, \quad (5.1.)$$

де G – продуктивність за вологим матеріалом; $G = 0,3$ кг/с;

D – діаметр гвинта, 0,8 м;

s – крок гвинта, 0,8 м;

φ – коефіцієнт заповнення барабану, 0,25 (для середньоабразивних матеріалів);

ρ_n – насипна густина матеріалу, 902,75 кг/м³;

f – коефіцієнт поперечного січення каналу, 0,25;

E – відношення кроку гвинта до діаметру гвинта, 0,8 (для абразивних матеріалів).

Отож, підставивши числові значення відомих величин, отримаємо частоту обертів гвинта:

$$n = 0.017 \text{ об / с} = 1 \text{ об / хв}$$

Виходячи з діаметра гвинта шнека (800 мм), вибираємо діаметр барабана 1 м, а довжину – 6м.

Розрахуємо потужність на валу гвинта:

$$N_0 = G \cdot (\omega \cdot L_2 + H) \cdot g + k \cdot q \cdot v \cdot L_2 \cdot g, \quad (5.2.)$$

де N_0 – потужність на валу гвинта, Вт;

L_Γ – горизонтальна проекція довжини гвинтового шнека, м;

H – висота підйому, м;

$\omega=2.5$ – коефіцієнт опору переміщення вантажу для середньоабразивних матеріалів;

$k = 0,2$ – коефіцієнт, що враховує характер переміщення гвинта;

q – погонна маса обертових частин конвеєра, кг/м;

v – осьова швидкість руху гвинта, м/с;

ω_β – коефіцієнт опору руху обертових частин конвеєра. Для підшипників ковзання $\omega_\beta = 0,16$;

Виходячи з того, що довжина барабана 6 м, довжина гвинтового шнека буде дорівнювати 5 м. Тоді горизонтальна проекція довжини гвинтового шнека (L_Γ , м) та висота підйому (H , м) становитимуть:

$$L_\Gamma = L \cos 5^\circ = 5 \cos 5^\circ = 4.981 \text{ м,}$$

$$H = L \sin 5^\circ = 5 \sin 5^\circ = 0.436 \text{ м.}$$

Погонна маса обертових частин конвеєра:

$$q = \rho_{\text{стали}} \cdot 0,785 \cdot D_{\text{ш}}^2 = 7800 \cdot 0,785 \cdot 0,8^2 = 3918 \text{ кг/м, []}$$

осьова швидкість руху гвинта

$$v = s \cdot n = 0.8 \cdot 0.017 = 0.014 \text{ м/с}$$

Отже, підставивши дані в рівняння 5.2., отримаємо:

$N_0 = 0,6$ – потужність на валу гвинта, кВт;

Потужність двигуна визначається: $N = K \cdot N_0 / \eta$,

де: k – коефіцієнт запасу потужності;

η – КПД привода (0,6–0,85).

Для приводів шнеків приймають $k = 1,4$.

Приймаємо $\eta = 0,85$;

Тоді потужність двигуна: $N = 0,6 \cdot 1,4 / 0,85 = 1.1$ кВт.

Параметри розрахованого барабану:

1. продуктивність– 1200 кг/год;
2. гвинт одноходовий;
3. тип підшипників – підшипники ковзання;
4. довжина шнеку – 5 м;
5. довжина барабану – 6 м
6. діаметр гвинта – 800 мм;
7. крок гвинта – 800 мм;
8. частота обертів гвинта – 1 об/хв;
9. осьова швидкість руху гвинта – 0,014 м/с;
10. висота підйому – 436 мм;
11. потужність на валу гвинта – 0,6 кВт;
12. необхідна потужність приводного двигуна – 1,1 кВт;
13. характер роботи конвеєра – цілодобово.

5.3. Економічна ефективність фільтраційного сушіння

Економічну ефективність фільтраційного сушіння залізного купоросу у барабані зі шнековим живильником у порівнянні з конвективним сушінням в обертовій барабанній сушарці, розрахуємо за однакової продуктивності по готовому продукту (1200 кг/год). Методика і вихідні дані для розрахунку наведені в додатку Д. Розрахунки проведені за допомогою програми Excel. Отримані результати представлені у вигляді таблиці 5.1 з метою їх порівняння. Звідси бачимо, що економія енергії від впровадження у виробництво установки фільтраційного сушіння залізного купоросу в барабані зі шнековим живильником замість традиційної барабанної сушарки становить 283,34 кВт·год.

Таблиця 5.1

**Порівняльна характеристика фільтраційної сушарки
із барабанною сушаркою для сушіння залізного купоросу**

Позначення	Барабанна сушарка	Фільтраційне сушіння зі шнековим живильником
$t_n, ^\circ C$	150	62
$t_k, ^\circ C$	50	35
$T_k, ^\circ C$	40	35
$X_k \text{ кг } H_2O / \text{ кг сух. пов.}$	0,033	0,04
$W, \text{ кг} / \text{ год}$	235	235
$L, \text{ кг} / \text{ с}$	2,563	2,011
$V, \text{ м}^3 / \text{ с}$	3,417	2,681
$Q_m, \text{ кВт}$	7,877	5,908
$Q_{m.a.}, \text{ кВт}$	334,871	84,887
$Q_{вun}, \text{ кВт}$	162,941	162,941
$Q_{доd}, \text{ кВт}$	1,71	1,71
$Q_{втр}, \text{ кВт}$	8,17	8,17
$D_{\bar{b}}, \text{ м}$	1,5	1
$L_{\bar{b}}, \text{ м}$	8	6
$n, \text{ об} / \text{ хв}$	1,882	1
$\alpha, \text{ градус}$	1	–
$N, \text{ кВт}$	54,958	1,1
$H, \text{ м}$	–	0,045
$G_{вен}, \text{ кг} / \text{ с}$	3,53	2,79
$v_0, \text{ м} / \text{ с}$	2,498	0,198
$\Delta P, \text{ Па}$	439,75	688,62
$N_{вен}, \text{ кВт}$	7,5	8,8
$Q_{\Sigma}, \text{ кВт} \cdot \text{ год}$	560,122	276,781
$\Delta Q_{\Sigma}, \text{ кВт} \cdot \text{ год}$		283,34

Аналогічні розрахунки проведені й для деревного борошна та залізоокисного пігменту (Дод. А). Економія енергії від впровадження у виробництво установки фільтраційного сушіння жовтого залізоокисного

пігменту в барабані зі шнековим живильником замість традиційної барабанної сушарки становить $191,87 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, а для деревного борошна $347,44 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Висновки до п'ятого розділу

1. На основі узагальнення теоретичних та експериментальних досліджень гідродинаміки, кінетики та динаміки теплообміну і масообміну розроблена принципова схема установки фільтраційного сушіння, яка захищена деклараційним патентом України на винахід.

2. Розроблена методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.

3. Економічний ефект впровадження установки фільтраційного сушіння залізного купоросу в барабані зі шнековим живильником становить $56,65 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, залізоокисного пігменту в барабані зі шнековим живильником замість традиційної барабанної сушарки становить $191,87 \text{ кВт}\cdot\text{год}$, а для деревного борошна $347,44 \text{ кВт}\cdot\text{год}$.

Основні результати опубліковані в [65, 160].

ОСНОВНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі наведено вирішення науково-прикладного завдання фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів з метою впровадження енергоощадних технологічних процесів. Дослідження гідромеханічних, теплових та масообмінних процесів дали змогу представити нові науковообґрунтовані результати в галузі процесів та обладнання хімічної технології. Розроблено та обґрунтовано рекомендації та висновки, які дають змогу моделювати процес фільтраційного сушіння під час розроблення нового високоефективного енергозберігаючого обладнання для зневоднення дисперсних матеріалів.

1. В результаті проведення критичного аналізу джерел літератури встановлено, що процес фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів потребує розвитку теоретичних аспектів шляхом експериментального дослідження гідродинаміки профільтровування теплового агенту крізь стаціонарний шар та встановлення впливу кінетики й динаміки на процес дегідратації Fe(II) сульфат гептагідрату та сушіння відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту.

2. Експериментально визначені фізико-механічні параметри стаціонарного шару Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту (табл. 3.3, 3.4 та 3.5).

3. Запропоновані розрахункові залежності (3.9)-(3.13), (3.16), (3.17), (3.19), (3.20) для опису гідродинаміки досліджуваних матеріалів, які дають змогу оцінити енергетичні затрати на реалізацію процесу фільтраційного сушіння.

4. Експериментально встановлені коефіцієнти тепловіддачі під час фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату залежно від швидкості руху теплового агенту й запропонована залежність (4.9) для їх розрахунку.

