

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ "ЛЬВІВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА"**

КУТОВИЙ Володимир Олександрович



УДК 66. 047. 7 : 66.047.3

**РОЗВИТОК НАУКОВИХ ОСНОВ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО
ТЕРМОВАКУУМНОГО СУШИЛЬНОГО УСТАТКУВАННЯ**

05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Львів – 2015

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Національному науковому центрі “Харківський фізико-технічний інститут”
Національної академії наук України

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Заслужений діяч науки і техніки України
Мисак Йосиф Степанович,
Національний університет “Львівська політехніка”
завідувач кафедри теплотехніки, теплових
і атомних електричних станцій

доктор технічних наук, професор
Кошельник Вадим Михайлович
Національний технічний університет “ХП”
завідувач кафедри теплотехніки і
енергоефективних технологій

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Павленко Анатолій Михайлович,
Полтавський національний технічний університет
імені Юрія Кондратюка, декан факультету нафти
і газу та природокористування

доктор технічних наук, професор
Ткаченко Станіслав Йосипович,
Вінницький національний технічний університет,
завідувач кафедри теплоенергетики

доктор технічних наук, професор
Потапов Володимир Олексійович,
Харківський державний університет харчування та торгівлі,
завідувач кафедри холодильної та торгівельної техніки

Захист відбудеться «16» травня 2015 року о 12⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 35.052.04 у Національному університеті “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів – 13, вул. Устияновича, 5, корпус 10, ауд. 51.

Із дисертацією можна ознайомитися у науково-технічній бібліотеці Національного університету “Львівська політехніка” за адресою: 79013, м. Львів – 13, вул. Професорська, 1.

Автореферат розісланий «08» квітня 2015 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради, Д 35.052.04
кандидат технічних наук, доцент



Ю. З. Вашкурак

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із перспективних напрямків сучасного підходу до ефективного використання природних та енергетичних ресурсів є реалізація концепції з інтенсифікації процесів тепломасообміну під час видалення вологи із гетерогенних матеріалів. Вирішення проблеми у рамках обмеження енергоресурсів на даному етапі розвитку промислового виробництва є ефективне використання теплової енергії у тепломасообмінних технологічних процесах, що потребує розроблення нових способів сушіння і удосконалення теплотехнічних пристроїв.

Розв'язання наукових та технічних проблем в області сушіння має базуватися на вивченні властивостей матеріалу як об'єкта сушіння, вибору методів і режимів процесу сушіння і тільки на цій основі потрібно створювати раціональні конструкції сушильних установок різного призначення.

Підвищення ефективності процесів сушіння здебільшого пов'язано з необхідністю комплексного підходу до проблем теплофізичних та термодинамічних засад процесу із упровадженням у виробництво нових сучасних екологічно чистих, термотехнічних установок із покращеними експлуатаційними і техніко-економічними характеристиками, що дозволить ефективно підводити теплоту до висушуваного матеріалу, прискорить процес тепло- і масообміну у ньому, скоротить час сушіння.

Наукове обґрунтування тепломасообмінних процесів у термотехнічних установках і розроблення енергоощадних методів сушіння є **актуальною науково-технічною проблемою**, рішення якої дозволить знизити матеріалоемність технологічних пристроїв, значно скоротить час сушіння, зменшить використання енергетичних ресурсів, що визначило напрямок цих наукових досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обрана тема досліджень відповідає ст. 7 Закону України «Про пріоритетні напрямки розвитку науки і техніки» № 2623 ІІІ від 11.07.2011 р.; а саме, напрямку 3 – «Збереження навколишнього середовища (довкілля) та сталий розвиток»; напрямку 6 – «Новітні технології та ресурсозберігаючі технології в енергетиці, промисловості та агропромисловому комплексі». Робота також відповідає «Плану заходів на 2006–2010 рр. щодо реалізації Енергетичної стратегії України» від 27.07.2006 р. № 436-р.

Дисертаційна робота виконувалася згідно з науково-технічною програмою Національного наукового центру «Харківський фізико-технічний інститут», котрі були затверджені Національною академією наук України, в яких автор був як керівником, так і виконавцем окремих підрозділів:

– «Розробка і створення апаратури та методів аналізу матеріалів, дослідження їх складу й структури» Програми робіт з атомної науки і техніки ННЦ ХФТІ на 1993–2000 рр., шифр теми 05/34, № ДР 08.05-КМ/03-93.

– «Розробка наукових основ нових ресурсозберігаючих та радіаційних технологій для промисловості, медицини та екології» Програми проведення фундаментальних досліджень з атомної науки і техніки ННЦ ХФТІ на 2001–2005 рр., шифр теми 06/46, № ДР 080901UP0009.

– «Розробка наукових основ екологічно безпечного використання відновлюваних джерел енергії та технологій енерго- та ресурсозбереження» Відомчого замов-

лення НАН України на проведення наукових досліджень з атомної науки і техніки ННЦ ХФТІ на 2005-2010 рр., шифр теми III-1-06 (ВДЕРТ), № ДР 080906UP0010.

– «Розробка наукових основ підвищення ефективності застосувань нових та альтернативних енергетичних установок, перспективних матеріалів та ресурсозберігаючих технологій» тема АНТ2015 на 2010–2015 рр., шифр теми III-1-11 (ВДЕРТ), № ДР 0111U009593.

Дана розробка проводилася згідно із Міжнародними проектами: № Gr-14, «Створення екологічно чистих термовакuumних сушильних установок і енергозберігаючої технологій з переробки і збереження сільськогосподарської продукції», № Uzb 22, «Наукова розробка і створення сушильної установки для отримання екологічно чистих ветеринарних препаратів та кормових добавок із відходів виноробної промисловості».

Мета і завдання дослідження. Метою дисертаційної роботи є наукове обґрунтування та подальший розвиток енергоефективних тепломасообмінних технологічних процесів і розроблення на базі удосконалення теплофізичних механізмів і термотехнічного устаткування вакуумних установок сушіння вологих матеріалів з різноманітними структурними і теплотехнологічними властивостями.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі завдання:

- виконати теоретичні дослідження енергоефективних тепломасообмінних процесів в термовакuumних сушильних установках і дослідити кінетику випаровування вільної води із поверхні в квазістаціонарному режимі;
- дослідити інтенсифікацію тепло- і масопреносу в капілярно-пористих матеріалах, що дозволить створити промислові термовакuumні установки та енергоощадні технологічні процеси сушіння гетерогенних матеріалів;
- розробити концепцію нового підходу по вдосконаленню конструкційних систем термовакuumних сушильних установок, які забезпечать найкращі умови для використання теплової енергії і зумовить економію енергоресурсів під час сушіння вологих матеріалів з різними структурними і технологічними параметрами;
- для інтенсифікації процесу теплообміну в термовакuumних установках розробити конструкції нагрівальних елементів, які забезпечать високоефективне перенесення теплової енергії від нагрівального елемента до висушуваного матеріалу у вакуумному просторі;
- на базі удосконалення теплофізичних механізмів розробити енергоощадну технологію отримання висушених дрібнодисперсних матеріалів;
- науково обґрунтувати тепломасообмінні енергоефективні технологічні процеси термовакuumного сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів;
- розробити науково-технічні основи нового енергоефективного екологічно чистого термовакuumного устаткування та енергоощадні технології сушіння ізоляції кабельної продукції;
- створити нові перспективні енергоощадні низькотемпературні технологічні процеси сушіння термолабільних матеріалів.

Об'єкт дослідження: тепломасообмінні процеси в теплотехнічних термовакuumних сушильних установках різного цільового призначення.

Предмет дослідження: закономірності тепломасообмінних процесів у вологих матеріалах залежно від температури нагрівання, тиску навколишнього середовища і структури висушеного матеріалу.

Методи досліджень. У процесі виконання науково-дослідних робіт із вивчення тепломасообмінних процесів були використані теоретичні та експериментальні методи досліджень процесів видалення вологи із гетерогенних матеріалів залежно від режимних параметрів термовакуумних установок, розмірів висушеного матеріалу і його структурної побудови.

Методом математичного і фізичного моделювання досліджували динаміку видалення вологи із капілярно-пористих середовищ залежно від тиску у вакуумному об'ємі і температури нагрівання.

Визначення технічних характеристик фізичних моделей різних термовакуумних сушильних установок здійснювалися на дослідно-промислових зразках та штатному устаткуванні, фіксувалися за допомогою сучасних вимірювальних приладів, що дозволило оцінити адекватність розроблених математичних моделей та співставити отримані результати із даними інших авторів.

Апробованими методами проводився контроль якості одержаної висушеної сировини, що піддавалася різним теплотехнічним процесам у термовакуумній установці.

Оброблення результатів експерименту проводилось із використанням діагностичного устаткування та відповідного програмного комп'ютерного забезпечення.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у вирішенні актуальної прикладної науково-технічної проблеми – розвиток наукових основ енергоефективного термовакуумного сушильного устаткування.

1. Установлено вплив процесів тепло- і масоперенесення на геометрію неоднорідної мікроструктури в конденсованому середовищі. На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень отримано релаксаційні нелінійні рівняння і показано їх зв'язок із феноменологічною теорією сушіння гетерогенних матеріалів.

2. Уперше теоретично досліджено кінетику випаровування вільної води із поверхні у квазістаціонарному режимі, що дає змогу запропонувати схемні рішення побудови фізичних моделей термовакуумних установок з мінімальними енергетичними затратами під час сушіння вологих матеріалів.

3. На основі проведених науково - технологічних досліджень уперше розроблено новий енергоефективний термовакуумний метод одночасного сушіння і подрібнення дисперсних матеріалів, який прискорює процес сушіння дисперсних матеріалів.

4. Уперше обґрунтовано та розроблено нову конструкцію електричного, пустотілого, вакуумного нагрівального елемента, який має форму спіралі.

5. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень уперше розроблено і реалізовано енергоощадний дискретний метод термовакуумного сушіння габаритних капілярно-пористих матеріалів, що виключає виникнення термічних напружень у зразка під час сушіння, скорочує час технологічного процесу, підвищує якість висушеної продукції.

6. З урахуванням розроблених теоретичних основ термовакuumного сушіння і результатів експериментальних досліджень уперше розроблено новий енергоефективний метод і термовакuumну установку сушіння паперової ізоляції електричних кабелів різної модифікації, що дало змогу знизити енергозатрати, підвищити якість виробленої продукції, зменшити забруднення навколишнього середовища, покращити умови праці обслуговуючого персоналу, збільшити продуктивність праці.

7. Розроблено низькотемпературний, високоефективний термовакuumний спосіб сушіння термолабільних матеріалів, який не допускає втрат вітамінів і руйнування клітин матеріалу, дозволяє інтенсифікувати процес і максимально зберегти харчову і біологічну цінність висушеного продукту.

Практичне значення отриманих результатів

На основі наукових результатів дисертаційної роботи створена науково конструкторська база з розроблення нових високоефективних, екологічно чистих, енергоощадних теплотехнологічних установок з видалення вологи із різних гетерогенних матеріалів як у безперервному, так і дискретному режимах.

На основі теоретичних і експериментальних досліджень сконструйовано і виготовлено нові високоефективні термовакuumні установки різного цільового призначення, а саме:

1. Створений енергоощадний термовакuumний метод безперервного виробництва дрібнодисперсного діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію. Теплотехнічне устаткування і енергоощадна технологія виробництва діоксиду цирконію впроваджується на Державному науково-виробничому підприємстві «Цирконій», м. Дніпродзержинськ. Термовакuumна установка запатентована в Україні, Європі, та Росії.

2. Розроблений термовакuumний метод безперервного сушіння бурого вугілля і відходів деревообробної промисловості, що дало змогу виготовляти високоякісне тверде паливо із відходів промислового виробництва.

3. На базі одержаних наукових експериментів з термовакuumного моделювання видалення вологи із капілярно-пористого середовища розроблено енергоощадний метод термовакuumного сушіння сирцю великогабаритних керамічних виробів, який використовується на підприємстві «УкрНДІВ» імені А.С. Бережного, м. Харків. Спосіб сушіння сирцю керамічних виробів запатентовано в Україні.

4. Розроблений високоефективний енергоощадний термовакuumний метод сушіння деревини, що дало змогу зменшити витрати електроенергії, у 1,5...2 рази порівняно з конвективним методом сушіння. Установки для сушіння деревини запатентовані в Україні.

5. На основі проведених науково-технічних досліджень із видалення вологи із гетерогенних матеріалів розроблена термовакuumна енергозберігаюча технологія сушіння паперової ізоляції електричних кабелів різної модифікації і впроваджена у виробництво на ПАТ завод «Південкабель», м. Харків. На конструкцію установки отримано авторські свідоцтва.

6. На підставі отриманих теоретичних і експериментальних результатів показані можливості термовакuumної установки із низькотемпературного сушіння

термолабільних матеріалів. Енергоощадна технологія низькотемпературного сушіння термолабільних матеріалів доведена до практичного застосування.

Матеріали дисертаційної роботи використовуються у навчальному процесі під час курсового і дипломного проектування на фізико-енергетичному факультеті ХНУ імені В. Н. Каразіна і на кафедрі "Електроізоляційна та кабельна техніка" НТУ "ХПІ".

Особистий внесок автора. Дисертація є узагальненням результатів наукових досліджень, які були ініційовані і виконані автором, під його керівництвом і за його безпосередньої участі.

Роботи [18, 29, 30, 42] написані дисертантом самостійно. У роботах [1, 13, 27, 32] дисертант розробив нові термовакуумні методи і установки сушіння різних видів електричного кабеля у паперовій ізоляції. У роботах [2, 6, 7, 11, 17, 36, 39, 43] дисертант розробив термовакуумні технології для сушіння дисперсних матеріалів. У роботах [22, 24] дисертант здійснював постановку завдання, оброблення та інтерпретацію отриманих даних з видалення вологи із гетерогенних матеріалів у термовакуумній установці. У роботах [3, 14, 33, 34, 44] дисертант брав участь у розробленні математичної моделі термовакуумного сушіння дисперсних матеріалів. У роботах [9, 10, 12, 15, 20, 23, 40, 41, 45] дисертант розробив термовакуумний метод отримання дрібнодисперсного діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію. У роботах [4, 35] дисертант використав альтернативні джерела енергії для термовакуумного сушіння гетерогенних матеріалів. У роботах [5, 37] дисертант розробив термовакуумний метод сушіння термолабільних матеріалів. У роботах [16, 19, 25, 26, 46] дисертант розробив термовакуумну технологію сушіння і одночасного подрібнення бурого вугілля. В роботах [8, 21, 28, 31, 38] розробив термовакуумну установку і метод сушіння габаритних капілярно-пористих матеріалів.

Апробація результатів дисертації. Матеріали дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях: Международная конференция по электротехнике и электротехнологии (Суздаль, Россия, 1994); 14th International Drying Symposium (Sao Paulo, Brazil, 2004); Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии». – СЭТТ-2005. (Москва, 2005); 3rd Inter-American Drying Conference (Montreal, Quebec, Canada, 2005); Международная конференция «Проблемы энергосберегающих технологий в АПК» (Киев, 2006); 10th Biennial Worldwide Congress United European Refractories Meet the World (Dresden, Germany, 2007); XII Міжнародна наукова конференція «Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв» (Одеса, 2008); V Научно-практическая конференция материаловедческих обществ России «Цирконий: металлургия, свойства, применение» (Ершово, Россия, 2008); Международный симпозиум «Перспективные материалы и технологии» (Витебск, Беларусь, 2009); XXIV Научная конференция стран СНГ «Дисперсные системы» (Одесса, Украина, 2010); 17th International Drying Symposium (Magdeburg, Germany, 2010); I Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы прикладной физики» (Севастополь, Украина, 2012); IX Mezinarodni vedecko – prakticka conference «Dny Vedy» (Praha, 2013), XXI Міжнародна науково-практична конференція «Наука техніка, технологія, освіта, здоров'я». (Харків, Україна, 2013).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 46 наукових праць: 26 статей у спеціалізованих наукових журналах, із них 5 робіт входять до міжнародних наукометричних баз даних, 3 патенти України, 1 Європейський патент, 1 Російський патент, 15 доповідей на Міжнародних конференціях.

