

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**Миронов Антон Миколайович**



УДК 536.2.083, 662.711

**ТЕОРЕТИЧНІ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
ТЕПЛООБМІННИХ ПРОЦЕСІВ ТЕРМІЧНОГО РОЗКЛАДУ  
ВУГЛЕЦЕВМІСНОЇ СИРОВИНИ В УДОСКОНАЛЕНОМУ  
ПРОЛІТИЧНОМУ АПАРАТІ**

Спеціальність 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Харків – 2017

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій, процесів і апаратів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник** доктор технічних наук, професор  
**Ведь Валерій Євгенович,**  
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»,  
завідувач кафедри інтегрованих  
технологій, процесів і апаратів

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Атаманюк Володимир Михайлович,**  
Національний університет «Львівська політехніка»,  
завідувач кафедри хімічної інженерії

доктор технічних наук, доцент  
**Нікольський Валерій Євгенович,**  
Український державний хіміко-технологічний  
університет, м. Дніпро,  
професор кафедри енергетики

Захист відбудеться 14 грудня 2017 року о 10<sup>00</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.05 у Національному технічному університеті «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» за адресою: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2.

Автореферат розіслано 7 листопада 2017 року.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради



Арутюнян Т.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Енергетичні проблеми сучасного людства спонукають науковців до пошуків нових та альтернативних джерел енергії. Розвинені країни світу поступово переходять на часткове заміщення традиційних видів палива на біопаливні ресурси. Одним з найбільш затребуваних та достатньо простих у виробництві паливних ресурсів такого типу є деревне вугілля, яке є собою чистий вуглецевий залишок. Цей сектор формує найбільший відсоток на ринку новітньої енергетичної біомаси. Окрім того, вуглевипалювання вирішує низку задач з захисту навколишнього середовища та зменшення шкідливих викидів.

Деревне вугілля є продуктом процесу піролізу деревинної сировини. Сам процес являє собою один з різновидів сухої перегонки або газифікації деревини. Фізичним представленням піролізу є специфічна початкова стадія горіння матеріалу, яка відбувається в умовах дефіциту або за повної відсутності кисню та повітря.

Виробничий процес забезпечується за допомогою складного апаратного обладнання, яке складається з двокамерної установки та топки для забезпечення нагріву внутрішнього середовища камер. Оскільки технологія вуглевипалювання передбачає утворення великої кількості вторинного тепла у одній камері, це тепло може бути використане для функціонування другої камери піролізної установки. Згаданий підхід не тільки забезпечить безперервність виробничого циклу, але й значно підвищить показники економічності енерговитрат та одночасно зменшить шкідливі викиди у повітря робочої зони та атмосферу. Коректне стадіювання усіх етапів виробничого циклу формує додаткові можливості для збільшення показників енергоефективності процесу вуглевипалювання.

Позитивною особливістю сировини для вуглевипалювання є її висока ступінь відтворюваності у природі. На відміну від багатьох інших видів традиційного палива, запаси яких, добути з корисних копалин, регулярно зменшуються, деревина щороку може оновлюватися та забезпечувати належну стаціонарність профільних виробництв. Якщо проблема раціональної заготівлі та відновлення сировини здобуде державну підтримку і лісові насадження будуть відповідально контролюватися, людство отримає доволі легко відновлюване джерело енергії.

Таким чином, принципи підготовки вуглецевмісної сировини на усіх етапах виробничого циклу, а також розробка і модернізація конструкцій вуглевипалювальних установок на сьогоднішній день є досить актуальною науково-практичною задачею, яка визначає напрямок досліджень дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Робота виконана на кафедрі інтегрованих технологій, процесів і апаратів НТУ «ХП» згідно плану науково-дослідних робіт МОН України «Створення теоретичних основ логістики енергоефективності та ресурсозбереження для забезпечення енергетичної та екологічної безпеки промислових комплексів з хіміко-технологічними системами» (ДР № 0112U000409), в яких здобувач був виконавцем окремих етапів.

**Мета і задачі дослідження.** Метою роботи є теоретичне та експериментальне дослідження теплообмінних процесів в апараті піролізу вуглецевмісної сировини задля забезпечення його енергоефективного функціонування шляхом впровадження нових технологічних та конструктивних параметрів.

Для досягнення мети поставлені наступні задачі:

- проаналізувати стан галузі переробки деревної сировини та деревних відходів в Україні та світі;
- проаналізувати сучасний стан апаратурного оформлення обладнання для піролізу різних типів сировини;
- провести дослідження структурних особливостей деревної сировини та визначити їхній вплив на теплообмінні процеси в матеріалах різних порід;
- розробити експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності різних сортів деревини;
- визначити кінетичні закономірності проведення процесу піролізу деревної сировини;
- розробити нову методику розміщення сировини в об'ємі апарату, з урахуванням геометричних параметрів матеріалів, які поступають для переробки, та технологічних можливостей основного і допоміжного устаткування;
- конструктивно модернізувати установку для забезпечення максимальної енергоефективності процесу виробництва деревного вугілля.

*Об'єкт дослідження* – теплообмінні процеси, які відбуваються в апараті піролізу вуглецевмісної сировини.