5. Експериментально досліджені кінетика та динаміка фільтраційного сушіння Fe(II) сульфат гептагідрату, відпрацьованого деревного борошна й залізоокисного пігменту за змінних параметрів теплового агенту та висоти шару матеріалу й запропоновані кінетичні рівняння, що описують зміну вологовмісту досліджуваних дисперсних матеріалів у періодах повного (4.14), (4.36), (4.41) та часткового насичення вологою теплового агенту (4.33), (4.38), (4.43).

6. Розроблена принципова схема сушильної установки, захищена патентом України №120178 та методика розрахунку її основних конструктивних розмірів, що підкріплена патентом України на винахід.

7. Результати дисертаційної роботи передані для впровадження на ДП «Аргентум» та ТЗОВ «Галвесттрейд».

Список використаних джерел

1. Атаманюк В. М. Наукові основи фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів: монографія / Атаманюк В. М., Гумницький Я. М. - Львів, 2013. - 255 с.
2. Бурдо О. Г. Эволюция сушильных установок: монография /Бурдо О.Г.-Одесса, 2010. - 368 с.
3. Сажин Б.С. Научные основы техники сушки / Б.С. Сажин, В.Б. Сажин. – М.: Наука, 1997. – 448 с.
4. Лурье М.Ю. Сушильное дело. М, 1938, 384 с.
5. Лыков А.В. Теория тепло- и массопереноса / А.В. Лыков, Ю.А. Михайлов.–Москва, 1963. – 353 с.
6. Лыков А.В. Теория сушки /Лыков А.В. - Москва, 1968. – 472 с.
7. Лыков М.В. Сушка в химической промышленности/ Лыков М.В. Москва, 1970, - 430 с.
8. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. Москва, 1962, - 320 с.
9. Гинзбург А.С. Определение коэффициентов диффузии влаги в зернистых материалах / А.С. Гинзбург, В.П. Дубровский // ИФЖ. –1963. – Т.6, №10. – С. 27-31.
10. Сажин Б.С. Основы техники сушки / Б.С. Сажин.– М.: Химия, 1984. – 320 с.
11. Сажин Б.С. Определение предельных значений показателя полидисперсности безуносного кипящего слоя / Б.С. Сажин, Л.Б. Дмитриева, Д.Л. Ракушин //Успехи в химии и химической технологии: сб. науч. тр. – 2004. – Т. XVIII, №7(47). – С. 67-80.
12. Сажин В.Б. Новая классификация дисперсных материалов как объектов сушки / В.Б. Сажин, Б.С. Сажин, М.Б. Сажина // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная

обработка материалов): I Междунар. научно-практическая конференция, 25-31 мая 2002 г.: тезисы докл. – Москва, 2002. – Т. 3. – С. 74-78.

13. Атаманюк В.М. Класифікація дисперсних матеріалів, як об'єктів сушіння фільтраційним методом / В.М. Атаманюк, Я.М. Ханик // Хімічна промисловість України. – 2007. – №3. –С. 37-45.

14. Рудобашта С.П. Массоперенос в системах с твердой фазой / С.П. Рудобашта. – М.: Химия, 1980. – 248 с.

15. Рудобашта С.П. Математическое моделирование процесса сушки дисперсных материалов / С.П. Рудобашта // Инженерно-физический журнал. – 2010. – Т. 83, № 4. – С. 705-714.

16. Рудобашта С.П. Расчет кинетики сушки дисперсных материалов на основе аналитических методов / С.П. Рудобашта // Энергетика: Известия Академии наук. – 2000. – №4. –С. 98-109.

17. Рудобашта С.П. Роль гидродинамики потоков в непрерывно действующих сушилках с дисперсной твердой фазой / С.П. Рудобашта, В.М. Дмитриев // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. научно-практическая конференция, 11 – 14 октября 2005 г.: тезисы докл. – М., 2005. – Т. 1. – С. 51-58.

18. Devahastin S. A Concise History of Drying /Sakamon Devahastin, Maturada Jinorose / Drying Technologies for Biotechnology and Pharmaceutical Applications.-.2020.-P. 9-21. <https://doi.org/10.1002/9783527802104.ch2>

19. Kudra T. Advanced drying technologies / T. Kudra, A. S. Mujumdar. – Marcel Dekker Inc., 2002. – 459 p.

20. К.Н. Le. Discrete pore network modeling of superheated steam drying / К.Н. Le, A. Kharaghani, C. Kirsch, E. Tsotsas// Drying Technology.-.2017, № 35. – P.1584–1601.

21. Никитенко Н.И. Математическое моделирование динамики процесса обезвоживания слоя диспергированного коллоидного капиллярно-пористого материала / Н.И. Никитенко, Ю.Ф. Снежкин, Н.Н. Сороковая // Промышленная теплотехника. – 2006.– Т. 28, № 3.– С. 29-37.

22. Аксельруд Г.А. Математична модель процесу фільтраційного сушіння капілярно-пористих колоїдних матеріалів / Аксельруд Г.А., Ханик Я.М., Атаманюк В.М., Стрепко М.П. // Зб. наук. пр. Інституту технологічної кібернетики лісопромислового комплексу “Теорія та практика сушіння”. – 1993. – Т.1. – С. 105-121.

23. Аксельруд Г.А. Сушка матеріалів методом фільтрації сушильного агента / Г.А. Аксельруд, А.И. Чернявский, Я.Н. Ханьк // ИФЖ. – 1978. – Т.34, № 2. – С. 230-235.

24. Атаманюк В.М. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня докт. техн. наук: спец.05.17.08. “Процеси та обладнання хімічної технології” / В.М. Атаманюк. – Львів, 2007. – 38 с.

25. Мазяк З.Ю. Математична модель процесу зв'язаного тепломасообміну при конвективному висушуванні деревини / З.Ю. Мазяк, О.М. Креховецький // Наук. вісн. : зб. наук.-техн. пр. УкрДЛТУ. – 2001. – Вип.11.2. – С. 79-82.

26. Мазяк З.Ю. Математична модель процесу конвективного сушіння в шахтній сушарці при перехресному потоці сушильного агента і вологого матеріалу / З. Ю. Мазяк, І.М. Ільків, О. М. Креховецький // X Міжнар. конф. «Вдоскон. процесів та апаратів хім. та харч. виробництв» (ISSE - 99), 21-23 вересня 1999 р.: тези доповідей. – Л., 1999. – С. 84-85.

27. Соколовський Я.І. Моделювання деформаційно-релаксаційних процесів у висушуваній деревині методом скінченних елементів / Я.І. Соколовський, А.В. Бакалець // Вісник Національного університету "Львівська політехніка": Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – 2006. – № 565. – С. 51-57.

28. Математичне моделювання двовимірного в'язкопружного стану деревини у процесі сушіння / Я. Соколовський, М. Дендюк // Фіз.-мат. моделювання та інформ. технології. — 2008. — Вип. 7. — С. 69-78.

29. Соколовський Я. Алгоритмічне та програмне забезпечення системи моделювання та аналізу процесу сушіння капілярно-пористих матеріалів / Я. Соколовський, І. Крошний // Вісник Національного університету "Львівська політехніка". – 2012. – № 732 : Комп'ютерні науки та інформаційні технології. – С. 305-316.
30. Sokolovsky Y., Boretska I., Gayvas B. Mathematical modeling of moving boundaries of phase transition in the process of drying anisotropic plate // Journal of Engineering Research and Application. – 2018. – Vol. 8, iss. 12, pt. 1. – P. 57–63.
31. Defraeye T., Advanced computational modelling for drying processes / T. Defraeye – A review, Applied Energy. – 2014, №131. – P. 323–344.
32. Муштаев В.И. Сушка дисперсных материалов / В.И. Муштаев, В.М.Ульянов. – М.: Химия, 1988. – 352 с.
33. Prat. M. Recent advances in pore-scale models for drying of porous media/ Prat. M. //Chemical Engineering Journal, 2002/- № 86.- P.153–164.
34. Сафонов А.О. Тепломассоперенос и динамика сушки дисперсных материалов в барабанных сушилках / А.О. Сафонов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2002. – 239 с.
35. Білей П.В. Кінетика атмосферного сушіння пиломатеріалів / П.В. Білей, А.В. Полоз // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2003. – Вип. 13.1. – С. 100-102.
36. Білей П.В. Сучасні тенденції удосконалення обладнання для сушіння пиломатеріалів / П.В. Білей, Ж.Я. Гуменюк // Науковий вісник УкрДЛТУ. – 2004. – Вип. 14.4. – С. 100-104.
37. Снежкин Ю.Ф. Исследования влияния параметров сушки на кинетику и получение качественных, антиоксидантных функциональных порошков / Ю. Ф. Снежкин, Ж. А. Петрова, В. М. Пазюк // Промышленная теплотехника : Международный научно-прикладной журнал. – 2012. – № 5. – С. 31-36.