Структура і обсяг дисертації. Дисертація складається із вступу, семи розділів, висновків, списку використаних літературних джерел. Загальний обсяг дисертації представлений на 325 сторінках. Містить 95 малюнків, 28 таблиць за текстом і 197 найменувань використаних літературних джерел.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми, сформульовані мета та завдання досліджень, наведені відомості про наукову новизну, практичну цінність одержаних результатів, апробацію і впровадження розробок у промисловість. Показаний зв'язок роботи із науковими програмами, планами, темами, міжнародними програмами, науково-технічним співробітництвом. Подана інформація стосовно апробації отриманих результатів за темою дисертації і особистий внесок здобувача.

У першому розділі виконано аналітичний огляд науково-технічних літературних джерел у галузі термодинаміки, проведено аналіз установок і методів сушіння вологих матеріалів у різних галузях промислового виробництва, який показав, що сушіння є енергоємним процесом і в світовій практиці вирішується найрізноманітнішими технічними та технологічними методами із застосуванням різних типів сушильних установок як за функціональним призначенням, так і за особливостями виконання поставлених завдань. На даний час сушіння вологої сировини, загалом, відбувається за атмосферного тиску і високих температур. Якість висушеної продукції у цьому випадку низька. Енергоємність і металоємність сушильних установок висока. Низька ефективність сушильних агрегатів визначається недосконалістю теплотехнічного обладнання і недостатньою розробкою енергоощадних технологій. Проведений у дисертації аналіз проблем енергоощадності та ефективності термовакuumного обладнання дозволив установити напрямки перспективних наукових розробок, а також визначив конструкторські, технологічні та технічні завдання, реалізація яких є основою для

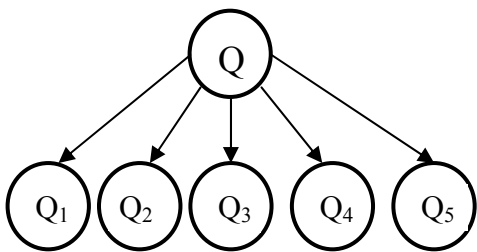


Рис. 1. Схема витрачання теплової енергії для сушіння вологих матеріалів

створення нових, високоефективних, енергоощадних, екологічно чистих термовакuumних установок, що дозволяє із найменшими втратами комплексно вирішувати нагальні проблеми. Отже, теплова енергія Q нагрівача в термовакuumній установці повинна за певний проміжок часу забезпечити нагрівання сухої сировини Q_1 , вологи Q_2 , деталей та вузлів сушильної установки Q_3 , випарувати вологу із висушеного матеріалу Q_4 та компенсувати ту частину теплоти, котра випромінюється у навколишній простір Q_5 (рис.1). Це значить, що потужність P_H нагрівального елемента установки мусить компенсувати всі затрати теплової енергії які направлені на сушіння вологих матеріалів.

$$P_{\text{н}} = \frac{Q}{t} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{t} = \frac{1}{t} [c_1 m_1 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) + c_2 m_2 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) + c_3 m_3 (T_{\text{к}} - T_{\text{п}}) + r m_2 + Q_5]. \quad (1)$$

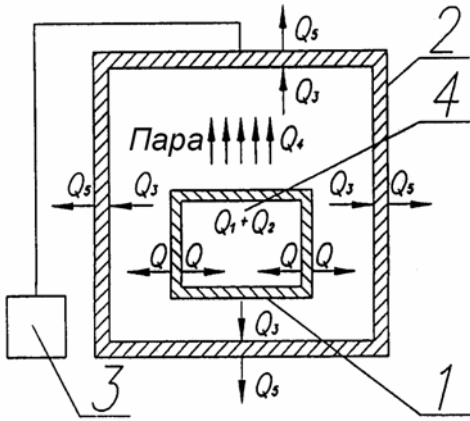


Рис. 2. Схема розподілу теплової енергії в термовакуумній установці

Для зменшення енергоспоживання термовакуумною установкою необхідно нагрівальний елемент 1 ізолювати так, щоб якомога менше теплової енергії випромінювалося у навколишній простір, тобто $Q_5 \rightarrow 0$ (рис. 2). Термовакуумну установку необхідно виготовляти із матеріалу з низькою теплоємністю і теплопровідністю і прагнути до зменшення маси сушильної камери 2. Варто своєчасно видаляти пару із сушильної камери вакуумним насосом 3. В міру видалення вологи із висушуваного зразка 4 ($m_2 \rightarrow 0$), Q_2 і Q_4 також прямуватимуть до нуля. У цей час необхідно знижувати потужність нагрівального елемента 1 і продуктивність

вакуумного насоса 3, що надає змогу зменшити споживання енергії. Також необхідно забезпечити у вакуумі максимальний коефіцієнт теплопередачі від нагрівального елемента до вологого матеріалу.

Аналіз існуючих сушильних установок і методів дозволив визначити класифікацію застосованої теплообмінної апаратури, дати оцінку ефективності конструкційних рішень устаткування обладнання, ухвалити найперспективніші напрямки енергоощадності та шляхи промислової реалізації, розробити енергоощадні термовакуумні установки різного цільового призначення, прискорити процес видалення вологи із висушуваного матеріалу.

Другий розділ присвячено теоретичним розробкам і експериментальному аналізу різних науково-фізичних методів дослідження термовакуумного впливу на тепло- і масоперенесення у висушуваному матеріалі. Обґрунтовано використання енергоощадних термовакуумних технологій для сушіння вологих матеріалів. До числа важливих науково-технічних проблем варто віднести розроблення методів енергоощадності, що є науковою основою створення нового ефективного енерго- і ресурсощадного термотехнологічного устаткування. Необхідними передумовами цього є також розроблення комплексу технічних рішень, призначених для реалізації термовакуумного сушіння і створення нового ефективного термотехнологічного устаткування.

Висушувані матеріали мають різного роду мікроструктуру, від якої залежить її внутрішній стан. У процесі сушіння вологих матеріалів, поряд із явищами тепло- і масоперенесення, відбувається зміна геометричних характеристик і внутрішньої структури висушуваного матеріалу. Тому необхідно розкрити механізм релаксаційних процесів тепло- і масоперенесення у гетерогенних середовищах і обґрунтувати отримання дрібнодисперсних матеріалів термовакуумним способом.

Вибір оптимальних робочих параметрів у термовакuumній сушильній установці є визначальним. Під час термовакuumного сушіння енергозатрати витрачаються на нагрівання вологи і видалення водяної пари насосом із вакуумного об'єму. З метою визначення ефективності роботи термовакuumної установки розглянемо процес випаровування води із плоскої кювети, яка знаходиться в об'ємі 2, де насосом 1 створюється вакуум (рис. 3). Шар води 3 підігрівается зовнішнім джерелом тепла 4. У даній схемі розглядається симетричне розташування деталей у вакуумній установці щодо осі камери, кювети з водою і насоса. При $L \gg d$ можна вважати, що всі величини (температура, T , щільність водяної пари ρ_p , щільність інших газів ρ_g за відповідного тиску, гідродинамічна швидкість відкачування суміші водяної пари та інших газів) є функціями тільки однієї координати. Під час цього нехтуємо малими кінцевими ефектами біля країв кювети і насоса. Крайові ефекти малі, якщо довжина камери L значно більше найбільшого розміру із величин $\sqrt{S_n}, \sqrt{S_c}, l$, де S_n - площа отвору насоса; S_c - площа кювети з водою; l - відстань від краю кювети до стінки камери, d - первісний шар води. Розглянута система перебуває у квазістационарному стані і має три граничні області по ординаті, для яких рівняння теплового та масового балансу відрізняються. На кордонах цих областей слід поставити граничні умови.

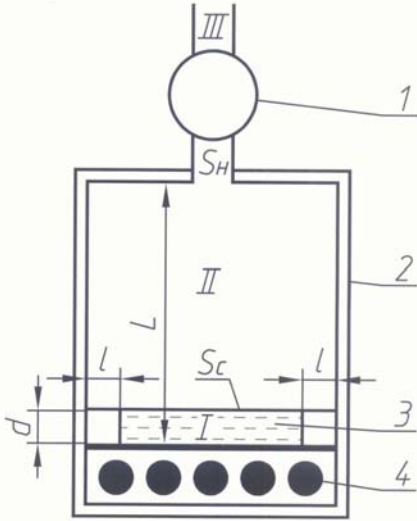


Рис. 3. Схема вакуумної установки

Перша область (I) $0 \leq y \leq \xi(t)$, де за нуль приймається дно кювети із водою товщиною $\xi(t)$. $\xi(0) = d$. Друга область (II) $\xi \leq y \leq L$. Третя область (III) $\infty > y > L$ є навколишнє середовище.

Рівняння теплового балансу у системі шару води товщиною $\xi(t)$ – камера – насос має вигляд

$$\rho^L \cdot C_p^L \frac{\partial T}{\partial t} = -\text{div} \vec{j}_Q + Q_v; \quad \vec{j}_Q = -\lambda \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (2)$$

де ρ^L – щільність води; C_p^L – теплоємність води; T – температура води; \vec{j}_Q – вектор питомого теплового потоку; Q_v – об'ємне джерело теплоти.

Потік у другій області містить конвективне перенесення теплоти, пов'язане зі швидкістю потоку газу, який визначається роботою насоса,

$$\rho^g \cdot C_p^g \frac{\partial T^g}{\partial t} = -\text{div} \vec{j}_Q^g \quad (3)$$

де ρ^g – щільність газу; C_p^g – теплоємність газу; T^g – температура газу;

\vec{j}_Q^g – тепловий потік газу у вакуумній камері.

На границі третьої області маємо безперервний потік водяної пари через вакуумний насос у навколишнє середовище. Рівняння балансу водяної пари має вигляд:

$$\frac{\partial \rho}{\partial y} = -\text{div} \vec{J} \quad (4)$$

де ρ – щільність водяного пару, \vec{J} – потік водяної пари.

Інтегруємо рівняння (2), (3), (4) із використанням граничних умов - отримаємо вираз для потоку водяної пари із поверхні води за температури навколишнього середовища T_0 , який залежить від підведеної теплі Q ; теплоти пароутворення q ; кількості поглинутої водою теплової енергії C_v

$$J = \frac{Q}{q} \left(1 - \frac{C_v \cdot T_0^2}{q^2} \ln \frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}(T_0)} \right) \quad (5)$$

Із одержаної автором формули виходить, що другий член у дужках виразу (5) є частиною теплової енергії, яка йде на випаровування води і визначається продуктивністю вакуумного насосу і нагрівального елемента. Звідси видно, що за $\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}(T_0)} < 1$ домінує робота насоса, а система охолоджується. За $\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}(T_0)} > 1$ домінує нагрівач, відбувається нагрівання системи. Мінімальні енерговитрати на випаровування води будуть тоді, коли виконується умова $\frac{\rho_{\text{п}}}{\rho_{\text{н}}(T_0)} \cong 1$.

Проведені дослідження кінетики термовакуумного сушіння вологої сировини показали, що мінімальні енергетичні затрати у процесі сушіння визначаються умовою рівноваги між випаровуванням вологи із поверхні продукту і відведенням водяної пари із вакуумного об'єму. Відповідно до розробленого методу обрано напрямок проведення теоретичних і експериментальних досліджень різних промислових термовакуумних установок з метою розроблення та впровадження енергоощадних заходів для сушіння гетерогенних матеріалів.

Для проведення науково-дослідних робіт із термовакуумного сушіння на стенді проведено цикл експериментальних досліджень із низькотемпературного термовакуумного сушіння капілярно-пористих гетерогенних матеріалів, товщиною 2 мм, початковою вологістю 58 %. Зразки, загальною вагою 400 г, завантажувалися у термовакуумну камеру. Сушіння вологого матеріалу відбувалося за температури 313 К (40 °С) і тиску 664 Па, (5 мм рт. ст.). Періодично контрольний зразок добувався із камери для зважування. В міру видалення вологи із висушуваного зразка потреба у зовнішньому тепловому потоці знижувалася, відповідно зменшувалася потужність нагрівального елемента, (рис. 4). Потужність нагрівального елемента на кінцевому етапі сушіння знизилася більше, ніж на порядок. Отже, щоб уникнути великих енерговитрат у процесі сушіння необхідно

зменшувати потужність нагрівального елемента залежно від зміни вологості у висушуваному матеріалі. Також проведено моделювання процесу по видаленню вологості із капілярно-пористого тіла залежно від часу.

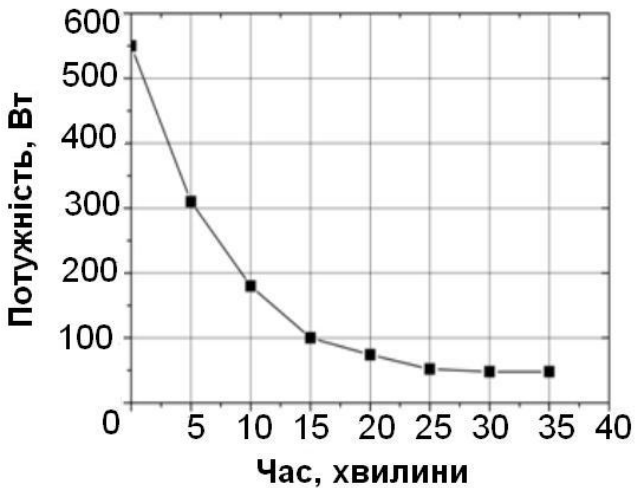


Рис. 4. Зміна потужності нагрівального елемента

переміщення рідкої фази із капілярів на його поверхню і залежить від довжини капіляра і тиску на його кінцях

$$J_k = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi \cdot R_T \cdot T}} \frac{(P_1 - P_2)}{l_k} \cdot r_k \cdot n. \quad (6)$$

До третього періоду сушіння капілярно-пористого тіла відноситься плівковий рух рідини уздовж поверхні капіляра.

$$v_{пл} = \frac{H^2 \cdot (T_2 - T_1)}{l_k \cdot v} \cdot n \cdot \left[\frac{\varepsilon}{2\rho_p} + \frac{2P_H \cdot k}{P_c \cdot \sigma} \right]. \quad (7)$$

Якщо сушіння капілярно-пористого тіла відбувається за атмосферного тиску, то волога, яка адсорбована на стінках капіляра, видалається із капіляра завдяки нагріванню зразка – перший доданок в дужках виразу (7). Під час видалення вологості із капілярно-пористого тіла у термовакуумній установці швидкість плівкового руху рідини у капілярі зростає завдяки різниці тиску на кінцях капіляра – другий доданок виразу (7).

Експериментальні дослідження термовакуумного сушіння на зразку виготовленому із матеріалу ТПВФ-3 показали, що у першому періоді сушіння йде інтенсивне видалення вільної вологості із зразка, це близько 39% від загальної вологості.

(рис. 5). Де $w^c = \frac{m_{заг} - m_1}{m_1}$. У другому періоді сушіння видалається волога, яка

знаходиться у капілярах, це близько 57 % від загальної вологості. Решта вологості (близько 4 %) видалається зі зразка у третьому періоді сушіння, це та волога, яка адсорбована на стінках капілярів. Для видалення вільної вологості із висушуваного зразка знадобилося 20 хв, це близько 17 % від загального часу сушіння. Для видалення вологості, яка перебувала в капілярах, знадобилося 70 хв, це близько 58 %

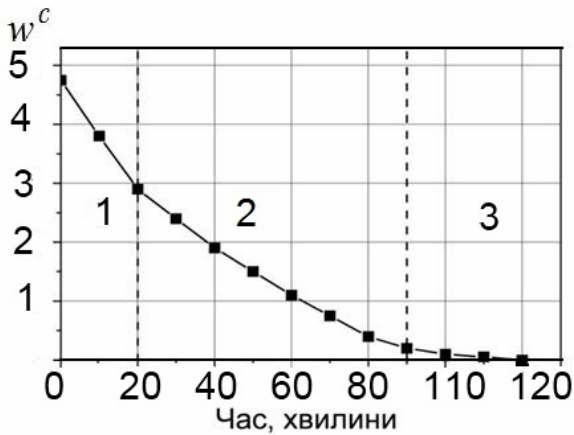


Рис. 5. Зміна вологовмісту w^c у часі: матеріал ТПВФ -3

від загального часу. Для видалення вологи, адсорбованої на стінках капілярів потрібно 30 хв, це близько 25 % від загального часу.

Вільна волога видалялася із висушуваного зразка зі швидкістю 0,185 г/хв. Волога, яка знаходиться в капілярах, вилучалась із висушуваного зразка зі швидкістю 0,077 г/хв. Швидкість видалення адсорбованої вологи зі стінок капіляра, відповідала 0,013 г/хв.

Із проведених науково-технічних досліджень з видалення вологи із капілярно-пористих матеріалів у термовакуумних сушильних установках встановлено, що істотний вплив на вологопровідність

капілярно-пористих систем має розподілення капілярів пористого тіла за розмірами (радіус, довжина капіляра). Фізично це насамперед пов'язано з тим, що в початковий момент сушіння матиме місце випаровування рідини із широких капілярів, а потім із вузьких. Отже, швидкість видалення вологи J_k за заданої різниці тисків ΔP залежить від радіуса капілярів r_k і їх довжини l_k

$$J_k = f(r_k, l_k). \quad (8)$$

Повне випаровування вологи $W_{\Pi}(t)$ із висушуваного матеріалу відбувалось в той самий час, коли випаровується волога \dot{W} із усіх висушуваних зразків за підтримуваного тиску P у вакуумному об'ємі і температурі T_0 , за певний проміжок часу t . Наступала рівновага,

$$W_{\Pi}(t) = \int \dot{W} dt. \quad (9)$$

Із виразів (8, 9) випливає, чим менша довжина капіляра, тим швидше відбувається переміщення рідкої та газоподібної фаз із капілярів на його поверхню. Щоб прискорити процес видалення вологи із капілярно-пористого тіла потрібно під час сушіння його подрібнювати.

Ефективність процесу сушіння в термовакуумних установках, як встановлено, також залежить від кількості підведеної теплоти до висушуваного матеріалу, інтенсивності переміщення вологи у ньому і швидкості відведення вологи із вакуумного об'єму. Все це можна здійснити застосуванням нових методів фізичної обробки вологих матеріалів. Для цього необхідно розробити нові конструкції нагрівальних елементів, які ефективно передаватимуть теплоту у вакуумі від нагрівального елемента до вологого матеріалу. Так як сушити доводиться гетерогенні середовища різної форми, структури, складу, то нагрівальні елементи відрізнятимуться як за функціональним призначенням, так і за конструктивними особливостями виконання. Одночасне нагрівання, вакуумування і подрібнення дозволяє прискорити процес видалення вологи із матеріалу що висушується.

Отримані результати теоретичних і експериментальних досліджень дають можливість створювати енергоощадні, високоефективні, термовакuumні установки різного цільового призначення для сушіння як неорганічної, так і органічної сировини.

У третьому розділі на основі теоретичних і експериментальних досліджень розроблена енергоощадна, високоефективна термовакuumна технологія безперервного сушіння і подрібнення дисперсних матеріалів і створена сушильна установка (рис. 6, а). Установка складалась із бункера-живильника 1, резистивного полого нагрівача 2, який має форму спіралі, шлюзового затвора 7, пульта управління 9, конвеєра, 10, датчика верхнього рівня висушеного матеріалу 14, вакуумметра 15 (рис. 6, б). Розрідження всередині нагрівального елемента створювалось вакуумним водокільцевим насосом 3. Нагрівач з'єднаний через вакуумний трубопровід 4 з циклоном 5, приймачем висушеної сировини 6. Контроль температури нагрівального елемента здійснювалось термопарами 8, висушеного матеріалу термопарою 13. Волога сировина надходила разом з повітрям у трубчастий нагрівальний елемент 2. Всередині нагрівального елемента вологий матеріал за короткий проміжок часу нагрівався до заданої температури і надходив у циклон 5. У циклоні відбувалось поділення пари і висушених твердих частинок дисперсного матеріалу. Із циклона пара через трубопровід 11 і фільтр 12 надходила у вакуумний

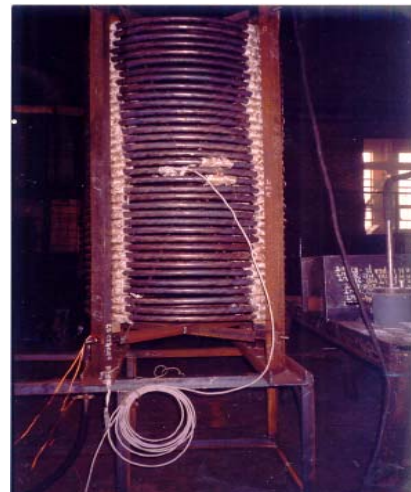
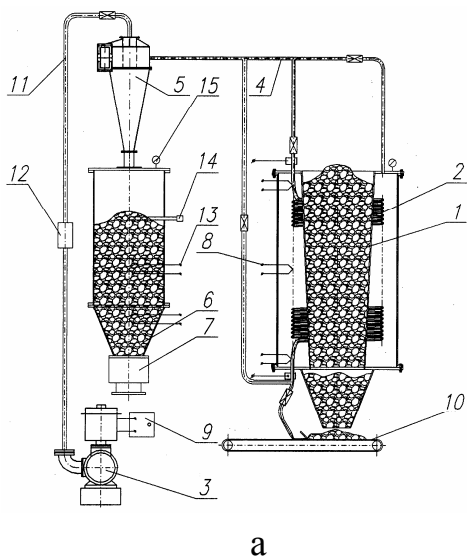


Рис. 6 . Принципова схема(а) та загальний вигляд нагрівального елемента (б) термовакuumної установки

насос 3, а висушений матеріал – у приймач 6. Така конструкція термовакuumної установки забезпечувала високопродуктивне безперервне вакуумне сушіння дисперсних матеріалів. Активний опір електричного нагрівального елемента розраховувався так, щоб можна було забезпечити необхідну потужність електричної енергії для сушіння вологого матеріалу

$$I_H^2 \cdot R_H = I_H^2 \cdot \frac{4 \cdot L_H \cdot \rho_M}{\pi \cdot (d_1^2 - d_2^2)} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5}{t} \quad (10)$$

Під час руху у порожнині нагрівального елемента спіральним каналом на частинку вологого матеріалу впливала відцентрова сила F

$$F = \frac{mv_{\text{ч}}^2}{R} \quad (11)$$

Відцентрова сила притискала частинку вологого матеріалу до стінки нагрівального елемента. Елемент поверхні dS отримував потужний приплив теплоти dQ від стінки нагрівача за короткий проміжок часу Δt

$$dQ = k \cdot \Delta t \cdot dS \quad (12)$$

Температура $T_{\text{ч}}$ у частині тіла під час теплообміну ставала вищою за температуру випаровування води ($T_{\text{ч}} > T_{\text{в}}$). Починався процес інтенсивного пароутворення всередині тіла. У результаті чого тиск всередині частини тіла ставав значно вищим, ніж на поверхні. Надлишок тиску руйнував і подрібнював її. Тіло з масою m за часом змінювалося, тобто маса m була функцією часу t

$$m = m(t) \quad (13)$$

Частинка масою m рухалась всередині спірального нагрівального елемента колом радіусом R . Радіус кола, на якому діяла відцентрова сила, також змінювався з часом, залежно від місця знаходження частинки. Тобто R є функцією часу $R(t)$ (рис. 7).

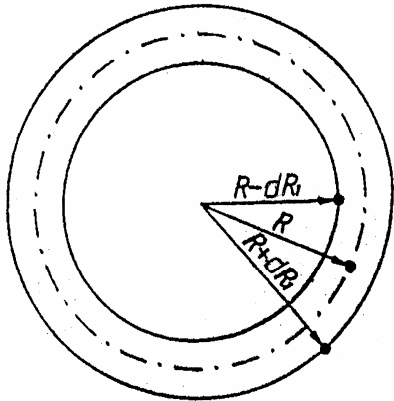


Рис. 7. Схема руху висушуваної частинки в нагрівальному елементі

Радіус відцентрової сили, обмежувався стінками нагрівального елемента

$$R(t+dt) - R(t) = R \pm dR_1 \quad (14)$$

Рухаючись у порожнині нагрівального елемента, частинка втрачала масу, а її швидкість руху збільшувалась. Тоді відбувався приріст відцентрової сили F за нескінченно малий проміжок часу dt . Згідно з другим законом Ньютона нескінченно малий приріст імпульсу має вид

$$d\mathbf{p} = \mathbf{F}_p dt \quad (15)$$

Приріст $d\mathbf{p}$ є зміною імпульсу тіла за нескінченно малий приріст часу

$$d\mathbf{p}(t) = \mathbf{p}(t+dt) - \mathbf{p}(t) \quad (16)$$

Якщо маса dm покидала тіло зі швидкістю \mathbf{v}_1 , тоді

$$\mathbf{p}(t+dt) = (m - dm)(\mathbf{v} + d\mathbf{v}) + \mathbf{v}_1 dm, \quad (17)$$

де $\mathbf{p}(t) = m\mathbf{v}$. Звідси отримуємо

$$m d\mathbf{v} = (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}) dm + \mathbf{F}_p dt, \quad (18)$$

де $\mathbf{v}_1 - \mathbf{v} = \mathbf{v}_q$

Для даної установки одержуємо рівняння руху тіла зі змінною масою

$$m \frac{d\bar{\mathbf{v}}}{dt} = \bar{\mathbf{v}}_q \frac{dm}{dt} + \bar{\mathbf{F}}_p. \quad (19)$$

У міру руху висушуваного матеріалу по спіралі всередині нагрівального елемента частинка втрачає вологу і розсипається на n фрагментів.

Якщо сила тяги $\mathbf{F}_T > \mathbf{F}$, а її вектор скерований у протилежний бік дії відцентрової сили, то частка рухатиметься до протилежної стінки нагрівального елемента. Там вона стикатиметься зі стінкою нагрівача, знову втрачатиме частину маси, утворюватиметься нова сила тяги, яка скерована у бік дії відцентрової сили, тоді $\mathbf{F}_T + \mathbf{F} = \mathbf{F}_p$. Рівнодійна сила збільшуватиметься і частинка попрямує до протилежної стінки нагрівача. Це відбуватиметься до того часу, доки $\frac{dm}{dt} = 0$.

Залежно від фізичних характеристик висушуваного матеріалу і режимних параметрів термовакуумного процесу відбувалась зміна його фізичних, хімічних і механічних властивостей.

Роботу термовакуумної установки проаналізуємо під час виготовлення дрібнодисперсного діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію. Для отримання ефективного і економічного методу виробництва дрібнодисперсного діоксиду цирконію забезпечували подачу гідроксиду цирконію всередину нагрівального елемента разом з повітрям. Експериментально встановлено, що для ефективної подачі гранул гідроксиду цирконію діаметром 4 мм, довжиною 15 мм і вологістю 85 % у нагрівальний елемент із температурою 673 К необхідно, щоб потік повітря був інтенсивністю 1 л на 1,2 г гідроксиду цирконію. Із результатів проведених досліджень встановлено, що швидкість двофазного потоку v_d , котрий забезпечує працездатність даної термовакуумної установки, потрібно визначати так

$$v_d = \frac{\pi \cdot r_n^2 \cdot d_q^2 \cdot P_c \cdot \rho_c \cdot v_B}{2 \cdot \beta \cdot L_H \cdot \eta}. \quad (20)$$

Із результатів науково-технічних досліджень визначено, кількість вологи, що видалається із дисперсного матеріалу у термовакуумній установці під час сушіння, прямопропорційно залежить від потужності нагрівача, температури нагрівання матеріалу, коефіцієнта теплообміну, площі випаровування. Оберненопропорційно – від середнього значення тиску в нагрівальному елементі, кінематичної в'язкості, ударної в'язкості матеріалу, об'єму висушуваного матеріалу

$$m_B = \frac{2(m_{\text{зар}} - m_{\text{п}}) \cdot P_{\text{H}} \cdot T \cdot a \cdot S}{P_c \cdot v \cdot W \cdot V} \quad (21)$$

У виразі (21) розглянемо, як змінюється співвідношення S/V на прикладі об'єкту, який має форму куба. Назвемо це співвідношення геометричним фактором висушуваного зразка і позначимо символом G .

Із результатів, наведених у табл. 1, одержуємо, що зі зменшенням сторони куба геометричний фактор збільшується, а це призводить до підвищення виходу вологи із висушуваного об'єкта. Чим менший розмір висушуваного об'єкта, тим вища швидкість виходу вологи.

Таблиця 1

Зміна геометричного фактору

| Сторона куба, м | Об'єм, м ³ | Площа, м ² | G , м ⁻¹ |
|--------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| $1 \cdot 10^{-2}$ | $1 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^{-4}$ | $6 \cdot 10^2$ |
| $1 \cdot 10^{-3}$ | $1 \cdot 10^{-9}$ | $6 \cdot 10^{-6}$ | $6 \cdot 10^3$ |
| $1 \cdot 10^{-4}$ | $1 \cdot 10^{-12}$ | $6 \cdot 10^{-8}$ | $6 \cdot 10^4$ |
| $1 \cdot 10^{-5}$ | $1 \cdot 10^{-15}$ | $6 \cdot 10^{-10}$ | $6 \cdot 10^5$ |
| $1 \cdot 10^{-6}$ | $1 \cdot 10^{-18}$ | $6 \cdot 10^{-12}$ | $6 \cdot 10^6$ |
| $1 \cdot 10^{-7}$ | $1 \cdot 10^{-21}$ | $6 \cdot 10^{-14}$ | $6 \cdot 10^7$ |
| $1 \cdot 10^{-8}$ | $1 \cdot 10^{-24}$ | $6 \cdot 10^{-16}$ | $6 \cdot 10^8$ |
| $1 \cdot 10^{-9}$ | $1 \cdot 10^{-27}$ | $6 \cdot 10^{-18}$ | $6 \cdot 10^9$ |
| $1 \cdot 10^{-10}$ | $1 \cdot 10^{-30}$ | $6 \cdot 10^{-20}$ | $6 \cdot 10^{10}$ |

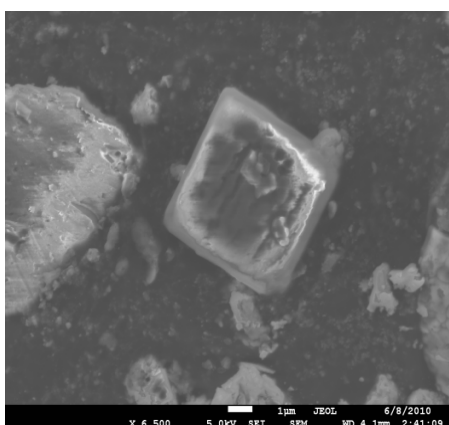


Рис. 8. Дрібнодисперсний порошок діоксиду цирконію

Отже під час проходження гідроксиду цирконію в порожнині нагрівального елемента термовакuumної установки він розпадався на дрібні часточки, що сприяло швидкому видаленню із нього вологи. Гідроксид цирконію перетворювався на діоксид цирконію. Тривалість сушіння вимірювалось секундами завдяки максимальній поверхні випаровування, швидкому нагріванню і зниженому тиску навколишнього середовища. Дрібнодисперсний порошок одержаного діоксиду цирконію показано на рис. 8. При цьому кількість електроенергії, витраченої на отримання дрібнодисперсного діоксиду цирконію

вологістю 0,5 % із гідроксиду цирконію вологістю 85 % за температури 623 К і тиску $1,33 \cdot 10^4$ Па, становила 0,38 (кВт·год)/кг.