38. Снежкин Ю.Ф. Математична обробка експериментальних досліджень сушіння насінневого ріпаку методом багатofакторного експерименту / В. М. Пазюк, Ю. Ф. Снежкін, В. П. Янович // Збірник наукових праць Вінницького національного аграрного університету : Серія: Технічні науки. – 2010. – Вип. 4. – С. 30-34.

39. Склабинський В.И. Вихревые противоточные массообменные аппараты. Интенсификация массообмена / В.И. Склабинский, Хайят Мохаммед Н.К. Аль // Хімічна промисловість України. – 2010.– № 6.– С. 11-14.

40. Артюхова Н.О. Багатоступеневе сушіння дисперсних матеріалів у зваженому шарі в апаратах поличного типу / Н.О. Артюхова, М.П. Юхименко // Сучасні технології в промисловому виробництві : матеріали II Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, 17-20 квітня 2012 р.: тези доповідей.– Суми, 2012. – Ч.2. – С. 148-149.

41. Муштаев В.И. Сушка в условиях пневмотранспорта / В.И. Муштаев, В.М. Ульянов, А.С. Тимонин. – М.: Химия, 1984. – 232 с.

42. Поперечний, А.М. Аналіз основних режимів руху продукту при сушінні у відцентровому псевдозрідженому шарі / А.М. Поперечний, І.В. Жданов // Обладнання та технології харчових виробництв: темат. зб. наук. пр. ДонНУЕТ. –2007. – Вип. 17. – С. 44-53.

43. Liangzhi Xia. Experimental and numerical analysis of oil shale drying in fluidized bed / Hongchun Zhang, Baohe Wang, Caiyuan Yu, Xinxin Fan // *Drying Technology*, 35:7,802-814, 2017 DOI:[10.1080/07373937.2016.1218345](https://doi.org/10.1080/07373937.2016.1218345)

44. Ханик Я. М.. Кінетика конвективного та конвективно-кондуктивного сушіння метатитанової кислоти (МТК) /Я. М. Ханик, В. П. Дулеба // Науковий вісник НЛТУ України . 2006. №5. – С.107-114.

45. Surasani V.K. Consideration of heat transfer in pore network modelling of convective drying / V.K. Surasani, T. Metzger, E. Tsotsas // *International journal of heat and mass transfer.*- 2008, №51. – P. 2506–2518.

46. Корінчук Д. Обґрунтування енергоефективних режимів роботи рбгканної сушарки комплексу виробництва композиційного біопалива. /

Корінчук Д., Снежкін Ю., Бунецький. В. // Scientific Works. 2018. №82(1).
<https://doi.org/10.15673/swonaft.v82i1.1017>

47. Fanhui G. Occurrence modes of water in gasification fine slag filter cake and drying behavior analysis. / Fanhui Guo, Hu Liu, Yang Guo, Yixin Zhang, Jian Li, Xu Zhao, Jianjun Wu // A case study. Journal of Environmental Chemical Engineering.– 2021. №9(1), 104585. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104585>

48. Lin Y. Effects of farinfrared radiation on the freeze-drying of sweet potato / Lin Y., Tsen, J., King, V. Journal of Food Engineering, 2015, Т. 68, pp. 249–255.

49. Светлов Ю. В. Комбинированная радиационно-фильтрационная сушилка барабанного типа / Старосвитский О. И., Захарова А. А., Вишневецкая Т. О. // Кожевенно-обувная промышленность. – 2002. – № 4 – С. 43–44.

50. Антипов С. Т. Влияние значений напряженности электромагнитного поля на процесс диэлектрической сушки семян кориандра / Антипов С. Т. // Хранение и переработка сельхоз. сырья. – 2002. – №9. – С. 50–51.

51. J. Morera. Evaluation of the Energy Savings when using Vacuum Dryers with Total Thermal Energy Recovery in Tanneries / J. Morera, E. Bartoli, L. Cabeza and M. Medrano // J. Amer. Leather Chem. Assoc. – 2008. – V. 103. – P. 412–415.

52. Малезик І.Ф. Конвективно-высокочастотная сушка косточковых фруктов/І.Ф. Малезик, В.П. Тарлев, А.С. Лупашко // ИТМ. – Кишенэу, 2005. – 472 с.

53. Малезик І.Ф. Дослідження кінетики інфрачервоного сушіння яблучних вичавок / І.Ф. Малезик, Т.Є. Веселовська, Ю.П. Луцик та ін. / Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – Т.2, Вип.28. – С. 79-81.

54. Малезик І.Ф. Анализ обобщенных кривых сушки семян подсолнуха при различных методах энергоподвода / И.Ф. Малезик, М.П. Берник, Г.П. Ганя, Г. Осоян, А.С. Лупашко / Наукові праці ОНАХТ. – 2006. – Т.2, Вип.28.– С. 111-112.

55. N. Kanari. Utilization of a waste from titanium oxide industry for the synthesis of sodium ferrate by gas–solid reactions. / N. Kanari, I. Filippova, F. Diot, J. Mochón, I. Ruiz-Bustanza, E. Allain, J. Yvon // *Thermochimica Acta*, 2014. - №575, P. 219–225. doi:[10.1016/j.tca.2013.11.008](https://doi.org/10.1016/j.tca.2013.11.008)
56. Tsiura N. Recovery of wastes from titanium (IV) oxide production. / Tsiura N., Atamanyuk V., Pelekh M. // *Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин*. Львів, 5-7 листопада 2015 р., С. 84.
57. Guarini G.G.T. Heating rate and the dehydration of α -NiSO₄·6H₂O single crystals. / Guarini, G.G.T., Rustici, M. // *Journal of Thermal Analysis*/ - 1988. №34, 487–495. <https://doi.org/10.1007/BF01913189>
58. Низов В. А. Особенности обезвоживания кристаллогидратов в микроволновом поле на примере медного купороса / Низов В. А., Айсаутова К. А. // “Young Scientist” Chemistry. 2017. -№9 (143), С.111-112.
59. Straszko J. Kinetics of thermal decomposition of ZnSO₄·7H₂O. / Straszko J, Olszak-Humienik M., Możejko J. // *Thermochimica Acta*. -1997. №292(1–2), P.145–150. [https://doi.org/10.1016/S0040-6031\(96\)03114-0](https://doi.org/10.1016/S0040-6031(96)03114-0)
60. Rongtang L. Drying characteristics and kinetics analyses for Yimin lignite at various temperature / Rongtang Liu, Ming Liu, Xiaoqu Han , Junjie Yan // 2020. <https://doi.org/10.1080/07373937.2020.1729174>
61. Tong W. Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate / Tong Wang, Kenneth A. Debelak, John A. Roth // *Thermochimica Acta*.- 2007, №462 (1-2) P.89-93. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2007.07.001>
62. Glouannec P.. Experimental study of infrared-convective drying of hydrous ferrous sulphate. / P. Glouannec, P. Salagnac, H. Guézenoc, N. Allanic. // *Powder Technology*. – 2008. №187. P.280–288.
63. Кожухаров И. Х. Метод за интензификация на конвективното сушене на пигмент за жълта желязоокисна боя / И. Х. Кожухаров // Авт.св. НРБ, кл. F26 В3/34, №22640, заявл. 19.11.75, №31526, опубл. 15.09.79.
64. Цюра Н.Я. Особливості фільтраційного сушіння залізного купоросу /Г Н.Я., Атаманюк В.М., Цимбалістий О.В., Дулеба В.П. // Програма і

матеріали міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості». Київ, 8-10 листопада 2016 р., С. 50.

65. Цюра Н.Я. Сушіння залізного купоросу фільтраційним методом / Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. // Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». М.Львів, 14 вересня 2018 р., С. 84.

66. Kokta V.V. Использование древесной муки как наполнителя для полипропилена. Изучение механических свойств. / V.V. Kokta // Polym. Plast. Technol. Eng. – 1989. - Т.28. - №3. - С. 247-259.

67. Атаманюк В.М. Гідродинаміка та масообмін в процесі фільтраційного сушіння хімічного волокна : дис... канд. техн. наук: 05.17.08 / В. М. Атаманюк. – Л., 1995. – 168 с.