Технологічний процес одержання діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію скорочувався у три рази порівняно із існуючим технологічним процесом. Розмір частинок діоксиду цирконію в одержаному порошку становив від 0,7 до 10 мкм.

Отже, у термовакуумній установці, де відбувається сушіння і одночасне подрібнення вологого матеріалу, швидкість сушіння значно прискорюється порівняно із матеріалом, у якого геометричний фактор не змінюється або збільшується. Наприклад, із зменшенням сторони куба в тисячу разів, геометричний фактор зростає у шість тисяч разів, тим самим прискорює процес видалення вологи із висушуваного об'єкта.

Розроблена технологія термовакуумного сушіння охоплює комплекс питань, пов'язаних з конкретними виробничими умовами і об'єктом сушіння, які повинні забезпечити не тільки збереження основних властивостей висушуваного матеріалу, але й поліпшити його якісні показники.

В даний час існує необхідність модернізації процесів підготовки твердого палива до спалювання, особливо бурого вугілля, з метою підвищення ефективності роботи теплоелектростанцій. Для цього буре вугілля пропонується обробляти в термовакуумних сушильних установках, які знижують кількість шкідливих домішок у бурому вугіллі, зменшують споживання теплової енергії на одиницю висушеної продукції. Розроблення і впровадження нових енергозберігаючих теплотехнологічних установок для сушіння та подрібнення вуглецевих матеріалів є важливою і актуальною науково-технічною проблемою, яка вирішується в рамках промислової теплоенергетики.

На новоствореній термовакуумній установці розроблена енергоощадна технологія безперервного сушіння і одночасного подрібнення бурого вугілля. Буре

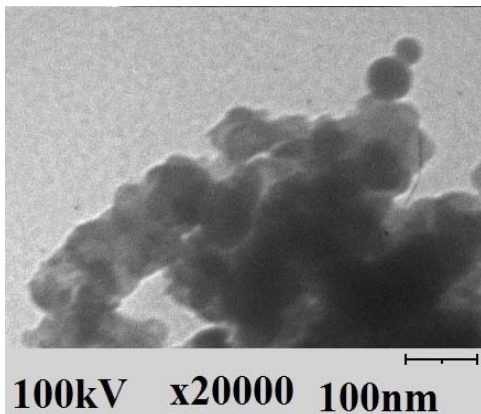


Рис. 9. Нанодисперсний порошок висушеного бурого вугілля

вугілля із початковою вологістю 40% перетворюється в дрібнодисперсний порошок із вологістю менше 1,0% за 14 секунд, мінімальний розмір кристалів 40 нм (рис. 9). Максимальна швидкість руху частинок, що транспортуються у порожнистому нагрівальному елементі, дорівнює 10,0 м/с. Максимальна вагова концентрація бурого вугілля в потоці повітря становить 1,3 кг/м³, що відповідає його об'ємній концентрації у 1,1×10⁻³ м³/м³. Середній тиск у нагрівальному елементі наближено дорівнював 300 мм рт. ст. Температура висушеного бурого вугілля на виході із нагрівального елемента не перевищувала 76 °С, у той же самий час температура нагрівального

елементу досягає 250 °С. Встановлено, що термовакуумний метод дав можливість не тільки сушити і подрібнювати буре вугілля, але й знижувати вміст сірки і азоту у ньому, що призвело до зменшення обсягу шкідливих викидів в атмосферу під час його спалювання. Сушіння бурого вугілля відбувалось рівномірно, його колір змінювався з бурого на чорний. Однопрохідна безперервна технологія виключає спеціальну операцію подрібнення сирцю і продукувала високоякісне дисперсне

паливо з підвищеною теплотворною здатністю. При цьому кількість електроенергії, витраченої на отримання дрібнодисперсного бурого вугілля вологістю менше за 1% із сировини з вихідною вологістю 40% за температури нагрівального елемента 250°C і середнього тиску навколишнього середовища 300 мм рт. ст. становила 250 кВт год./т. Питомі енерговитрати теплоти на 1 кг випареної вологи скоротились у 2 рази порівняно із барабанными сушарками.

Отже, аналізуючи механізм впливу на досліджуваний об'єкт під час сушіння, можна виявити взаємозв'язок між чинниками які визначають динаміку сушіння, розмір, структуру вологого матеріалу і технічними характеристиками термотехнологічного обладнання.

Таблиця 2

Сушіння бурого вугілля у термовакuumній установці

| Параметр | Значення | | | | Діапазон |
|--|----------|------|--------|---------|-----------------------------------|
| Вологість бурого вугілля, % | 40 | 20 | 4 | 0,8 | (40...0,8)% |
| Температура бурого вугілля, °C | 20 | 40 | 67 | 76 | (20...76)°C |
| Час сушіння, с | 0 | 5 | 10 | 14 | (0...14) с |
| Тиск, мм рт. ст. (оточеному просторі) | 760 | 420 | 250 | 120 | (760...120) мм рт. ст |
| Розмір частинок бурого вугілля, мм | 6 | 0,01 | 0,0001 | 0,00004 | (мм...нм) |
| Швидкість руху бурого вугілля в нагрівальному елементі, м/с | 0 | 5,0 | 7,0 | 10,0 | (0...10) м/с (7,3 середня) м/с |
| Вага бурого вугілля в потоці повітря, г/л | 0 | 13 | 13 | 13 | (0...13) г/л |
| Потужність нагрівача, кВт | 4 | | | | 4 кВт |
| Продуктивність вакуум. насосу, м ³ /год. | 180 | | | | 180 м ³ /год |
| Аспіраційні втрати, м ³ /годину | 150 | | | | 150 м ³ /год |
| Потужність вакуум. насосу, кВт | 6 | | | | 6 кВт |
| Потужність установки, кВт | 10 | | | | 10 кВт |
| Продуктивність, установки, кг/годину | 40 | | | | 40 кг/год |
| Затрати електроенергії, (кВт година)/т | 250 | | | | 250 (кВт год)/т |
| Довжина нагрівального елемента, м | 100 | | | | 100 м |
| Діаметр внутрішньої порожнини нагрівального елемента, м | 0,024 | | | | 0,024 м |
| Радіус спіралі нагрівального елемента, м | 0,5 | | | | 0,5 |
| Питома витрата тепла на 1 кг випареної вологи, кДж/кг | 2250 | | | | 2250 кДж/кг |
| Температура нагрівального елемента, °C | 250 | | | | 250 °C |
| Кількість повітря, котре надходить в полий нагрівальний елемент, л/с | 8,3 | | | | 8,3 л/с |

Комп'ютерне моделювання процесу видалення вологи із бурого вугілля в термовакuumній установці показало, що швидкість виходу вологи із дисперсного матеріалу має експоненціальну залежність від часу і лінійно залежить від розміру частинки (рис. 10). Отже, щоб прискорити процес сушіння вологого дисперсного

матеріалу необхідно його подрібнювати.

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено енергоефективний метод термовакуумного сушіння відходів деревообробної промисловості. Час проходження тирси нагрівальним елементом становить до 20 секунд. Процес сушіння був безперервний. Кількість електричної енергії, витраченої на сушіння тирси до вологості 1% з початкової вологості 70%, становив 370кВт·год/т.

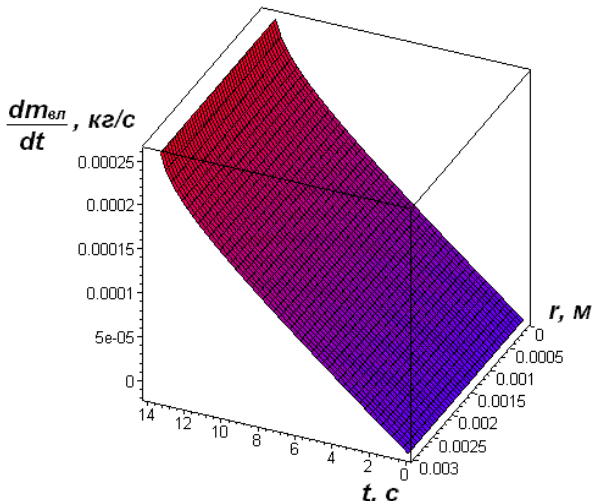


Рис. 10. Процес сушіння і подрібнення бурого вугілля

У четвертому розділі проведено науково-технологічне обґрунтування тепломасообмінних енергоефективних процесів сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів.

Тривалість процесу сушіння і якість висушених великогабаритних капілярно-пористих матеріалів, загалом, залежать від швидкості просування вологи із товщі матеріалу до її поверхні і видалення вологи із поверхні у навколишній простір. Під час нагрівання тиск у капілярах росте пропорційно кореню квадратному із абсолютних температур

$$\frac{P_1}{\sqrt{T_3}} = \frac{P_2}{\sqrt{T_4}}, \quad (22)$$

звідки

$$P_2 = \frac{P_1 \sqrt{T_4}}{\sqrt{T_3}} \quad (23)$$

Підставимо значення тиску P_2 із виразу (23) у вираз (6). Після деяких проведених перетворень одержимо швидкість просування вологи у капілярі пов'язану зі зміною температури і тиску водяної пари на її поверхні

$$\bar{J}_k = \frac{8}{3} \sqrt{\frac{M}{2\pi \cdot R_g \cdot T}} \cdot \frac{P_1 (\sqrt{T_3} - \sqrt{T_4})}{\sqrt{T_3} \cdot l_k} \cdot r_k \cdot n. \quad (24)$$

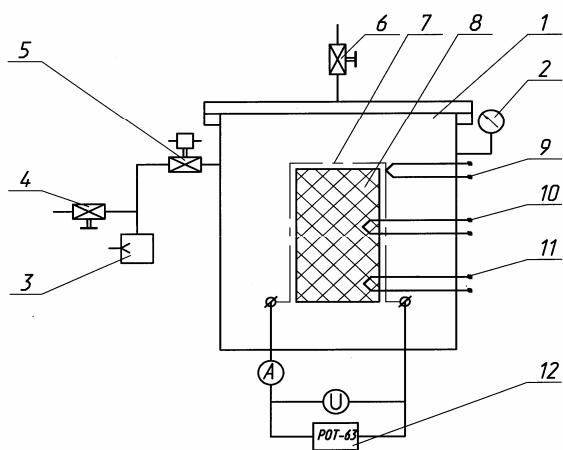
Коли $T_3 = T_4$, потік пари із висушуваного матеріалу дорівнює 0, тобто $\bar{J}_k = 0$. За зниженні тиску у навколишньому просторі та відсутності підігрівання капілярно-пористого матеріалу процес випаровування вологи сповільнюється, температура тіла знижується, T_3 . Якщо $T_3 \ll 0$, виникає процес сублімаційного сушіння. Із збільшенням температури $T_3 > T_4$ відбувається нагрівання всієї системи завдяки зовнішньому джерелу теплоти. Отже, необхідно підтримувати температуру поверхні великогабаритних капілярно-пористих матеріалів на рівні температури кипіння води за відповідного тиску.

В основу технології сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів закладений принцип дискретного режиму сушіння. Ефективний час видалення вологи із великогабаритних капілярно-пористих матеріалів у сушильній вакуумній камері тривав до моменту коли настає рівноважний стан у поверхневому шарі, тобто

$$P_1 \cdot \sqrt{T_4} = P_2 \cdot \sqrt{T_3} . \quad (25)$$

Це ускладнювало необхідне передавання теплової енергії до внутрішніх зволжених шарів і перешкоджало подальшому видаленню вологи із внутрішніх шарів на поверхню. У цей час нагрівання матеріалу і відкачування з вакуумного об'єму припинялось. Відбувався природний процес рівномірного розподілення вологи по всьому об'єму. Через деякий час поверхневий шар зволожувався і рівноважний стан у поверхневому шарі порушувався, вираз (25). Висушуваний матеріал міг знову піддаватися вакуумному сушінню.

Для розроблення термовакuumного методу сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів була спроектована термовакuumна установка, яка має вакуумний об'єм 1, вакуумметр 2, пульт управління 3, вакуумні затвори 4,5,6, нагрівальний елемент 7, датчики температури 9,10,11, блок живлення 12 (рис. 11а). Загальний вигляд установки сушіння великогабаритного сирцю хромоксидного блоку показано на рис. 11 б. У вакуумній камері 1 розміщувався хромоксидний блок 8, який щільно обмотувався електричним нагрівачем 7, виготовленим із вуглецевої тканини і тим самим створювалась оптимальна умова для його нагрівання. Сушіння сирцю хромоксидних вогнетривів тривав за температури (30...60) °С і тиску у вакуумній камері не вище 10 мм рт. ст. Структура тіла хромоксидного блоку є



а)

б)

Рис. 11. Схема (а) та загальний вигляд (б) термовакuumної установки сушіння хромоксидних блоків

капілярно-пористою, масою 80 кг, розміром 460×210×210 мм, а початкова вологість становила 7 %. Вироби сирцю хромоксидних вогнетривів піддають сушінню до залишкової вологості не більше 0,5 %. Під час проведення численних

експериментальних досліджень із термовакuumного сушіння сирцю хромоксидних

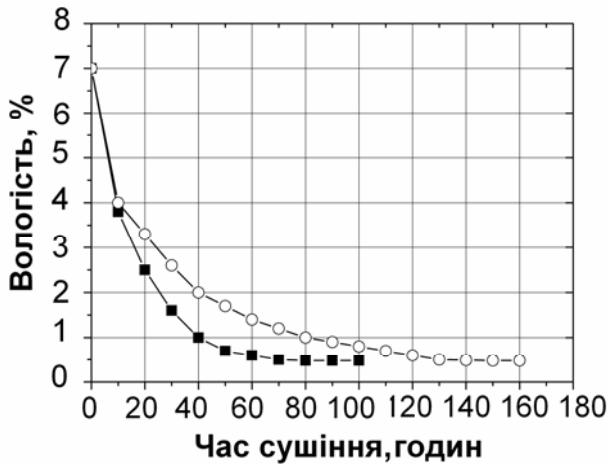


Рис. 12. Видалення вологи із хромоксидного блоку:

- – дискретний режим;
- – безперервний режим

знижувалась швидкість видалення рідини із висушуваного об'єкту. У цей час сушіння необхідно зупинити. Волога, яка залишилася в керамічному блоці, починала розповсюджуватися у всьому об'ємі – зволожувала поверхневий шар. І за подальшого включення термовакuumної сушильної установки волога інтенсивно виходила із висушуваного об'єкту до того часу, поки поверхневий шар знову не висихав.

Для порівняння, сушіння сирцю хромоксидних виробів конвективним методом відбувалось за 60 діб.

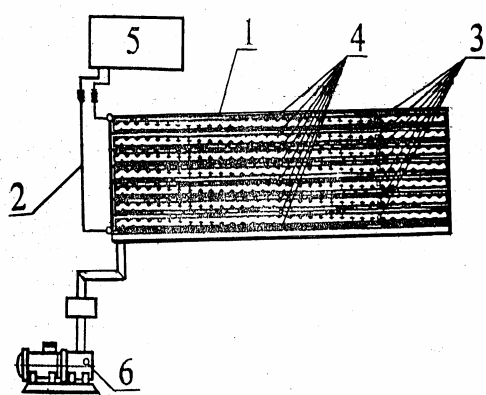
Новостворена технологія термовакuumного сушіння хромоксидних виробів прискорила процес сушіння у 18 разів порівняно із сушінням конвективним методом. Енерговитрати знизились у 2,5 рази на одиницю видаленої вологи порівняно з існуючим технологічним процесом, який використовувався на підприємстві «УкрНДІВ» імені А.С.Бережного, м.Харків. Межа міцності за стискання зразків, висушених конвективним методом, становить 2,2...2,7 МПа, а для зразків, висушених за термовакuumною технологією становить 2,5...2,8 МПа. Кінцева вологість висушеного виробу сягає 0,48 %. Хромоксидні вироби, висушені в термовакuumній установці, випалювались за температури 1873 К. Після випалу хромоксидні вироби не мали тріщин та інших дефектів, відрізнялися високою міцністю і технологічністю за подальшої обробки.

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено метод термовакuumного сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів, який продемонстровано на прикладі видалення вологи із деревини. Сушіння деревини є одним із найдорожчих, тривалих і енергоємних технологічних процесів. В умовах інтенсивного розвитку деревообробної промисловості проблеми сушіння деревини зростають. На даний час для сушіння деревини найбільшого поширення набув конвективний метод, за якого сушильним агентом використовується водяна пара, гаряче повітря або суміш повітря із топковими газами. Дані камери споживають багато теплової енергії, температура нагрівання

виробів було встановлено, що волога інтенсивно видалається із виробу, коли термовакuumна установка працює в дискретному режимі (рис. 12). Сушіння хромоксидних вогнетривів під час дискретного режиму відбувалась за 80 годин, а в безперервному – за 150 годин. Дискретний режим збільшував швидкість сушіння хромоксидного блоку в 1,9 рази порівняно із сушінням аналогічного виробу у безперервному режимі. Така різниця у часі пов'язана зі зміною структури поверхневого шару. У процесі сушіння на поверхні хромоксидного блоку утворювався сухий поверхневий шар, наставав рівноважний стан у поверхневому шарі у зв'язку з чим

деревини перевищує 373 К (100 °С), сушка твердих порід деревини доходить до 45...60 діб, якість висушеної продукції низька. Особливо невисока якість сушіння пиломатеріалів із деревини твердих порід, в яких дефекти (тріщини і викривлення) досягають 40 %. Зростаюча вартість енергоресурсів призвела до необхідності підвищення ефективності сушіння деревини.

На даний час установки для сушіння деревини виготовляють із металу, які є громіздкими і дорогими. Для спрощення конструкції установки і її здешевлення стінки вакуумної сушильної камери запропоновано виготовляти із еластичного, міцного матеріалу. Штабель дошок 3 потрібно розміщувати у пакеті 1, виготовленому із еластичного матеріалу (рис. 13, а). Загальний вигляд установки наведений на рис. 13, б. Кожен шар дошки прокладали нагрівальним елементом 4, який через фідер 2 з'єднували із джерелом електричного струму 5. Безпосередній контакт із нагрівачем покращував перенесення теплоти від нагрівального елемента до пиломатеріалу, це призводило своєю чергою до економії електроенергії. Під час вакуумування камери, за допомогою вакуумного насоса 6, під дією атмосферного тиску оболонка тисне на пиломатеріал із зусиллям близько 10000 кг/м², що дозволяло уникнути деформацій пиломатеріалу під час сушіння. Також створювались умови для ефективного теплообміну між нагрівальними елементами та пиломатеріалом. Під час вакуумування камери і досягнення тиску у вакуумній камері (37...7,5) мм рт. ст. температура кипіння води становила від 306 К (33 °С) до 280 К (7 °С). Низькотемпературний технологічний процес сушіння покращував



а



б

Рис. 13 . Схема (а) та загальний вигляд (б) термовакuumної установки сушіння деревини із еластичною оболонкою

якість висушеної деревини і дозволяв використовувати для вакуумної камери матеріал, наприклад, поліетилен. Заощадив додатково біля 30 % електроенергії. Розроблений режим сушіння забезпечив отримання високоякісних матеріалів із заданою вологістю. Тріщини і викривлення відсутні. У термовакuumних сушильних установках температура нагрівання деревини не перевищувала 333 К (60 °С).

Якщо порівняти дві термовакuumні сушильні установки із металевою оболонкою і поліетиленовою, то є суттєва перевага термовакuumної сушильної установки з еластичною оболонкою. Камера із еластичною оболонкою коштувала значно дешевше завдяки меншій металоємності і простоті у виготовленні. Під час

термовакuumного сушіння тривалість процесу, порівняно із конвективними сушильними камерами, скорочувалась у 1,5 рази. Вакуумна сушильна установка може використовуватися для сушіння деревини різних порід, товщини і довжини. Час сушіння соснових дошок товщиною 50 мм, шириною 0,2 м і довжиною 6 м, початковою вологістю 65 %, становив біля 96 годин до вологості 6 %. Максимальна температура нагрівання пиломатеріалів 323 К, тиск у сушильній камері $26,6 \cdot 10^2$ Па. Сушіння дуба вологістю 65 % за таких самих параметрів сушіння, що й сосни, здійснювався за 480 годин.

Новий підхід до технології сушіння габаритних капілярно-пористих матеріалів дозволив внести значний вклад у розвиток науково-технічної проблеми сушіння дисперсних матеріалів.

У п'ятому розділі проведено теоретичні і експериментальні дослідження, що дозволило розробити енергоощадну термовакuumну технологію сушіння паперової ізоляції електричних кабелів різної модифікації.

Під час виготовлення електричного кабелю на кожну жилу накладається ізоляційний папір. Початкова вологість паперової ізоляції становить 6-8 %. Для проведення сушіння паперової ізоляції кабель укладали у металевий кошик (рис.14). Кошик з кабелем розміщували у вакуумній сушильній камері (рис. 15). У кожній вакуумній камері вміщали два кошика. З метою виконання поставлених вимог до технологічного процесу сушіння паперової ізоляції була проведена модернізація вакуумно-сушильної установки на ПАТ завод «Південкабель». Для цього визначили кількість водяної пари, яка виділяється під час сушіння паперової ізоляції електричного кабелю, підібрали продуктивність вакуумного водокільцевого насосу і



Рис14. Кошик із кабелем



Рис. 15. Вакуумний об'єм

розрахували пропускну здатність вакуумного трубопроводу, який здатний забезпечити необхідну швидкість відкачування водяної пари із вакуумного об'єму сушильної камери

$$V_{\text{еф}} = \frac{V_p U_B}{V_p + U_B} \quad (26)$$

Розроблена нова схема, з'єднання вакуумного об'єму із вакуумним насосом вакуумними трубопроводами, значно скоротила час сушіння, збільшила ефективність відкачування водяної пари із вакуумного об'єму, знизила споживання

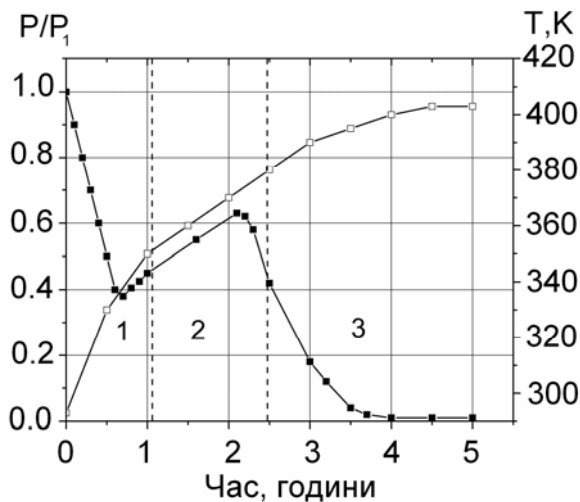


Рис.16. Термовакuumне сушіння ізоляції електричного кабелю:
 □ – відношення тиску у вакуумній камері в залежності від часу сушіння; ■ – зміна температури паперової ізоляції залежно від часу сушіння;
 P_1 – початкове значення тиску;
 P – поточне значення тиску

електроенергії. У початковий момент сушіння ізоляції відбувалось відкачування вакуумного об'єму і нагрівання паперової ізоляції кабелю. Тиск у вакуумному об'ємі знижувався, а температура ізоляції зростала, період 1 (рис. 16). У цей період технологічного процесу переважала робота вакуумного насоса. Через певний час кабель нагрівався, починалось інтенсивне випаровування вологи. Тиск у вакуумній камері зростає, період 2. У цей час сушіння паперової ізоляції домінував нагрівач. Інтенсивне пароутворення у вакуумному об'ємі під час сушіння паперової ізоляції проходило від 0,7 до 2,2 годин від початку нагрівання кабелю. На кінцевій стадії сушіння, період 3, виконувалась умова $\frac{\rho_{п}}{\rho_{н}(T_0)} \cong 1$, за якої здійснювались мінімальні енергозатрати на видалення водяної пари із вакуумного об'єму. У цей час включали вакуумний насос меншої потужності.

Новостворений термовакuumний метод порівняно із методом, який використовувалася на ПАТ завод «Південкабель», дозволив удосконалити технологічний процес сушіння паперової ізоляції кабельних виробів, скоротити час сушіння у 2,5...3 рази, усунути брак кабельної продукції та зменшити енергетичні витрати більш, ніж у 2 рази. Тривалість сушіння паперової ізоляції електричних кабелів у термовакuumній установці скорочено на 5,5 – 8 годин (табл. 3). Кінцева вологість ізоляції кабельної продукції не перевищувала 0,1 %.

Таблиця 3

Тривалість термовакuumного сушіння паперової ізоляції електричних кабелів

| Переріз жили кабелю, мм | Довжина кабелю, км | Час сушіння, годин (новий метод) | Час сушіння, годин (старий метод) | Скорочення тривалості циклу сушіння, годин |
|-------------------------|--------------------|----------------------------------|-----------------------------------|--|
| 3×50 | 5,0 | 3,5 | 9 | 5,5 |
| 3×70 | 4,0 | 4,0 | 12 | 8,0 |
| 3×120 | 3,0 | 4,0 | 12 | 8,0 |

Сушіння силових кабелів із паперовою ізоляцією вимагає великого споживання теплової енергії. Для нагрівання паперової ізоляції під час сушіння застосовувався електричний струм, що протікав жилами кабелю, котрий вироблявся мотор-генератором. Максимальний струм, який міг дати мотор-генератор, 500 А. Застосування генераторів постійного струму призводить до наявності магнітного поля (вище 40 кЕ) у просторі біля вакуумного об'єму, що негативно позначалося на здоров'ї обслуговуючого персоналу, так як кабель являє собою соленоїд із великою

кількістю витків. Щоб покращити екологію на ділянці сушіння паперової ізоляції електричних кабелів, необхідно було знизити до нуля напруженість магнітного поля, не порушивши технологічний процес, і прибрати негативний вплив магнітного поля на організм обслуговуючого персоналу. Для нагрівання електричного кабелю із паперовою ізоляцією на базі регулятора однофазного тиристорного (ТОТ) спроектовано і впроваджено у виробництво на заводі «Південкабель» джерело живлення із максимальним струмом 1800 А, що дозволило виготовляти кабель у паперовій ізоляції із перетином жили до 800 мм². Також була розроблена схема підключення жил кабелю до тиристорного джерела живлення (рис. 17). За такого підключення до джерела живлення струм, що протікає жилами кабелю, згідно з правилом Кірхгофа, компенсувався. У зв'язку з чим магнітне поле біля вакуумного об'єму зникало.

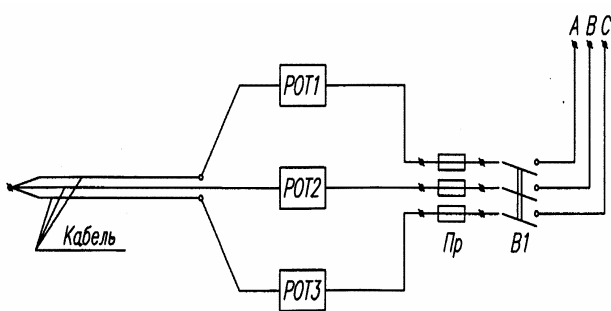


Рис.17. Схема підключення жил кабелю до джерела живлення

Розроблена і введена в експлуатацію система управління технологічним процесом сушіння паперової ізоляції. Система управління дозволила: автоматично вимірювати температуру нагрівання паперової ізоляції, реєструвати тиск у вакуумному об'ємі, визначати щільність струму в жилах кабелю і тривалість технологічного процесу. Опції діалогового режиму забезпечили оперативний зв'язок між обслуговуючим персоналом і технологічним процесом за допомогою панелі оператора. На екрані панелі оператора відображається мнемосхема технологічного процесу сушіння паперової ізоляції, графіки зміни температури і струму в жилах кабелю, тиск у вакуумному об'ємі. Значення температури, струму, тиску роздруковуються у вигляді протоколу. Система сигналізує про несправності у роботі устаткування і відхиленнях контрольованих параметрів від заданих значень, що дозволило вести статистичне оброблення різних технологічних процесів термовакуумного сушіння ізоляції електричних кабелів.

Новостворена термовакуумна установка прискорила процес сушіння ізоляції електричних кабелів, підвищила оперативність управління технологічним процесом, усунула магнітне поле навколо вакуумного об'єму, покращила умови праці обслуговуючого персоналу, підвищила культуру виробництва, знизил енерговитрати і забруднення навколишнього середовища, менше займає виробничої площі, збільшила пропускну здатність ділянки сушіння електричних кабелів у паперовій ізоляції, дозволила виробляти кабель із перерізом струмопровідної жили до 800 мм², замість раніше існуючого обмеження до 240 мм².