68. Атаманюк, В. М. Ефективність використання фільтраційного сушіння подрібненої “енергетичної” верби /Атаманюк, В. М., Мосюк, М. І., Ятчишин, Ю. Й. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення у сучасних технологіях. - 2011.-Вип. 5. – С.11–20.

69. Барна І. Р. Економічна ефективність установки фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію / Барна І. Р., Атаманюк В. М. // Захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування : збірник матеріалів 2-го Міжнародного конгресу (Львів, 19–22 вересня 2012 року). – Львів, 2012. – С. 100.

70. Госовський Р.Р. Закономірності фільтраційного сушіння органічної сировини для виготовлення альтернативного палива: автореф. дис. ...канд. тех. наук: 15.17.08 / Роман Романович серевський; [наук. керівник В.М. Атаманюк]; НУ «Львівська політехніка». - Львів, 2018. - 24 с.

71. Дулеба В.П. Фільтраційне сушіння осадженого пшениламідю: автореф. дис. ... канд. техн. наук : спец. 05.17.08. / Василь Павлович Дулеба;

[наук. керівник Я.М, Ханик]; НУ «Львівська політехніка». - Львів, 1997. - 17 с.

72. Мосюк М. І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої «енергетичної» верби в стаціонарному шарі [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.17.08. / М. І. Мосюк; [Національний університет «Львівська Політехніка» МОН України]. – Львів, 2012. – 22 с

73. <https://chem21.info/info/1877/> (дата звернення 21.01.2021).

74. Барна І. Р. Гідродинаміка і тепломасообмін під час фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію: автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології / Ірина Романівна Барна ; Національний університет "Львівська політехніка". - Львів, 2013. - 24 с.

75. Матківська І. Я. Механізм і кінетичні закономірності фільтраційного сушіння зерна пшениці : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук : 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика / Ірина Ярославівна Матківська ; Міністерство освіти і науки України, Національний університет “Львівська політехніка”. – Львів, 2015. – 22 с.

76. Цюра Н.Я. Гідродинамічні закономірності фільтраційного сушіння залізного купоросу / Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. // Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015», Миргород, 20-24 квітня 2015 р. С. 196-199.

77. Цюра Н.Я. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. / Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. // Збірник праць V міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса, 7-11 вересня 2015 р. С.-40.

78. Ханьк Я.Н. Гидродинамическое сопротивление плоских газопроницаемых материалов / Я.Н. Ханьк, В.И. Топчий, М.П. Стрелко // Прикладная химия. – 1991. – №1. – С. 107-110.

79. Ханьк Я.Н. Фильтрационная сушка плоских проницаемых материалов: дис... док. техн. наук: 05.17.08 / Ханьк Я.Н. –Л., 1992. – 426 с.

80. Светлов Ю.В. Интенсификация процесса сушки проницаемых тонколистовых материалов методом сквозного просасывания сушильного агента / Ю.В. Светлов, Т.О. Вишневская // Энергосбережение и водоподготовка. – 2001. – № 2. – С. 41-45.

81. Светлов Ю.В. Кинетика сушки и гидравлическое сопротивление однородных пакетов тканей при фильтрационном движении воздуха // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и тепловые процессы): II Междунар. научно-практическая конференция, 11 – 14 октября 2005 г.: тезисы докл. – М.: 2005. – Т. 1. – С. 367-370.

82. Светлов Ю.В. Интенсификация гидродинамических и тепловых процессов в аппаратах с турбулизаторами потока. Теория, эксперимент, методы расчета / Ю.В. Светлов. – М.: Энергоатомиздат, 2003. – 304 с.

83. Burdo O.G. The New Ways of Organization Heat Transfer in Food Industry Apparatuses / Burdo O.G., Terzsev S.G., Knuish A.I., Kovalenko E.A. // Proc. 5-th Int. Heat Pipes Sump. – Melbourne (Australia), – 1997. – pp. 7-14.

84. Burdo O.G. Energy-Saving Food Technologies on Heat Pipe Exchangers Basic / Burdo O.G., Terzsev S.G., Peretyaka S.N. // Proc. 9 th Int. Heat Pipe Conf. – Albukiersk. USA, – 1995. –V.1. pp. 219-224.

85. Atamanyuk, V. M. Гідродинаміка руху теплового агента під час фільтраційного сушіння *Miscánthus giganteus*. / Atamanyuk, V. M. , Mosyiuk, M. I., Grinchuk, Y. M., Babych A. M. // *Науковий вісник НЛТУ України*, 2018. №28(6), С. 84-88. <https://doi.org/10.15421/40280616>

86. Атаманюк В. М., Гузьова І. О., Патрій Н. І. Гідродинаміка сушіння кавового шламу // *Хімічна промисловість України*. – 2016. – № 2. – С. 12–17.

87. Атаманюк В. М. Теплообмін під час фільтраційного сушіння осадженого і гранульованого поліакриламідру / В. М. Атаманюк, М. С. Мальований, В. П. Дулеба // *Науковий вісник НЛТУ України* . 2010. №.- С.100-117.

88. Акулич А. В. Моделирование тепломассопереноса в капиллярно-пористых материалах / А. В. Акулич, Н. Н. Гринчик // ИФЖ. — 1998. — Т. 71, № 1. — С. 225-233.
89. Матківська І. Я. Тепломасообмін під час фільтраційного сушіння зерна пшениці / Матківська І. Я., Симак Д. М., Атаманюк В. М. // Хімічна промисловість України. 2013. № 2. С. 55–59.
90. Гухман А.А. Применение теории подобия к исследованию процессов тепло- и массообмена / А.А. Гухман. – М.:Высшая школа, 1974. – 328 с.
91. Сірко З.С. Зовнішній теплообмін у процесі конвективного сушіння пиломатеріалів. / Сірко З.С., Дерех О.І. // *Науковий вісник НЛТУ України*. – 2017.- Т27(6), С.117-120. <https://doi.org/10.15421/40270623>
92. Середюк, В. В. Обґрунтування режиму роботи обладнання для сушіння міцеліальної біомаси / В. В. Середюк, О. О. Чепелюк, О. М. Чепелюк // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2019. – Т. 25, № 6. – Р. 122–130.
93. Атаманюк В.М. Гидродинамика фильтрационной сушки зернистых материалов / В.М. Атаманюк, Я.Н. Ханик // Современные энергосберегающие тепловые технологии (сушка и термовлажностная обработка материалов): I Междунар. научно-практическая конференция, 25-31 мая 2002 г.: тезисы докл. – Москва, 2002. – Т. 4. – С. 148-152.
94. Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури : автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. “Процеси та обладнання хімічної технології” / І.О.Гузьова. – Львів, 2001. – 18 с.
95. Кіндзера Д.П. Сушіння паливних матеріалів різнодисперсного складу у щільному шарі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. “Процеси та обладнання хімічної технології” / Д.П. Кіндзера. – Львів, 2003. – 20 с.

96. Мосюк М.І. Гідродинаміка і тепломасообмін під час сушіння подрібненої "енергетичної" верби в стаціонарному шарі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / М.І. Мосюк. – Львів, 2012. – 22 с.

97. Ханик Я. М. Гідродинаміка руху теплоносія крізь шар сухого дисперсного матеріалу (органічних відходів виробництва TiO_2) / Ханик Я. М., Цюра Н. Я. // *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18.3. С. 160–162.

98. Цюра Н. Я., Атаманюк В. М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу / Цюра Н. Я., Атаманюк В. М. *Наукові праці*. Одеська національна академія харчових технологій. 2015. Вип. 47, т. 1. С. 153–159. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.373>.

99. Ханык Я.Н. Гидродинамика в процессе фильтрационной сушки крупнопористых материалов / Я.Н. Ханык, С.Н. Балабан, М.П. Стрепко // *Химическая технология*. – 1990. – №2 (170). – С. 47-50.

100. Римар Т.І. Сушіння глини у нерухомому шарі: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / Т.І. Римар. – Львів, 2008. – 19 с.

101. Ханык Я.Н. Гидродинамическое сопротивление плоских газопроницаемых материалов / Я.Н. Ханык, В.И. Топчий, М.П. Стрепко // *Прикладная химия*. –1991. –№ 1. –С. 107-110.

102. Білецька Л.З. Комбіноване фільтраційне сушіння листових капілярно–пористих колоїдних матеріалів: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / Л.З. Білецька. – Львів, 1996. – 18 с.

103. Дулеба В.П. Фільтраційне сушіння осадженого поліакриламідю: автореф. дис. на здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. "Процеси та обладнання хімічної технології" / В.П. Дулеба. – Львів, 1997. – 17 с.