У шостому розділі показані можливості термовакуумного методу сушіння термолабільних матеріалів. Цей метод продемонстрований на безперервному сушінні зерна ячменю. Зерно надходило у внутрішню частину нагрівального елемента разом із повітрям (див. рис. 6, б). Під час проходження вологого зерна у порожнині нагрівача за 15 с зерно знаходилось у контакті із нагрівачем. Відбувалось

рівномірне його нагрівання завдяки тепловій енергії нагрівача до температури 323 К. Перший член чисельника виразу (27).

$$\frac{dm_2}{dt} = \frac{k \cdot S \cdot (T_H - T_B) - (c_1 \cdot m_1 + c_2 \cdot m_2) \frac{dT}{dt}}{r} \quad (27)$$

За час проходження зерна порожниною нагрівального елемента його вологість знижувалась на 2 % (рис. 18). Згідно з виразом (5) у цей час домінував нагрівач

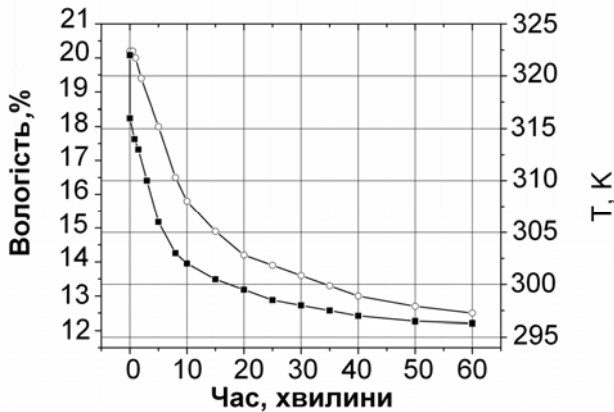
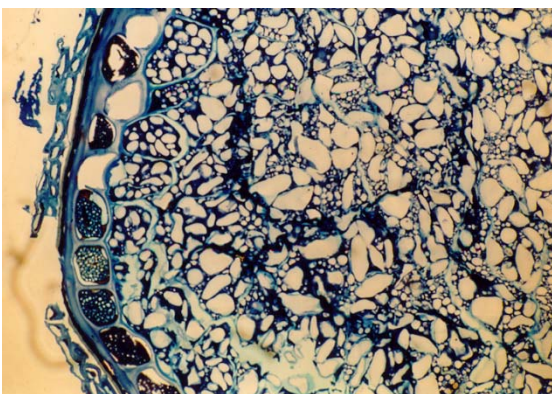


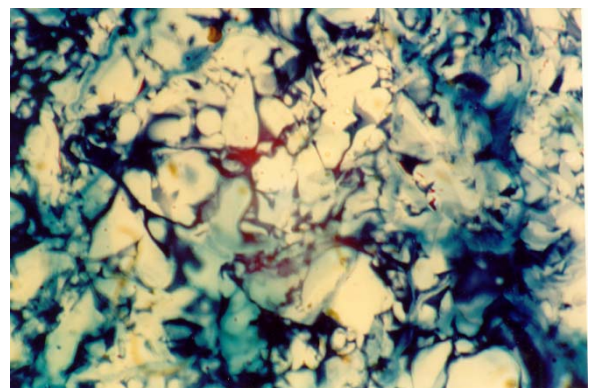
Рис. 18. Термовакuumний процес сушіння зерна. Зміна вологи (■), температури (○)

$\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{H}(T_0)} > 1$, який нагрівав зерно до заданої температури. Нагріте зерно потрапляло у вакуумний бункер-накопичувач. У цей час, згідно виразу (5), домінувала робота вакуумного насоса $\frac{\rho_{\Pi}}{\rho_{H}(T_0)} < 1$. У бункері вологе зерно продовжувало висихати завдяки накопиченій тепловій енергії, яку одержало під час перебування в нагрівальному елементі, другий член виразу (27). Через 50 хвилин його вологість становила близько 12 %. За цей час

температура зерна знижувалась до 297 К (20 С). Низькотемпературний режим сушіння зерна зберігав поживні речовини, зерно залишалось життєздатним, непошкодженим і повністю зберігало цілісність клітин (рис. 19, а). За підвищення температури сушіння $T \geq 343$ К життєздатні клітини зерна гинуть, і таке зерно може використовуватися тільки як фуражне (рис. 19, б).



а



б

Рис. 19 . Структура висушеного зерна:

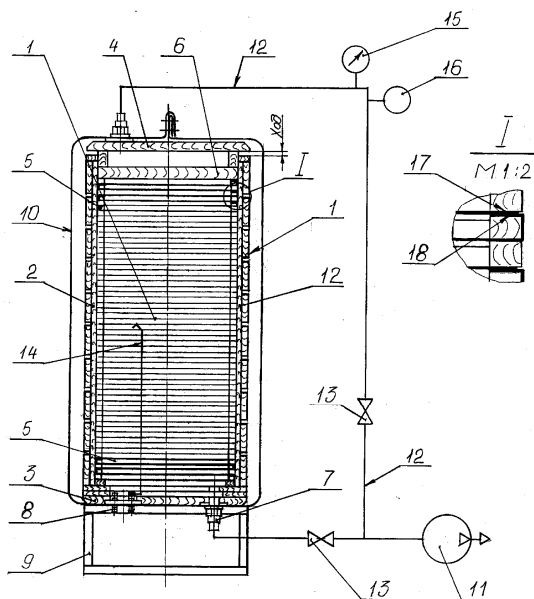
а – температура сушіння $T=323$ К (50 °С); б – температура сушіння $T=343$ К (70 °С)

Спосіб термовакuumного сушіння не несе забруднення для навколишнього середовища і безпосередньо зерна. Для порівняння – сушіння зерна із початковою вологістю 20 % висихає до вологості 12 % конвективним методом за 9 годин, що майже у 10 разів повільніше в порівняно із термовакuumним методом сушіння.

Із аналізу результатів досліджень з сушіння зерна зазначимо, що запропонований термовакуумний метод і розроблене обладнання задовольняє вимоги, які пред'являються до зерносушильних агрегатів, і має крім цього ряд переваг порівняно із традиційними способами сушіння та існуючими зерносушарками. У термовакуумній установці прискорюється процес сушіння завдяки підвищенню інтенсивності випаровування вологи за зниження тиску; знижується температура сушіння, зерно під час сушіння не підгорає, не розтріскується, контроль за температурою висушуваного зерна відбувається із точністю ± 1 К, що виключає можливість його перегрівання. Зерно під час сушіння очищається від легких домішок і комах.

Впровадження нових термовакуумних методів сушіння зерна підвищило ефективність роботи зерносушильного устаткування, зменшило час сушіння, покращило якість висушеного продукту.

У цьому розділі показані технологічні можливості термовакуумної сушильної установки на прикладі сушіння біологічної продукції. Для розроблення режимів вакуумного сушіння біологічних об'єктів створена лоткова термовакуумна установка. Схема установки показана на рис. 20, а. Робоча камера складалась із дерев'яного корпусу 1 (див. рис. 20, б). Корпус мав три стінки 2 і дно 3, знімну



а



б

Рис. 20. Схема (а) та загальний вигляд (б) лоткової термовакуумної сушильної установки

кришку 4. Лотки 5 встановлювались у робочу камеру один на одного. Тиск у вакуумній камері підтримувався 20...10 мм рт. ст. Дно лотка є нагрівальним елементом. Нижня частина 3 корпусу 1 оснащена вакуумним патрубком 7 і струмовводом 8. Робоча камера встановлена на підставку 9. Вакуумна оболонка 10 корпусу 1 виготовлена із міцного, тонкого, еластичного, вакуумно-щільного матеріалу. Розрідження у робочій камері створювалось водокільцевим насосом 11. Відкачування газів і водяної пари здійснювалось через вакуумний трубопровід 12 і

вакуумну запірну арматуру 13. Установка мала систему контролю температури 14, тиску 15, 16.

Під час відкачування повітря із сушильної камери поліетилен 10 під дією атмосферного тиску щільно облягав корпус 1 і кришку 4, а через прокладку 6 тиснув на лотки 5, створюючи під час цього надійний електромеханічний контакт між нагрівальними елементами 17, 18. Кількість сировини, призначеної для сушіння, становила 35 кг. На даній установці проводилось розроблення технології сушіння біологічної продукції залежно від тиску і температури. Нагрівальний елемент уявляв собою перфорований лист із нержавіючої сталі, який загинався і закривав бічну і верхню межу однієї з планок рамки лотка (рис. 21). Лоток складався із рамки 1, нагрівального елемента 2, в якому містились отвори 3. Рамку 1 виготовили із

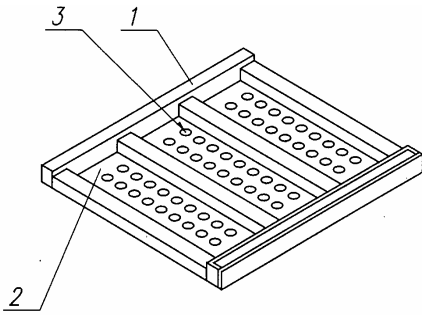


Рис. 21. Схема лотка термовакuumної установки

діелектричного матеріалу, наприклад, сухого дерева або харчової пластмаси. До рамки лотка знизу прикріпили нержавіючий перфорований лист, який утворював дно лотка і був одночасно нагрівальним елементом 2. Перфорація 3 забезпечила ефективне видалення пари з міжлоткового простору, а також збільшила електричний опір нагрівального елемента. Піддони такої конструкції можна збирати у штабель довільної висоти. Задаючи форму, розміри і взаєморозташування перфораційних отворів, можна ефективно регулювати виділення теплоти по площині піддону і тим самим вирівнювати температурне поле із заздалегідь заданою точністю.

Струм, що проходив через поперечний переріз лотка, нагрівав його. Щільність струму – векторна величина, модуль якої дорівнює $\bar{J} = \frac{dI}{dS}$.

На розробленій термовакuumній установці проведено цикл експериментальних досліджень із низькотемпературного вакуумного сушіння біологічної продукції, вивчено вплив тиску, температури на якість висушеної сировини. Отримано аналітичне рівняння, що описує режим роботи термовакuumної сушильної установки

$$\bar{M}_{\text{пр}}(\bar{t}) = \bar{M}_r + (1 - \bar{M}_r) e^{-\bar{t}a}, \quad (28)$$

де $\bar{M}_{\text{пр}}(\bar{t}) = \frac{\bar{M}_{\text{пр}}}{\bar{M}_{\text{пр.поч}}}$ – безрозмірне відносне значення поточної маси продукту

у процесі сушіння; \bar{M}_r – безрозмірна маса сухого залишку; $\bar{M}_{\text{пр.поч}}$ – початкова маса невисушеного продукту; \bar{t} – безрозмірний час; a – апроксимуючий коефіцієнт $= 1,274$.

Склавши апроксимаційний прогноз функціонального значення показника масової вологості продукту $\Psi_{W(\text{ан})}$, оцінюємо зміну її щільності у процесі сушіння, використовуючи вираз

$$\bar{\rho}_{\text{пр}} = \frac{\bar{\rho}_r}{1 - (1 - \bar{\rho}_r) \psi_{W(\text{ан})}}, \quad (29)$$

де $\bar{\rho}_{\text{пр}} = \frac{\rho_{\text{пр}}}{\rho_W}$ і $\bar{\rho}_r = \frac{\rho_r}{\rho_W}$ – відносна щільність продукту і його сухого залишку;

ρ_W – щільність вологої складової, яка близька за величиною до щільності води.

У наведеній залежності важливу роль грає величина маси сухого залишку M_r і його об'єму V_r , які визначили експериментально. Так, достовірне значення

$\bar{M}_r = \frac{M_r}{M_{\text{пр.поч}}}$ дає можливість оцінити кінцеву величину показника масової

вологості продукту шляхом зважування останнього до і після сушіння за формулою

$$\psi_{W \text{ кін}} = 1 - \frac{\bar{M}_r}{M_{\text{пр.кін}}/M_{\text{пр.поч}}}. \quad (30)$$

Отримані аналітичні залежності дозволяють оцінювати величини масоперенесення всередині висушеного матеріалу, використовуючи усереднені експериментальні дані за всією висушеною масою.

Для вивчення тканини біологічного об'єкта застосовували електронну мікроскопію, що дозволило розглянути будову клітини до і після сушіння і визначити, як впливає температура на структуру клітини. Під час термовакуумного сушіння за температури 313 К (40 °С) висушені зразки біологічної продукції практично не відрізнялися від початкових, збереглася цілісність клітин. Підвищення температури вакуумного сушіння до 333 К (60 °С) збільшило швидкість випаровування води, але у той самий час спостерігалось потоншення мембрани клітини без порушення її цілісності. Під час вакуумного сушіння за температури 353 К (80 °С) відбувалось руйнування клітин.

Також вивчалися втрати вітаміну С у біологічній продукції за різних температурних режимів термовакуумного сушіння (табл. 4).

Таблиця 4

Втрати вітаміну С в біологічній продукції від температури сушіння в термовакуумній установці

| Температура сушіння, К | Вихід вітаміну С, % |
|------------------------|---------------------|
| 353 | 31,5 |
| 343 | 28,5 |
| 333 | 23,5 |
| 323 | 00,0 |

Отримано зразки із вологістю 6 % зі збереженням вітамінів, ферментів, екстрактивних речовин, кольору, запаху, смаку.

Проведені дослідження показали, що найоптимальнішим, з погляду збереження біологічних властивостей висушеного продукту у термовакуумній установці, виявився режим роботи за температури до 50 °С.

Вивчено зміну вологості біологічних середовищ залежно від тиску у термовакуумній камері (табл. 5).

Таблиця 5

Швидкість сушіння у залежно від тиску у сушильній камері термовакуумної установки

| Час сушіння, хв | Температура сушіння, К | Тиск у вакуумній камері, кПа | Залишкова вологість, % |
|-----------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| 40 | 323 | 2,66 | 7,2 |
| 40 | 323 | 26,6 | 9,1 |
| 40 | 323 | 66,5 | 12,7 |

Наукові дослідження з видалення води із біологічної продукції дали змогу вивчити термотехнологічні процеси у термовакуумній сушильній установці, визначити температуру, тиск і час сушіння. Встановлено, що термовакуумна технологія дозволяє сушити біологічні об'єкти за температур коли неможливі деструктивні та біохімічні зміни. З метою економії витрат теплової енергії можна використовувати термовакуумні сушильні установки, в яких застосовується сонячний колектор. Застосування такої установки знизить енергетичне навантаження під час експлуатації і значно здешевить собівартість одержаного продукту.

ВИСНОВКИ

У дисертації наведено теоретичне узагальнення та новий підхід до вирішення актуальної науково-технічної проблеми підвищення енергоефективності промислових термовакуумних установок для сушіння вологих матеріалів з різноманітними структурними і теплотехнологічними характеристиками. Рішення даної проблеми пов'язано з розробленням і удосконаленням теплотехнологічних систем і енергоощадного устаткування термовакуумних установок різного цільового призначення. Теоретично обґрунтовано і експериментально доведено реальну можливість економії енергетичних ресурсів під час сушіння вологих матеріалів у термовакуумних установках. За результатами досліджень сформульовані наступні висновки:

1. Виконані теоретичні дослідження тепломасообмінних, енергоефективних процесів в термовакуумних сушильних установках і досліджено кінетику випаровування вільної води із поверхні в квазістаціонарному режимі, що дозволяє провести розробку фізичних моделей теплотехнологічних установок з мінімальними енергетичними затратами. Показано, що мінімальні енергетичні витрати в процесі сушіння визначаються умовою рівноваги між випаровуванням води із поверхні висушеного матеріалу і відведенню водяної пари із вакуумного об'єму, що дало змогу визначити пріоритетні напрямки енергозбереження.

2. Проведені термодинамічні дослідження видалення води із капілярно-пористого тіла в термовакуумній установці. Це дає можливість на основі обраного критерію оптимальності і варійованих термодинамічних факторів визначити параметри технологічного процесу сушіння гетерогенних матеріалів і розробляти енергозберігаючі, високоефективні сушильні установки нового покоління. Знизити енергетичні витрати на одиницю висушеної продукції, прискорити процес сушіння,

розробити високоефективну термовакуумну технологію для отримання матеріалів із заданими параметрами.