104. Гузьова І.О. Гідродинаміка та тепло масообмін при фільтраційному сушінні матеріалів кристалічної та аморфної структури : автореф. дис. на

здобуття ступеня канд. техн. наук : спец. 05.17.08. “Процеси та обладнання хімічної технології” / І.О.Гузьова. – Львів, 2001. – 18 с.

105. Лейбензон, Л. С. Движение природных жидкостей и газов в пористой среде / Л. С. Лейбензон. – Москва : Государственное издательство техникотеоретической литературы, 1947. – 244 с.

106. Аксельруд Г.А. Сушка материалов методом фильтрации сушильного агента / Г.А. Аксельруд, А.И. Чернявский, Я.Н. Ханык // ИФЖ. – 1978. – Т.34, № 2. – С. 230-235.

107. Цюра Н.Я. Теплообмін під час фільтраційного сушіння залізного купоросу. // Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М, Госовський Р.Р. // *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique 05.02.2021, Париж, FRA.* <https://doi.org/10.36074/logos-05.02.2021.v3.07>.

108. Атаманюк В. М. Кінетика фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію / Атаманюк В. М., Барна І. Р., Симак Д. М. // *Восточно– Европейский журнал передовых технологий.* 2013. № 3(8). С. 13–17.

109. Атаманюк В. М., Барна І. Р., Симак Д. М. Кінетика фільтраційного сушіння сировинних матеріалів виробництва шлакового гравію. *Восточно– Европейский журнал передовых технологий.* 2013. № 3(8). С. 13–17.

110. Атаманюк В.М. Масовіддача у першому періоді фільтраційного сушіння дрібнодисперсних матеріалів /Д.М. Симак, В.М. Атаманюк // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий* // Харків: – 2011, – 6/6 (54), – С. 14-22.

111. Госовський Р.Р. Внутрішньодифузійне масоперенесення під час фільтраційного сушіння подрібненої паренхімної тканини стебел соняшника / Госовський Р.Р., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. // *Науковий вісник НЛТУ України,* 2017, №27(6), С.112-116. <https://doi.org/10.15421/40270622>

112. Стратегія титанової галузі України 2030. Інститут майбутнього <https://uifuture.org/reports/strategiya-tytanovoyi-galuzi-ukrayiny-2030> (дата звернення 21.01.2021).

113. Педько А.Б. Оцінка поточного стану й основних проблем розвитку титанової промисловості України / А.Б. Педько, Л.М. Губаренко, А.С. Волошина // Глобальні та національні проблеми економіки. 2018. – Вип.28. – С.287 – 291 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://global-national.in.ua/archive/23-2018/56.pdf>.

114. Барсукова А. В. Определение оптимальных условий технологии по переработке основного отхода титанового производства / А. В. Барсукова, С. В. Вакал, Э. А. Карпович // Известия МГТУ. – 2014. №2 (20).– С.97-101.

115. Барсукова А.В. Зниження техногенного навантаження на навколишнє середовище при утилізації залізного купоросу виробництва пігментного двоокису титану: дис. канд. тех. наук: 21.06.01 – екологічна безпека / Барсукова А.В.- Суми, 2017. 157 с.

116. Гелеш А.Б. Наукові засади та технології комплексної утилізації газоподібних і рідких відходів та енергії у виробництві титану(IV) оксиду. дис... докт. техн. наук.: 05.17.01 / Гелеш Андрій Богданович ; Держ. ВНЗ "Укр. держ. хім.-технол. ун-т". - Дніпро, 2016. - 345 с.

117. Круглова, Н. О. Утилізація шламів виробництва титанооксидних пігментів як засіб зниження техногенного навантаження на довкілля : дис. канд. техн. наук : 21. 06. 01 /Круглова Наталія Олександрівна – Шостка, 2014. – 160 с.

118. Н. О. Круглова., В. С. Екологічно безпечна технологія переробки шламів виробництва титанооксидних пігментів / Н. О. Круглова., В. С. Бахарев. // Екологічна безпека, 2015.- №2 (20).- С. 69-76.

119. Заречений В. Г. Утилізація залізовмісних відходів виробництва пігментного титану(IV) оксиду : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 21.06.01 "Екологічна безпека" [Текст] / Заречений Володимир Григорович – Львів, 2005. – 20 с.

120. Вплив активних мінеральних додатків на властивості композиційних цементів [Текст] / Х. С. Соболев, Т. Є. Марків, М. А. Саницький,

Г. В. Когуч. // 316 Вісник Національного університету Львівська політехніка". Хімія, технологія речовин та їх застосування". – 2003. – №488. – С. 274–278.

121. Доклад о применении железного купороса(II) гептагидрата производства ЗАО «Крымский ТИТАН» в производстве цементов для снижения содержания соединений Cr (VI) согласно требованиям Директивы Евросоюза 76/769/ЕЕС (Поправки №26 / ЗАО «Крымский ТИТАН», сульфат железа(II) гептагидрат. – Армянск, 2006. – 6с.

122. Плышевский, Ю. С. Использование железного купороса – отхода, образующегося в процессе получения диоксида титана и травления железа для получения сульфата калия и «железного» коагулянта [Текст] / Ю. С. Плышевский, К. В. Ткачов, Н. В. Гаркунов. // Техноген 98 : Тез. докл. 2-й выставки и науч.-техн. конф. по переработке техногенных образований. – Екатеринбург, 1998. – С. 110.

123. Иванов В. Г. Утилизация отходов сульфата железа / В. Г. Иванов. // Тезисы докладов конференции с международным участием "Сотрудничество для решения проблем отходов". – Харьков, 2004. – С. 162– 163.

124. Василенко І.А. Залізооксидні пігменти. / Василенко І.А., Півоваров О.А. Синтез, модифікування, використання у різних галузях науки і техніки: Монографія – Дніпропетровськ: Акцент ПП, 2016. – С.217.

125. Низов В. А. Особенности обезвоживания кристаллогидратов в микроволновом поле на примере медного купороса / Низов В. А., Айсаутова К. А. // Young Scientist №9 (143) . March 2017 P. 111-112.

126. Санников А. Н. Исследование некоторых процессов формирования окиси и гидроокиси железа (III) применительно к технологии получения железистоокисных пигментов / А. Н. Санников // Сборник 5-ой научно-технич. конф. Уральского политехн. Института. – 1976. – №. 3– С. 86 – 87.

127. Соколов В. И. Разработка непрерывного способа получения железистоокисного пигмента термич. гидролизом технического семиводного серноокислого железа(II) / В. И. Соколов, И. Д. Соколов // Сборник 5^{ой} науч.-технич. конф. Уральского политехн. Института. – 1976. – № 3. – С. 67.

128. Мараховська О. Ю. Застосування шламів виробництва титан діоксиду для отримання будівельних матеріалів / О. Ю. Мараховська, О. В. Павленко, Н. О. Круглова, Г. В. Платоненко // Вісник Сумського державного університету, серія технічні науки. № 4. 2011. С. 179-185.

129. Пат. 71114 Україна, МПК В28С 5/00 С04В 33/02 Спосіб виготовлення керамічних виробів з додаванням нейтралізованих відходів / Круглова Н. О., Мараховська О. Ю., Павленко О. В., Акуленко В. Л., Пепеляєв І. О., Пляцук Л. Д.; заявник та власник Шосткинський інститут Сумського державного університету. № w 2011 12125 подано 17.10.2011 ; опубл. 10.07.2012, Бюл. № 13.

130. Georgiou D. Treatment of cotton textile wastewater using lime and ferrous sulfate / A. Aivazidis, J. Hatiras, K. Gimouhopoulos // Water Research.- 2003. №37 (9), P.2248-2250, [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(02\)00481-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(02)00481-5)

131. M. Sahimi. Flow and transport in porous media and fractured rock: From classical methods to modern approaches/ M. Sahimi// 2nd rev. and enlarged ed. ed., Wiley-Vch Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, op. 2011.

132. P. Glouannec. Experimental study of infrared-convective drying of hydrous ferrous sulphate / P. Glouannec, P. Salagnac, H. Guézenoc, N. Allanic. Powder Technology. 2008. - №187, - P.80–288. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2008.03.007>

133. Лаптев В. Сушіння залізного купоросу фільтраційним способом / В.Лаптев, Н.Цюра, В.Атаманюк. Львівські хімічні читання: зб. наук. пр., 26-29 травня 2013 року. С19.

134. Zhang W. A. literature review of titanium metallurgical processes / Zhang W.; Zhu, Z.; Cheng, C.Y. // Hydrometallurgy.- 2011, №108, P.77–188.

135. Kanari N. Utilization of a waste from titanium oxide industry for the synthesis of sodium ferrate by gas-solid reactions / Kanari N., Philippova I., Diotri F., Mochón J., Ruiz-Bustanza I., Allain E., Yvon J. // Thermochim. Acta 2014, №575, P.219–225.

136. Huang P. A sustainable process to utilize ferrous sulfate waste from titanium oxide industry by reductive decomposition reaction with pyrite./ Huang P., Deng S., Zhang, Z., Wang X., Chen X., Yang X., Yang L. A. *Thermochim. Acta.* - 2015.- №620.-P18–27.

137. Kanari N. Recycling ferrous sulfate via super-oxidant synthesis / Kanari N., Evrard O., Neveux, N. // *Thermochim. Acta* 2001. - №53, P.32–33. <https://doi.org/10.1007/s11837-001-0191-8>

138. Сато С. Получение чистого гетита FeOOH / Сато Сиро, Эндо Мицуру // Япон. пат., кл. 15 F27, (С 01 G 49/06), №51-28079, заявл. 26.07.71, №46–55219, опубл. 17.08.76.

139. Суэёси Т. Получение α -FeOOH / Суэёси Тосинобу, Хитати Макусэру // Япон. заявка, кл.С 01 G 49/02, Н 01 F 1/10, №56-22638, заявл. 27.07.79, №54–96517. опубл. 3.03.81.

140. Соболь Х. С. Вплив активних мінеральних додатків на властивості композиційних цементів / Соболь Х. С., Марків Т. Є., Саницький М. А., Когуч Г. В. // Вісник НУЛП Хімія, технологія речовин та їх застосування”. – 2003. - №488, С.274–278.

141. Карев А.И. Вплив природи дисперсних органічних наповнювачів на фізико-механічні властивості композитів з вторинного поліпропілену. / Карев А. І., Данченко Ю. М. / Материалы II Междунар. науч.- технич. интернет-конф. «Ресурсосбережение и энергоэффективность инженерной инфраструктуры урбанизированных территорий и промышленных предприятий». – Х.: ХНУГХ им. А.Н. Бекетова, 2016 . – С. 104 – 107

142. Nan G.S. Композиция полипропилена и древесных волокон. Изучение морфологии композитов методом проникающей электронной микроскопии, совмещенной санализом рассеивания энергии X-лучей. / G.S. Nan, S. Saka, N. Shirashi // *Mokuzai Gakkashi.* – 1991. - Т.37. - №3. - С. 241-246.

143. Спиглазов А.В. Влияние размеров древесных частиц и степени наполнения на текучесть композиций с полипропиленом / А.В. Спиглазов // Пластические массы.– 2004. - №12. - С. 50-52. 7. Вольфсон С.И. Влияние

способа внедрения нанонаполнителя на свойства полимерных композиций / С.И. Вольфсон [и др.] // Вестник Казан. технол. ун-та. - 2011. -Т. 14, №. 14. - С. 186-189.

144. Penghui H. A sustainable process to utilize ferrous sulfate waste from titanium oxide industry by reductive decomposition reaction with pyrite / Penghui Huang, Shaogang Deng, Zhiye Zhang, Xinlong Wang, Xiaodong Chen, Xiushan Yang, Lin Yang // *Thermochimica Acta.* – 2015.- №620, P.18-27. <https://doi.org/10.1016/j.tca.2015.10.004>

145. Скомороха В. М. Виробництво двоокису титану пигментного сульфатним способом. / В.М. Скомороха, В.Г. Зареченний, Ы.П. воробйова, С.В. Вакал // Суми, 202. -204 ст.

146. Аэров М.Э. Аппараты со стационарным зернистым слоем. Гидравлические и тепловые основы работы./ Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Л.: Химия, 1979. -176 стр.

147. Егунов В.П. Введение в термический анализ / Егунов В. П.– Самара, 1992. – 270 с.

148. Кочубей В.В. Энтальпии плавления фуран-2-карбоновой и 3-(2-фурил)-2-пропеновой кислот./ Кочубей В.В., Собечко И.Б., Величковска Н.И., Прокоп Р.Т., Горак Ю.И., Ван-Чин-Сян Ю.Я. //XIV Международная конференция по термическому анализу. - Санкт – Петербург, 2013 г. – С. 312 – 315.

149. Tong W. Dehydration of iron(II) sulfate heptahydrate. / Tong W., Kenneth A. D. , John A. R. // *Thermochimica Acta.* – 2007. - №462.- P.89–93.

150. Цюра Н. Я. Кінетика сушіння жовтого залізоокисного пігменту / Цюра Н. Я., Ханик Я. М. // Наукові праці. Одеська національна академія харчових технологій. - 2007. Вип. 31, т. 1. С. 107–110.

151. Цюра Н. Я., Динаміка видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату під час процесу зневоднення фільтраційним методом / Цюра Н. Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В. М., Госовський Р.Р. // Науковий вісник НЛТУ України. - 2021. Т. 31, № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.36930/40310112>.

152. Ханик Я. М. Гідродинаміка сухого дисперсного матеріалу (залізоокисного пігменту) / Ханик Я. М., Цюра Н. Я., Дулеба В. П. // Наукові праці. Одеська національна академія харчових технологій.- 2006. Вип. 28, т. 2. С. 10.

153. Tsiura N. Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. / Tsiura N., Kindzera D., Huzova I., Atamanyuk V. // ScienceRise. - 2021. - №1, С. 11-21. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.001583>.

154. Светлов Ю.В. Комбинированная радиационно-фильтрационная сушилка барабанного типа / Ю.В. Светлов, О.И. Старосвитский, А.А. Захарова // Кож.- обувная пром. – 2002. – № 4. – С. 43-44.

155. Пат. 86857 Україна, МПК F26B 17/04 (2006.01). Установа для сушіння рослинної сировини / Атаманюк В.М., Гузьова І.О., Гумницький Я.М., Симак Д.М. ; заявник і патентовласник НУЛП– №u201309496; заявл. 29.07.2013; опубл. 10.01.2014, Бюл. № 1.

156. Пат. 89927 Україна, МПК F26B 17/04 (2006.01). Спосіб сушіння адсорбенту / Атаманюк В.М., цюьова І.О., Ходорівський Р.В., Симак Д.М.; заявник і патентовласник НУЛП. – №u201310813 ; заявл. 09.09.2013 ; опубл. 12.05.2014, Бюл. № 9.

157. Пат. № 44977 Україна, МПК F26 B17/00. Сушарка /І.М. Дударев. Заяв. 17.04.2009; опубл. 26.10.2009; Бюл. № 20

158. Установа фільтраційного сушіння сипких матеріалів/ Номер патенту: 78453 | Автори: Атаманюк В.М.,Мазяр Г.О., Матківська І.Я., Гузьова І.О. Опубліковано: 25.03.2013 | МПК: F26B3/06

159. Установа для сушіння рослинної сировини/ Номер патенту: 86857 | Автори: Гузьова І.О., Симак Д.М., В.М., Гумницький Я.М.| Опубліковано: 10.01.2014 |МПК: F26B 17/04.

160. Патент України № 120178 на винахід. Установа фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П, Гаврилів Р.І, Цюра Н.Я., Микичак Б.М. //Заявл. 14.11.2016, опубл. 25.10.2019 , Бюл. №20, С.3.