3. В результаті виконаних в дисертаційній роботі досліджень, вирішена науково-технічна проблема підвищення енергоефективності промислових установок для сушіння вологих матеріалів із різноманітними структурними і теплотехнологічними характеристиками, шляхом удосконалення теплофізичних процесів і теплоенергетичного устаткування, що забезпечує найкращі умови для використання теплової енергії і зумовлює економію енергоресурсів. Результати розробки є актуальними для удосконалення існуючого і створення нового теплотехнологічного устаткування різного призначення для сушіння як неорганічної, так і органічної сировини.

4. На базі теоретичних і експериментальних досліджень вперше виготовлена, запатентована високоефективна термовакуумна установка, яка має резистивний полий нагрівач у формі спіралі. Отримано рівняння, яке характеризує швидкість руху двофазного потоку в спіральному нагрівальному елементі. Визначена максимальна швидкість руху частинок, що транспортуються в порожнині нагрівального елемента. Установлена вагова і об'ємна концентрація дисперсного матеріалу в потоці повітря під час безперервного руху в полуму спіральному нагрівальному елементі. Проведено комп'ютерне моделювання процесу видалення вологи із дисперсного матеріалу в термовакуумній установці. Визначено, що швидкість виходу вологи із дисперсного матеріалу має експоненціальну залежність від часу і лінійно залежить від розміру частинки.

5. Вперше розроблено метод безперервного сушіння і одночасного подрібнення дисперсних матеріалів. Розглянуто процес подрібнення дисперсного матеріалу під час його сушіння в спіральному нагрівальному елементі, який продемонстровано при одержанні дрібнодисперсного порошку діоксиду цирконію і бурого вугілля. Даний метод знижує енергетичні витрати на одиницю висушеної продукції, прискорює процес сушіння.

На підставі проведених теоретичних і експериментальних досліджень розроблено енергоефективний метод термовакуумного сушіння відходів деревообробної промисловості. Час проходження тирси по нагрівальному елементу становить до 20 секунд. Процес сушіння безперервний.

6. Вперше розроблено і реалізовано дискретний метод термовакуумного сушіння великогабаритних капілярно-пористих середовищ:

– метод термовакуумного сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів продемонстровано на видаленні вологи із сирцю керамічних вогнетривів, який дозволяє зменшити тривалість сушіння до 5 діб і видалити із зразків крім води і гліцерин, що входить до складу зв'язувальної речовини. Розроблений метод дозволяє видаляти вологу із великогабаритних керамічних вогнетривів у 12 разів швидше в порівнянні із вживаним конвективним методом сушіння і зменшує енерговитрати на одиницю виділеної вологи більше ніж у 2,5 рази.

– розроблені енергоощадний метод і установка термовакуумного сушіння деревини дозволяє отримати якісну продукцію без тріщин і викривлення, скорочує час сушки на 30 % порівняно із існуючими методами. Температура нагрівання деревини не перевищує 333 К (60 °С).

7. На основі теоретичних і експериментальних досліджень уперше розроблена і впроваджена на ПАТ завод «Південкабель» енергозберігаюча технологія і екологічно чиста термовакуумна установка сушіння паперової ізоляції силових кабелів, що дає змогу знизити тривалість процесу сушіння на 5,5...8 годин в порівнянні із технологією, яка раніше використовувалася на підприємстві.

Створено тиристорне джерело живлення для нагрівання паперової ізоляції під час сушіння, максимальний струм 1800 А. Все це дало змогу прискорити процес сушіння паперової ізоляції, покращити оперативність управління технологічним процесом. На новоствореній термовакуумній установці за новою технологією виготовляється кабель із перерізом струмопровідної жили до 800 мм², замість обмеження, яке було раніше – 240 мм².

8. Вперше розглянута можливість низькотемпературного термовакуумного методу сушіння термолабільних матеріалів:

– цей метод, наприклад, дозволяє швидко висушити зерно до заданої вологості і одночасно провести його дезінсекцію і при цьому зберегти біологічні властивості, не знижуючи поживну цінність і схожість. Температура сушіння зерна не перевищує 323 К (50 °С). Швидкість під час термовакуумного сушіння зерна збільшується у 8 разів порівняно із сушінням зерна, яке відбувається конвективним методом.

9. Розроблено і обґрунтовано низькотемпературний термовакуумний метод сушіння продукції рослинного походження. Проведені дослідження показали, що найоптимальнішим, із погляду збереження якості продукції рослинного походження, виявився режим термовакуумного сушіння за температури до 323 К. При цьому було отримано висушений продукт вологістю 6...8% із високими органолептичними показниками. Цілісність мембран і клітин не порушена, кількість вітамінів знаходилась у межах норми, все це свідчить про правильність вибору термовакуумного сушіння біологічних об'єктів. Наукові дослідження з видалення вологи із біологічної продукції у термовакуумній установці дали змогу визначити біохімічні зміни, які відбуваються у термолабільних матеріалах під час їх сушіння.

10. Результатом виконаних у дисертаційній роботі досліджень є вирішена науково-технічна проблема підвищення енергоефективності промислових установок для сушіння вологих матеріалів з різноманітними структурними і теплотехнологічними характеристиками, шляхом удосконалення теплофізичних процесів і теплоенергетичного устаткування. Результати розробок є актуальними для удосконалення існуючого і створення нового теплотехнологічного устаткування різного призначення для сушіння як неорганічної, так і органічної сировини.

ОСНОВНІ УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

a – коефіцієнт теплообміну, Вт/(м²·К); c_1, c_2, c_3 – питома теплоємність сухої сировини, вологи, деталей сушильної установки, Дж/(кг·К); $d_{\text{ч}}$ – діаметр частинки, м; d_1, d_2 – зовнішній і внутрішній діаметр нагрівального елемента, м; F_p – рівнодійна всіх зовнішніх сил, Н; H – товщина водяної плівки на стінці капіляру, м; I_H – струм нагрівального елемента, А; J_k – густина потоку речовини, що проходить в одиницю часу через одиницю площі поперечного перерізу капіляра кг/(м²·с); L_H – довжина нагрівального елемента, м; l_k – довжина капіляра, м; M – молекулярна маса водяної

пари, кг/кмоль; m – маса частинки висушуваного матеріалу, кг; $m_{\text{зар}}$ – загальна маса вологої частинки, кг; $m_{\text{в}}$ – маса вологи, котра видаляється із висушуваного матеріалу, кг/с; $m_{\text{п}}$ – змінна маса висушуваного матеріалу, кг; m_1, m_2, m_3 , – маса сухої сировини, вологи, деталей сушильної установки, кг; n – кількість капілярів у висушуваному зразку; $\rho_{\text{п}}$ – щільність водяної пари у вакуумній камері, кг/м³; $\rho_{\text{п}}(T_0)$ – щільність насиченої водяної пари за температури навколишнього середовища, кг/м³; $P_{\text{н}}$ – потужність нагрівального елемента, Вт; P_1, P_2 – тиск на кінцях капіляра, Па; $P_{\text{с}}$ – середнє значення тиску у нагрівальному елементі, Па; R – радіус спіралі нагрівального елемента, м; $R_{\text{г}}$ – універсальна газова стала, Дж/(моль К); R_{HE} – опір нагрівального елемента, Ом; $\pm dR_1$ – зміна радіуса внутрішньої порожнини нагрівального елемента залежно від того, де знаходиться частинка, під час руху всередині нагрівального елемента, м; r – питома теплота пароутворення, Дж/кг; $r_{\text{к}}$ – радіус капіляра, м; $r_{\text{п}}$ – радіус порожнини нагрівального елемента, м; S – площа поверхні, м²; T – абсолютна температура, К; $T_{\text{в}}$ – температура випаровування вологи, К; $T_{\text{п}}, T_{\text{к}}$ – початкова і кінцева температура нагрівання висушуваного матеріалу, К; $T_{\text{н}}$ – температура нагрівального елемента, К; T_1, T_2 – температури на кінцях капіляра, К; T_3, T_4 – температури вологи в капілярі за тиску P_1, P_2 , К; $U_{\text{в}}$ – пропускна здатність вакуумної комунікації, м³/с; V – об'єм висушуваного матеріалу, м³; $V_{\text{р}}$ – продуктивність насоса, м³/с; $V_{\text{еф}}$ – ефективна продуктивність насоса, м³/с; $v_{\text{д}}$ – швидкість руху двофазного потоку у нагрівальному елементі, який має форму спіралі, м/с; $v_{\text{ч}}$ – швидкість руху частки висушуваного матеріалу у спіральному нагрівальному елементі, м/с; $v_{\text{в}}$ – швидкість витання, м/с; $v_{\text{пл}}$ – швидкість плівкового руху рідини у капілярі, м²/с; W – ударна в'язкість, Дж/м²; $w^{\text{с}}$ – вологовміст матеріалу, кг Н₂О/кг сух. матеріалу; β – коефіцієнт тертя, кг/с; ε – температурний коефіцієнт плівкового поверхневого натягу, кг/(с²·К); η – динамічна в'язкість, Па·с; ν – кінематична в'язкість, м²/с; σ – коефіцієнт плівкового поверхневого натягу рідини на стінці капіляра, Н/м; $\rho_{\text{с}}$ – щільність середовища у нагрівальному елементі, кг/м³; $\rho_{\text{р}}$ – щільність рідини, кг/м³; $\rho_{\text{м}}$ – питомий електричний опір матеріалу, Ом·м.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Экологически чистая вакуумная установка для сушки кабеля в бумажной изоляции / В.М. Золотарев, В.П. Карпушенко, В.А. Кутовой, В.И. Маханьков, Н.А. Хижняк // Электротехника. – 1998. – №5. – С. 10-13.
2. Разработка энергосберегающих технологий вакуумной сушки / В.А. Кутовой, Е.П. Медведева, А.А. Николаенко, Н.П. Дикий, С.В. Кутовой, О.А. Малинин, А.А. Мищенко // Промышленная теплотехника. – 2003. – Т. 25, №4. – С. 148-150.
3. Слезов В.В. К теории испарения воды при термовакuumной сушке / В.В. Слезов, В.А. Кутовой, Л.И. Николайчук // Промышленная теплотехника. – 2006. – №5. – С. 54-58.
4. Применение гелионагревателей для вакуумно-импульсной сушки биопродуктов / В.Н. Сандалов, М.И. Муминов, М.Н. Каримов, В.А. Кутовой // Гелиотехника. – 2005. – №3. – С. 42-45.

5. The Investigation of Low Temperature Vacuum Drying Processes of Agricultural Materials / L.A. Bazyma, V.P. Guskov, A.V. Basteev, A.M. Lyakhno, V.A. Kutovoy // Food Engineering. – 2006. – Vol. 74. – P. 410-415.
6. Некоторые особенности термовакuumной сушки / Н.П. Дикий, А.М. Егоров, В.А. Кутовой, Е.П. Медведева, А.А. Николаенко, Н.П. Тишкевич // Вопросы атомной науки и техники. – 2007. – №4 (16). – С. 53-57.
7. Энергосберегающие, экологически чистые вакуумные установки для сушки дисперсных материалов / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, А.А. Германов, Е.Н. Соколенко // Одеська національна академія харчових технологій: наукові праці. – 2008. – №32. – С. 282-287.
8. Технология вакуумной сушки сырца крупногабаритных огнеупорных изделий / В.А. Кутовой, А.А. Мацько, В.М. Артеменко, П.П. Криворучко, Ю.Е. Мишнева // Вакуумная техника и технология. – 2008. – Т. 18, №3. – С. 173-177.
9. Энергосберегающий метод получения диоксида циркония из гидроксида циркония / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, А.А. Германов, В.И. Попов // Материалы, технологии, инструменты. – 2010. – Т. 15, №4. – С. 75-79.
10. Кутовой В.А. Термовакuumный метод получения диоксида циркония // В.А. Кутовой, А.А. Николаенко // Энерготехнологии и ресурсосбережение. – 2010. – №6. – С. 27-30.
11. Кутовой В.А. Энергосберегающие термовакuumные установки для сушки дисперсных материалов / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко // Физика аэродисперсных систем. – 2010. – №47. – С. 59-66.
12. Кутовой В.А. Усовершенствованный метод получения дисперсного диоксида циркония / В.А. Кутовой // Вопросы атомной науки и техники. – 2011. – №2 (72). – С. 159-162.
13. Энергосберегающая экологически чистая вакуумная установка для сушки и пропитки кабелей с бумажной изоляцией / А.Г. Гурин, В.А. Кутовой, Ю.А. Антоненко, В.П. Карпушенко, Е.С. Москвитин // Вестник Национального технического университета «ХПИ». – 2011. – Вып. 41. – С. 55-69.
14. Теоретическое обоснование механизма получения мелкодисперсных материалов термовакuumным способом / М.Ю. Ковалевский, В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, В.И. Ткаченко, Л.В. Логвинова // Вестник Восточнoукраинского национального университета имени Владимира Даля. – 2012. – №14 (185), ч. 2. – С. 70-79.
15. Кутовой В.А. Термовакuumный процесс получения нанодисперсных материалов целевого назначения / В.А. Кутовой, А.С. Луценко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №3 (109). – С. 55-64.
16. Современные тенденции переработки бурого угля / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко // Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. – 2013. – Вип. 5. – С. 25-31.
17. Кутовой В.А. Научно-практические основы энергосберегающего термовакuumного процесса сушки дисперсных материалов / В.А. Кутовой, А.С. Луценко, В.М. Кошельник // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». – 2013. – №70 (1043). – С. 175-180.

18. Кутовой В.А. Системный подход к решению термовакuumных процессов сушки гетерогенных материалов / В.А. Кутовой // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 6/8(66). – С. 40-44.

19. Энергосберегающий метод подготовки твердого топлива к сжиганию / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, Э.М. Кошельник // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №08 (114). – С. 61-66.

20. Кутовой В.А. Научно-технические основы термовакuumного процесса получения нанодисперсного диоксида циркония / В.А. Кутовой, А.С. Луценко, А.А. Николаенко // Тепловые процессы в технике. – 2013. – Т.5. – №12. – С. 552-556.

21. Кутовой В.О. Науково-практичні основи розробки промислових енергоефективних термовакuumних установок сушіння капілярно-пористого матеріалу / В.О. Кутовой, А.А. Николаенко // Вісник «ХНТУСГ» Іноваційні технології деревообробної промисловості та механізації процесів у лісовому комплексі. – 2013. – Вип. 143. – С. 221-230.

22. Кутовой В.А. Аппроксимирующий анализ экспериментальных данных процесса сушки гетерогенных сред / В.А. Кутовой, О.Н. Репалова // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2013. – №10(116). – С. 62-69.

23. Термовакuumный метод получения нанодисперсных материалов / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, В.И. Ткаченко // Вопросы атомной науки и техники. – 2014. – Вып. 103, №2 (90). – С. 153-157.

24. Кутовой В.А. Особенности механизмов термовакuumного процесса сушки и измельчения дисперсного материала / В.А. Кутовой, А.С. Луценко // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. – 2014. – № 1(119). – С. 64-70.

25. Кошельник В.М. Научно - технические основы теплоэнергетических процессов термовакuumной сушки углеродных материалов / В.М. Кошельник, В.А. Кутовой, А.С. Луценко // Вісник Національного технічного університету «ХП». Серія. Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування. – 2014. – №12(1055). – С. 142 -149.

26. Кутовой В.А. Разработка энергоэффективной методики сушки и измельчения углеродных материалов / В.А. Кутовой, И.С. Мысак // Восточно - Европейский журнал передовых технологий. – 2014. – №6/8(72). – С. 35-40.