ДОДАТКИ

Додаток А

Таблиця розрахунку основних параметрів сушіння залізоокисного

Розрахунок необхідних затрат енергії для сушіння жовтого залізоокисного пігменту						
Фільтраційним методом і в сушильному барабані						
Параметр	Позн.	Од. вим.	Суш. бараб.	Фільтр.		
			Значення			
Продуктивність по готовому продукту	Gc	kg/god	1200.000	1200.000		
Початкова вологість дисп. Мат.	C0	kg/kg	0.260	0.260		
Кінцева вологість матер.	Ck	kg/kg	0.020	0.020		
Вологовміст повітря перед калорифером	X0	kg/kg	0.008	0.008		
Вологовміст повітря на виході в сушарки	Xk	kg/kg	0.035	0.038		
Температура повітря	t0	oC	20.000	20.000		
Початкова температура теплового агенту	tn	oC	150.000	100.000		
Кінцева температура теплового агенту	tk	oC	50.000	30.000		
Початкова температура вологого матеріалу	Tvm	oC	20.000	20.000		
Кінцева температура матер.	Tsm	oC	45.000	35.000		
Насипна густина сухого дисп. Мат.	Ro_nas	kg/m3	2204.000	2204.000		
Середня умовна густина матеріалу	Ro_s	kg/m3	3800.000	3800.000		
Теплоємність дисперсного матеріалу	Cs	Кдж/(кг*К)	0.400	0.400		
Середня температура між матеріалом і теплов. Аг.	tser_M_A		38.366		ro_pov	0.946351
Середня температура теплового агенту	tser_agent		100.000		ro_pary	
Початкова вологість дисп. Мат., %	Omega0=	20.6349206				
Кінцева вологість матер., %	Omegak=	1.96078431				
Кількість випарованої вологи	W	kg/god	282.353	282.353		
Необхідна кількість теплового агенту	L	kg/c	2.852	2.572		
Об'ємна витрата теплового агенту	V	m3/c	3.803	3.429		
Теплота для нагрівання вологого матеріалу	Q_nat	kWt	11.549	4.620		
Теплота для нагрівання повітря	Q_pov	kWt	372.620	206.750		
Теплота для випаровування вологи	Q_vypar	kWt	195.529	195.529		
Додаткова кількість теплоти для випаровування з	Qдод	kWt	2.052	2.052		
Втрати теплоти в навколишнє середовище	Q_vtrat	kWt	9.804	9.804		
Сумарні затрати на випаровування			591.555	418.756	172.7995	
Напруження роб. Об'єму барабану по волозі	Av	kg/(m3*god)	11.000			
Необхідний об'єм барабану	V_neob	m3	25.668		14.13	
Діаметр барабану	D	m	1.500	1.000		
Довжина барабану	L_bar	m	8.000	6.000		
Коефіцієнт заповнення барабану	beta		0.200			
Час сушіння	tau	c	16357.039	3000.000	60	
Уточнене напруження об'єму барабану по волозі	Av	kg/(m3*god)	19.983			
Частота обертання барабану	N_bar	ob/xb	0.785	1.000	60	
Кут нахилу барабану	alfa		1.000			
Лнійна швидкість поверхні фільтрації	V_lin	m/c		0.052		
Потужність обертання барабану	N_bar	kvt	37.649	10.659		
Висота шару дисперсного матеріалу	H	m		0.045		
Площа зони фільтраційного сушіння	S	m2		14.130		
Потужність приводу барабану	N_bar	kWt	37.649	10.659		
Продуктивність вентилятора	G_ventyl	m3/c	3.938	3.564		
Швидкість повітряного потоку	v_pov	m/c	2.787	0.252		
Втрати тиску	dP	Pa	1373.400	2939.032		
Потужність приводу вентилятора	A	kWt	8.451	16.366		
Продуктивність сушарки фільтраційного сушіння	G_f_s	kg/god		#####		
Сумарна потужність вентил. і приводу бараб.	N_bar_ven	kWt	46.100	27.025		
Сумарні затрати на сушіння		kWt*god	637.655	445.781	191.874	
				1 kg cyh	0.159895	
				1 kg vody	0.679554	

пігменту

Таблиця розрахунку основних параметрів сушіння залізоокисного пігменту

Розрахунок необхідних затрат енергії для сушіння відпрацьованого деревного борошна						
Фільтраційним методом і в сушильному барабані						
Параметр	Позн.	Од. вим.	Значення			
			Суш. бараб.	Фільтр.		
Продуктивність по готовому продукту	Gc	kg/god	1200.000	1200.000		
Початкова вологість дисп. Мат.	C0	kg/kg	0.800	0.800		
Кінцева вологість матер.	Ck	kg/kg	0.100	0.100		
Вологовміст повітря перед калорифером	X0	kg/kg	0.008	0.008		
Вологовміст повітря на виході із сушарки	Xk	kg/kg	0.032	0.035		
Температура повітря	t0	oC	20.000	20.000		
Початкова температура теплового агента	tn	oC	150.000	100.000		
Кінцева температура теплового агента	tk	oC	50.000	30.000		
Початкова температура вологого матеріалу	Tvm	oC	20.000	20.000		
Кінцева температура матер.	Tsm	oC	50.000	35.000		
Насипна густина сухого дисп. Мат.	Ro_nas	kg/m3	120.000	120.000		
Середня умовна густина матеріалу	Ro_s	kg/m3	1540.000	1540.000		
Теплоємність дисперсного матеріалу	Cs	Кдж/(кг*К)	1.760	1.760		
Середня температура між матеріалом і теплов. Аг.	tser_M_A		#ДЕЛ/0!		ro_pov	0.946351
Середня температура теплового агента	tser_agent		100.000		ro_pary	
Початкова вологість дисп. Мат., %	Omega0=	44.4444444				
Кінцева вологість матер., %	Omegak=	9.09090909				
Кількість випарованої вологи	W	kg/god	763.636	763.636		
Необхідна кількість теплового агента	L	kg/c	8.658	7.713		
Обємна витрата теплового агента	V	m3/c	11.544	10.285		
Теплота для нагрівання вологого матеріалу	Q_mat	kWt	44.264	14.755		
Теплота для нагрівання повітря	Q_pov	kWt	1131.169	620.165		
Теплота для випаровування вологи	Q_vupar	kWt	528.818	528.818		
Додаткова кількість теплоти для випаровування з	Qдод	kWt	41.077	41.077		
Втрати теплоти в навколишнє середовище	Q_vtrat	kWt	26.515	26.515		
Сумарні затрати на випаровування			1771.843	1231.330	540.5126	
Напруження роб. Об'єму барабану по волозі	Av	kg/(m3*god)	11.000			
Необхідний об'єм барабану	V_neob	m3	69.421		14.13	
Діаметр барабану	D	m	1.500	1.000		
Довжина барабану	L_bar	m	8.000	6.000		
Коефіцієнт заповнення барабану	beta		0.200			
Час сушіння	tau	c	686.562	3000.000	60	
Уточнене напруження об'єму барабану по волозі	Av	kg/(m3*god)	54.044			
Частота обертання барабану	N_bar	ob/xb	18.701	1.000	60	
Кут нахилу барабану	alfa		1.000			
Лінійна швидкість поверхні фільтрації	V_lin	m/c		0.052		
Потужність обертання барабану	N_bar	kvt	48.837	0.580		
Висота шару дисперсного матеріалу	H	m		0.045		
Площа зони фільтраційного сушіння	S	m2		14.130		
Потужність приводу барабану	N_bar	kWt	48.837	0.580		
Продуктивність вентилятора	G_ventyl	m3/c	11.910	10.650		
Швидкість повітряного потоку	v_pov	m/c	8.429	0.754		
Втрати тиску	dP	Pa	1373.400	16037.346		
Потужність приводу вентилятора	A	kWt	25.558	266.881		
Продуктивність сушарки фільтраційного сушіння	G_f_s	kg/god		6104.160		
Сумарна потужність вентил. і приводу бараб.	N_bar_ven	kWt	74.394	267.462		
Сумарні затрати на сушіння		kWt*god	1846.237	1498.792	347.445	
				1 kg cyh	0.289538	
				1 kg vody	0.454988	

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Проректор

Національного університету

«Львівська Політехніка»

Давидчук О.Р.



02 2021 р.

АКТ

«13» 02 2021 р.

Ми, які нижче підписалися, представники Національного університету «Львівська Політехніка», завідувач кафедрою хімічної інженерії, д.т.н., проф. Атаманюк Володимир Михайлович, к.т.н., доцент кафедри хімічної інженерії Кіндзера Діана Петрівна, к.т.н., доцент кафедри хімічної інженерії Гузьова Ірина Олександрівна склали даний акт про те, що у навчальному процесі підготовки фахівців за спеціальністю 161 «Хімічні технології та інженерія» використовуються результати кандидатської дисертації асистента кафедри хімічної інженерії Цюри Надії Ярославівни.

Результати наукової роботи використовуються у лекційних курсах та відображенні у навчальній програмах з дисципліни «Процеси та апарати хімічних виробництв», а також під час курсового та дипломного проєктування.

Використання результатів дисертаційної роботи Цюри Н.Я. сприяє вдосконаленню підготовки фахівців.

Голова комісії:

Члени комісії:

В.М. Атаманюк

Д.П. Кіндзера

І.О. Гузьова

ЗАТВЕРДЖУЮ:



Директор підприємства
«Аргентум» ГО «Науково-
дослідне об'єднання»

Срібний В.М,

«02» 03 2021 р.

АКТ

передачі результатів дисертаційної роботи Цюри Надії Ярославівни

Ми, що нижче підписалися: від НУ «Львівська політехніка»: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Атаманюк Володимир Михайлович, асистент кафедри хімічної інженерії Цюра Надія Ярославівна; від підприємства «Аргентум» Громадської організації «Науково-дослідне об'єднання»: директор Срібний Василь Михайлович та заступник директора Козак Роман Ярославович засвідчуємо про те, що результати дисертаційної роботи Цюри Н.Я. передані з метою впровадження на виробництво підприємства «Аргентум» Громадської організації «Науково-дослідне об'єднання», а саме:

1. Результати та узагальнення експериментальних досліджень гідродинаміки фільтрування теплового агенту через шар дисперсних матеріалів та кінетики фільтраційного сушіння.
2. Результати досліджень та узагальнення тепло- та масообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.
3. Принципова схема установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів та методика розрахунку основних конструктивних розмірів.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено, що:

1. отримані розрахункові залежності дають змогу прогнозувати енергетичні затрати на етапі проектування промислового обладнання для фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів, а також визначати раціональні параметри для досягнення економічної ефективності процесу.
2. запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів безперервної дії дає змогу розробити технічне завдання для її виготовлення.

Від підприємства «Аргентум» Громадської організації «Науково-дослідне об'єднання»:

Директор



 Срібний В.М.

Заступник директора

 Козак Р.Я.

Від Національного університету «Львівська політехніка»:

Завідувач кафедри
хімічної інженерії



Атаманюк В.М.

Асистент кафедри
хімічної інженерії



Цюра Н.Я.

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Директор ТзОВ «Галвесттрейд»



Смаль А.Г.

2021 р.

АКТ

передачі результатів дисертаційної роботи Цюри Надії Ярославівни

Ми, що нижче підписалися: від НУ «Львівська політехніка»: завідувач кафедри хімічної інженерії д.т.н., проф. Атаманюк Володимир Михайлович, асистент кафедри хімічної інженерії Цюра Надія Ярославівна; від ТзОВ «Галвесттрейд»: директор Смаль Андрій Григорович та інженер Ткач Христина Йосипівна, засвідчуємо про те, що результати дисертаційної роботи Цюри Н.Я. передані з метою впровадження на виробництво ТзОВ «Галвесттрейд», а саме:

1. Результати та узагальнення експериментальних досліджень гідродинаміки фільтрування теплового агенту через шар дисперсних матеріалів.
2. Результати досліджень кінетики фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.
3. Результати досліджень та узагальнення тепло- та масообміну під час фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.
4. Принципова схема установки, яка реалізує фільтраційний метод сушіння дисперсних матеріалів.
5. Методика розрахунку основних конструктивних розмірів установки фільтраційного сушіння.

На основі аналізу отриманих матеріалів встановлено:

1. Отримані розрахункові залежності узагальнення експериментальних даних з гідродинаміки дають змогу прогнозувати енергетичні

затрати на етапі проектування промислового обладнання для фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів.

2. Отримані результати кінетики процесу дають змогу визначити раціональні параметри для досягнення високої інтенсивності процесу сушіння дисперсних матеріалів.
3. Запропонована методика розрахунку установки фільтраційного сушіння дисперсних матеріалів безперервної дії, що дає змогу розробити технічне завдання для її виготовлення.
4. Висушене деревне борошно доцільно використовувати у виробництві будівельних композитів.

Від ТзОВ «Галвесттрейд»:

Директор



Смаль А.Г

Інженер

Ткач Х.Й.

Від Національного університету «Львівська політехніка»:

Завідувач кафедру

Хімічної інженерії

д.т.н., проф. Атаманюк В.М.

Асистент

Цюра Н.Я.

Список опублікованих праць за темою дисертації

1. Ханик Я. М., Цюра Н. Я., Дулеба В. П. Гідродинаміка сухого дисперсного матеріалу (залізоокисного пігменту). *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2006. Вип. 28, т. 2. С. 10. (Особистий внесок дисертанта: збір літературних даних, експериментальне дослідження гідравлічного опору шару залізоокисного пігменту).

2. Цюра Н. Я., Ханик Я. М. Кінетика сушіння жовтого залізоокисного пігменту. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2007. Вип. 31, т. 1. С. 107–110. (Особистий внесок дисертанта: дослідження кінетики сушіння, узагальнення результатів та написання статті.)

3. Ханик Я. М., Цюра Н. Я. Гідродинаміка руху теплоносія крізь шар сухого дисперсного матеріалу (органічних відходів виробництва TiO_2). *Науковий вісник НЛТУ України*. 2008. Вип. 18.3. С. 160–162. (Особистий внесок дисертанта: експериментальне дослідження гідродинаміки руху теплового агенту крізь стаціонарний шар органічних відходів виробництва TiO_2 , обговорення результатів та написання статті.)

4. Цюра Н. Я., Атаманюк В. М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. *Наукові праці / Одеська національна академія харчових технологій*. 2015. Вип. 47, т. 1. С. 153–159. <https://doi.org/10.15673/swonaft.v1i47.373> (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті.)

5. Цюра Н. Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В. М., Госовський Р.Р. Динаміка видалення вологи з Ферум(II) сульфат гептагідрату під час процесу зневоднення фільтраційним методом. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2021. Т. 31, № 1. С. 74–79. <https://doi.org/10.36930/40310112>. (Особистий внесок дисертанта: дослідження гідродинаміки руху теплового агента крізь

стаціонарний шар залізного купоросу, обговорення результатів та написання статті).

6. Tsiura N., Kindzera D., Huzova I., Atamanyuk V. Study of the kinetics of drying iron (II) sulfate heptahydrate by filtration method. *ScienceRise*, 2021. №1, С. 11-21. <https://doi.org/10.21303/2313-8416.2021.001583>. (Особистий внесок дисертанта: узагальнення результатів експериментальних досліджень, обговорення результатів та написання статті.)

7. В.Лантєв, Н.Цюра, В.Атаманюк. Сушіння залізного купоросу фільтраційним способом. Львівські хімічні читання: зб. наук. пр., 26-29 травня 2013 року. С19. (Особистий внесок дисертанта: проведені експериментальні дослідження, опрацьовані результати).

8. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинамічні закономірності фільтраційного сушіння залізного купоросу. Сучасні проблеми науки і технологій в умовах забезпечення сталого розвитку економіки: «MPST-I-2015», Миргород, 20-24 квітня 2015 р. С. 196-199. (Особистий внесок дисертанта: Проведення експериментальних досліджень, узагальнення результатів та написання тез).

9. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М. Гідродинаміка стаціонарного шару залізного купоросу. Збірник праць V міжнародної науково-практичної конференції «Інноваційні енерготехнології». Одеса, 7-11 вересня 2015 р. С.-40. (Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, побудова графічних залежностей, обговорення результатів, написання тез та виступ на конференції).

10. Tsiura N., Atamanyuk V., Pelekh M. Recovery of wastes from titanium (IV) oxide production. Актуальні проблеми хімії та технології органічних речовин. Львів, 5-7 листопада 2015 р., С. 84. (Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).

11. Цюра Н.Я., Атаманюк В.М., Цимбалістий О.В., Дулеба В.П. Особливості фільтраційного сушіння залізного купоросу. Програма і матеріали

міжнародної науково-практичної конференції «Удосконалення процесів і обладнання – запорука інноваційного розвитку харчової промисловості». Київ, 8-10 листопада 2016 р., С. 50. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, обговорення результатів, написання тез).*

12. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М. Сушіння залізного купоросу фільтраційним методом. Матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції «Екологічна безпека як основа сталого розвитку суспільства. Європейський досвід і перспективи». М.Львів, 14 вересня 2018 р., С. 84. *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, узагальнення та обговорення результатів, написання тез).*

13. Цюра Н.Я., Кіндзера Д.П., Атаманюк В.М., Госовський Р.Р. Теплообмін під час фільтраційного сушіння залізного купоросу. *Débats scientifiques et orientations prospectives du développement scientifique 05.02.2021, Париж, FRA* <https://doi.org/10.36074/logos-05.02.2021.v3.07> *(Особистий внесок дисертанта: проведення експериментальних досліджень, математичне опрацювання результатів, написання тез).*

14. Патент України № 120178 на винахід. Установа фільтраційного сушіння вологих дисперсних матеріалів / Атаманюк В.М., Кіндзера Д.П., Гаврилів Р.І., Цюра Н.Я., Микичак Б.М. //Заявл. 14.11.2016, опубл. 25.10.2019, Бюл. №20, С.3. *(Особистий внесок дисертанта: запропонована ідея винаходу, патентний пошук).*