27. Свидетельство на полезную модель 2047, Российская Федерация, МПК H01B13/00. Сушильно-пропиточная установка для изготовления кабелей: / Карпушенко В.П., Кутовой В.А., Маханьков В.И., Пешков И.Б.; заявитель и патентообладатель Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности (РА). – № 95101099; заявл. 25.01.95; опубл.16.04. 96. Бюл. №4. –5с.

28. Патент 269 Україна, МПК F26B 9/06. Вакуумная установка для сушки древесины: / Кутовой В.А., Маханьков В.И., Егоров А.М., Хижняк Н.А.; заявитель и патентообладатель ННЦ «Харьковский физико-технический институт». – № 97073455; заявл. 01.07.97; опубл. 25.12.98. Бюл.№6. – 4с.

29. Патент на винахід, Україна, 81138, МПК F26B9/06. Пристрій для термовакuumного сушіння. / Кутовой В.О., – №a200507488; Заявл. 27.07.2005; Опубл. 10.12.07; Бюл. №20 – 5с.

30. International Patent, a20507488 27.07.2005 UA, МПК F26B5/04; F26B23/06; F26B23/00. Apparatus for Drying of Wet Dispersed Raw Materials. / V.O. Kutovyi. – # PCT/UA2005/000051; Filing. 15.01.2005; Public. 01.02.2007; Publication number W0/2007/013866. – 6p.

31. Патент на винахід, Україна, 82918, МПК F26B 5/04. Спосіб вакуумного сушіння сирцю вогнетривких виробів / В.О. Кутовий, О.О. Мацько, В.В. Примаченко, П.П. Криворучко, Ю.Є. Мішньова; Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут» (UA) – №.a200606818; Заявл.19.06.2006; Опубл. 26.05.08; Бюл. №10. – 5с.

32. Экологически чистое оборудование для сушки электрического кабеля с бумажной изоляцией / Ю.А. Антонец, Н.Н. Змиевский, В.П. Карпушенко, В.А.Кутовой, В.И.Маханьков, Н.А. Хижняк // Международная конференция по электротехнике и электротехнологии: тезисы конф. – Суздаль, Россия. – 1994. – С. 37.

33. Kutovoy V. To the Theory of Vacuum Dryng / V. Kutovoy, L. Nikolaichuk, V. Slyesov // 14th International Drying Symposium: conference materials. – Sao Paulo, Brazil. – 2004. – Vol. A. – P. 266-271.

34. The Theoretical and Experimental Investigation of Low Temperature Vacuum Drying of Agricultural Materials / V.P. Guskov, L.A. Bazyma, A.V. Basteev, A.M. Lyashenko, V. Lyakhno., V.A. Kutovoy // 14th International Drying Symposium: conference materials. – Sao Paulo, Brazil. – 2004.- Vol. A. – P.648-655.

35. Применение гелионагревателей для сушки биопродуктов / В.Н. Сандалов, М.И. Муминов, М. Каримов, В.А. Кутовой // Вторая Международная научно-практическая конференция «Современные энергосберегающие тепловые технологии»: материалы конф. – СЭТТ-2005. – Москва. – 2005. – С.219-221.

36. Bazima L.A. Control System for Low-Temperature Vacuum Drying / L.A. Bazima, V.A. Kutovoy // 3rd Inter-American Drying Conference: conference materials. – Montreal, Quebec, Canada. – 2005. – P. 78.

37. Кутовой В.А. Разработка оптимальной энергосберегающей технологии вакуумной сушки виноградных выжимок / В.А. Кутовой, А.А. Мацько, А.А.Николаенко // Проблемы энергосберегающих технологий в АПК: международная конференция: тезисы конф. – Киев.- 2006. – С. 180.

38. Vacuum Drying of Large Dimension Vibrocast Chromic Oxide Refractory / P. Kryvoruchko, V. Primachenko, Yul. Mishnyova, N. Girich, O. Sinyukova, V. Kutovoy, A. Mats'ko // United European Refractories Meet the World: 10th Biennial Worldwide Congress: conference materials. – Dresden, Germany. – 2007. – P. 384-387.

39. Энергосберегающие, экологически чистые вакуумные установки для сушки дисперсных материалов / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, А.А. Германов, Е.Н. Соколенко // Удосконалення процесів та обладнання харчових та хімічних виробництв: XII Міжнародна наукова конференція: тезисы конф. – 2008. – Одеса, Україна. – С.13.

40. Кутовой В.А. Вакуумная технология получения диоксида циркония / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко // Цирконий: металлургия, свойства, применение: V научно-практическая конференция материаловедческих обществ России: материалы конф. – 2008. – Ершово, Россия. – С. 33–35.

41. Кутовой В.А. Энергосберегающий метод получения диоксида циркония. / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, В.И. Попов // Перспективные материалы и технологии: международный симпозиум: тезисы конф. – 2009. – Витебск, Беларусь. – С. 213.
42. Kutovyi V. Thermal Vacuum Dryers / Kutovyi V. // «17th International Drying Symposium» (IDS 2010): conference materials. – Magdeburg, Germany.-2010. – V. V. – P.854-858.
43. Кутовой В.А. Энергосберегающие термовакuumные установки для сушки дисперсных материалов. / В.А. Кутовой, А.А. Николаенко // Дисперсные системы : XXIV научная конференция стран СНГ: тезисы конф. – 2010. – Одесса, Украина. – С.195.
44. Теоретическое обоснование механизма получения мелкодисперсных материалов термовакuumным способом / М.Ю. Ковалевский, В.А. Кутовой, А.А. Николаенко, В.И. Ткаченко, Л.В. Логвинова // Актуальные проблемы прикладной физики: Международная научно-практическая конференция: тезисы конф. – 2012. – Севастополь, Украина. – С.223 - 224.
45. Термовакuumный метод получения нанодисперсного диоксида циркония / В.А. Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С. Луценко, А.А. Николаенко, О.С. Зазноба // Moderni informacni techylogie Fizika. IX Mezinarodni vedecko – prakticka conference. conference materials. – 2013. Praha. – P.93-99.
46. Энергосберегающая термовакuumная сушка и измельчения бурого угля / В.М. Кошельник, В.А.Кутовой, Ю.Г. Казаринов, А.С.Луценко // Наука техніка, технологія, освіта, здоров'я: XXI Міжнародна науково-практична конференція: тези конф. – 2013. – Харків, Україна. – С.297.

АНОТАЦІЯ

Кутовой В.О. Розвиток наукових основ енергоефективного термовакuumного сушильного устаткування – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.14.06 – технічна теплофізика та промислова теплоенергетика. - Національний університет "Львівська політехніка", Львів, 2015.

Дисертація присвячена науково-технічній проблемі зі створення і впровадження у виробництво нових високоефективних, енергоощадних термовакuumних методик сушіння гетерогенних матеріалів і розробленню наукових основ теплотехнічного обладнання цільового призначення для інтенсифікації теплообмінних процесів.

Теоретично і експериментально вивчено кінетику видалення вологи із гетерогенних матеріалів залежно від часу, температури нагрівання і тиску. Розроблено високоефективну термовакuumну енергоощадну технологію сушіння та одночасного подрібнення дисперсних матеріалів. Цей процес підтверджено на прикладі отримання у термовакuumній установці дрібнодисперсного порошку діоксиду цирконію із гідроксиду цирконію, сушіння та подрібнення бурого вугілля і відходів деревообробної промисловості. Термовакuumний метод скорочує існуючий

технологічний процес, знижує температуру сушіння, зменшує енергоспоживання більше ніж у три рази порівняно з існуючими сушильними установками.

Створено дискретний метод термовакuumного сушіння великогабаритних капілярно-пористих матеріалів і підтверджено на прикладі сушіння сирцю керамічних великогабаритних вогнетривів і деревини. За термовакuumною технологією тривалість сушіння керамічних виробів скоротилась у 12 разів порівняно із застосуванням конвективним методом сушіння, енерговитрати на одиницю видаленої вологи зменшуються більше, ніж у 2,5 рази.

Термовакuumна технологія дозволила скоротити час сушіння деревини на 30% порівняно із існуючими методами.

Вдосконалено технологічний процес сушіння силових кабелів із паперовою ізоляцією і створено нову термовакuumну установку. Новостворена технологія і установка дозволила порівняно з існуючою технологією скоротити час сушіння більше ніж у 1,5 рази, знизити енергетичні витрати більш, ніж у 2 рази, усунути брак кабельної продукції, поліпшити умови праці обслуговуючого персоналу, підвищити культуру виробництва, зменшити забруднення навколишнього середовища, виробляти кабель із перерізом струмопровідної жили до 800 мм², замість обмеження, яке було раніше – 240 мм².

Розроблена термовакuumна технологія видалення вологи із біологічного матеріалу. Сушіння відбувалось у вакуумній камері за температури 313 К, (40 °С). Це виключало перегрівання і псування органічної продукції, зберігало поживні речовини і підвищувало її якість.

Термовакuumні установки і метод термовакuumного сушіння запатентовані в Україні, Росії, Європі та впроваджені у виробництво.

Ключові слова: теплообмінні процеси, енергозбереження, екологія, ефективність, тиск, температура, якість.

АННОТАЦІЯ

Кутовой В. А. Развитие научных основ энергоэффективного термовакuumного сушильного оборудования. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.14.06 – техническая теплофизика и промышленная теплоэнергетика. – Национальный университет "Львовская политехника", Львов, 2015.

Диссертация посвящена решению актуальной научно-технической проблеме энерго- и ресурсосбережения в термовакuumных установках разного предназначения и интенсификации в них теплообменных процессов.

Проведена разработка теплофизических процессов и теплотехнического оборудования для сушки влажных материалов с различными структурными и теплотехнологическими характеристиками. Показано, что результативность термовакuumных установок разного назначения зависит от эффективности подвода теплоты к влажному материалу, интенсивности перемещения влаги из внутренних слоев высушиваемого материала к поверхности и скорости отвода влаги от поверхности высушиваемого материала в окружающую среду.

Теоретически рассмотрено влияние неоднородной микроструктуры во влажном материале на релаксационные процессы термо- и массопереноса во время термовакуумной сушки.

В процессе выполнения научно-исследовательских работ по термовакуумной сушке влажных материалов теоретически исследована кинетика испарения влаги с поверхности высушиваемого материала в зависимости от режимных параметров термовакуумной установки.

На основании теоретических и экспериментальных исследований создан метод получения мелкодисперсного порошка диоксида циркония из гидроксида циркония в термовакуумной установке. Термовакуумный метод существенным образом сокращает технологический процесс получения диоксида циркония из гидроксида циркония, температура сушки снижается, энергопотребление уменьшается более чем в три раза по сравнению с существующими сушильными установками.

Разработан термовакуумный метод сушки и измельчения бурого угля, который уменьшает содержание серы и азота в высушенном угле, что приводит к снижению объема вредных выбросов в атмосферу при его сжигании и повышает теплотворную способность. При этом количество электроэнергии, затраченной на получение мелкодисперсного бурого угля влажностью менее 1% из сырья с исходной влажностью 40% при температуре нагревательного элемента 250 °С и среднем давлении окружающей среды 300 мм рт.ст., составляет 250 кВт ч/т. Удельные энергозатраты теплоты на 1 кг выпаренной влаги сокращены в 2 раза по сравнению с барабанными сушилками.

Разработан термовакуумный метод сушки отходов деревообрабатывающей промышленности, который позволяет сушить опилки равномерно и до заданной влажности. Продолжительность сушки опилок в термовакуумной установке составляет 20 секунд. Процесс сушки непрерывный.

Создан дискретный технологический процесс термовакуумной сушки крупногабаритных капиллярно-пористых сред, с целью уменьшения длительности сушки и снижения энергетических затрат. По термовакуумной технологии продолжительность сушки габаритных керамических изделий сокращается в 12 раз по сравнению с конвективным методом сушки, энергозатраты на единицу выделенной влаги уменьшаются более, чем в 2,5 раза.

Термовакуумная технология сокращает время сушки пиломатериалов в 1,5...2 раза и позволяет сократить энергозатраты на 30% по сравнению с существующими методами.

На базе проведенных теоретических и экспериментальных исследований усовершенствован технологический процесс термовакуумной сушки бумажной изоляции электрических кабелей, что позволило сократить время сушки, улучшить условия труда обслуживающему персоналу, повысить культуру производства, уменьшить загрязнение окружающей среды.

Установлена концептуальная общность теоретических и научно-технических решений теплообмена в термовакуумных установках сушки термолабильных материалов. Сушка происходит в вакуумной камере при температурах и давлении, что исключает перегревание и порчу термолабильных материалов, сохраняет питательные вещества в высушенной продукции и повышает ее качество, что

свидетельствует об относительно мягком воздействии режима термовакуумной сушки на биологические объекты.

Метод термовакуумной сушки и термовакуумные установки запатентованы в Украине, России, Европе и внедрены в производство.

Ключевые слова: теплообменные процессы, термовакуумная установка, энергосбережение, экология, эффективность, давление, температура, качество.

SUMMARY

V.O. Kutoviy. Development of scientific basis for energy-efficient thermal vacuum drying equipment – Manuscript.

Thesis for the degree of Doctor of Engineering Science by specialty: 05.14.06 – Technical Thermal Physics and Industrial Heat-Power Engineering. – National University "Lviv Polytechnic". Lviv, 2015.

The thesis focuses on the scientific and technical problem of development and manufacturing application of new high-performance energy-efficient thermal installations and enhancement of heat exchange processes in them.

Theoretical and experimental investigations of the kinetics of moisture removal from different media, depending on time, heating temperature and pressure in vacuum chamber have been done. The experimental results allowed to create ecologically clean, high-performance, energy-efficient thermal installations and determine optimal heat exchange processes in them.

There have been developed a high-performance thermal vacuum installation and energy-efficient technology for zirconium dioxide fine powder production from zirconium hydroxide. The thermal vacuum method reduces the technological process (one operation instead of three). The drying temperature decreases by 200°, and the power consumption reduces 3 times.

A discrete technological thermal vacuum drying process for large-size chrome oxide green refractoriness has been developed, allowing to reduce the drying time to 5 days, which is 12 times less as compared to drying at atmospheric temperature. The power consumption per unit of removed moisture reduced more than 2,5 times.

A vacuum drying mode for drying wood has been developed, which ensures a 30% drying time reduction as compared to the existing drying methods.

A thermal-vacuum installation has been developed, and a drying saturation technological process for paper-insulated cabling products has been improved. The developed installation allows a drying time reduction of more than 1.5 times, reduces power consumption 2 times, eliminates defective cabling production, improves operating staff working conditions and production standards, and reduces environment pollution. The installation allows producing cable with the size of lead of cable up to 800 mm² against the previous restriction of 240 mm².

A thermal vacuum technology for drying grain has been developed allowing continuous and high-performance drying of wet grain to dry condition without changing its physical, physiological and biochemical properties.

A specific feature of the developed thermal vacuum technology is drying biological material in a vacuum chamber at a temperature not above 313 K to exclude overheating

and deterioration of agricultural products, preserve nutrients in products, and improve their quality.

The developed thermal vacuum drying installations and energy-efficient technologies can be applied in various industries.

Key words: energy efficiency, heat exchange processes, ecology, performance, pressure, temperature, quality.

Підписано до друку 31. 03.15. Формат 60x84/16.

Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9. Тираж 100 прим. Зам. №15

Національний науковий центр
«Харківський фізико-технічний інститут»
61108, м. Харків, вул. Академічна, 1