*Предмет дослідження* – технологічні та геометричні параметри піролітичного апарату, які впливають на ефективність теплообмінних процесів при термічному розкладі вуглецевмісної сировини.

**Методи дослідження.** При виконанні дисертаційної роботи для виконання основних дослідів були залучені сучасні фізичні та фізико-хімічні методи аналізу. Методи оптично-растрової електронної мікроскопії застосовано для дослідження будови деревинної сировини. Гідродинамічними та логометричними методами із залученням фіксуючої автоматики на приладах-вологомірах визначено швидкість випаровування вологи з об'єму матеріалу. Для визначення температур використано контрольну-вимірювальну техніку, зокрема восьмиканальний прилад РТЭ-4.8. Результати експериментальних досліджень процесу піролізу деревної сировини та умов теплопереносу в об'ємі камер технологічної установки фіксувалися за допомогою сучасних методів автоматизованого аналізу та контролю. Математичні методи деформованого багатогранника Нелдера та Міда, принцип оцінки адекватності задач за Адамаром, принцип регуляризації за Тихоновим, чисельний принцип бісекції, а також базові принципи вирішення зворотної задачі теплопровідності використані при обробці даних експерименту з визначення коефіцієнту теплопровідності сировини. Методи математичного моделювання та статистики, а також мову програмування Java застосовано для аналізу та узагальнення результатів досліджень. Для проведення розрахунків використано безкоштовні математичні пакети, а також пакет тривимірного твердотілого моделювання КОМПАС.

### **Наукова новизна отриманих результатів:**

- вперше визначено залежність між початковими фізичними параметрами вуглецевмісної сировини та якістю кінцевого продукту, яка дозволяє варіювати основні параметри виробничого процесу і прогнозувати його результат;
- створено установку та спосіб визначення коефіцієнта теплопровідності вуглецевмісної сировини, які дозволяють встановити теплофізичні характеристики матеріалу, що направляється на переробку;
- вперше розроблено математичну модель процесів теплопровідності, що відбуваються у вуглецевмісній сировині протягом процесу піролізу, яка дозволяє моделювати теплові процеси у поруватих тілах з анізотропією теплопровідних властивостей;
- дістав подальший розвиток механізм вирішення зворотної задачі теплопровідності, яка дозволяє отримати значення коефіцієнту теплопровідності вуглецевмісної сировини у діапазоні температур від 0° до 640°С;
- науково обґрунтовано та розроблено енергоефективну методику розміщення сировини у апараті, яка враховує складність її геометричної форми та дозволяє економити початкові енергетичні ресурси на виробництві.

**Практичне значення отриманих результатів** для галузі процесів та обладнання хімічної технології полягає в розробці нової конструкції апаратного забезпечення (вагонеток для закладання сировини). Зміни в принципах проведення етапу сушки деревної сировини дозволять економити не менше 20% первинного палива у порівнянні з установками старих конструкцій. Модернізація теплової ізоляції старого апаратного забезпечення (двох камер та топки) суттєво зменшує теплові втрати, що слугує додатковим чинником інтенсифікації процесу та здешевлення виробничого циклу. Застосування розробленої методики закладання сировини з урахуванням використання вагонетки нової конструкції дозволяє додатково зменшити тривалість виробничого циклу зі збереженням потрібної якості кінцевої продукції.

Розроблені в рамках роботи спосіб та пристрій для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини (Пат. UA 103355. Спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини; пат. UA 107688. Пристрій для ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини, відповідно) можуть бути застосовані за прямим призначенням.

Результати роботи впроваджені у навчальному процесі кафедри інтегрованих технологій, процесів і апаратів НТУ «ХП» при викладанні окремих розділів навчальних курсів «Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів» та «Процеси та апарати хімічних виробництв».

**Особистий внесок здобувача.** Усі основні результати, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: аналіз тенденцій у галузі отримання біопалива і переробки деревної сировини в Україні та світі; встановлення недоліків існуючого апаратного забезпечення процесу піролізу різних порід деревини; експериментальні дослідження етапів підготовки сировини та визначення їхнього впливу на подальшу переробку матеріалу; аналіз кінетичних закономірностей процесів теплообміну в апаратах піролізу деревної сировини;

теоретичне обґрунтування необхідності запровадження нової методики закладання сировини до установки; розрахунок та проектування нової конструкції вагонетки для вуглевипалювання в піролізних установках; внесення змін до елементів конструкції існуючих піролізних камер; оцінка економічних ефектів від запровадження конструктивних та технологічних заходів, визнаних у роботі доцільними; формулювання рекомендацій щодо покращення умов роботи з установками піролізу старого зразка задля збільшення їх продуктивності; формування висновків за дисертаційною роботою.

Постановка завдань основних досліджень роботи, аналіз і обговорення отриманих результатів виконувались здобувачем спільно з науковим керівником. Частина математичних розрахунків щодо вирішення зворотної задачі теплопровідності була проведена провідними науковими співробітниками відділу моделювання та ідентифікації теплових процесів ІПМаш ім. А. М. Підгорного НАН України (м. Харків).

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались і отримали позитивні відгуки на Міжнародних науково-практичних конференціях: «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (Харків, 2014, 2016); «Інтегровані технології та енергозбереження» (Харків, 2014); Computer Aided Process Engineering (CAPE Forum 2015) (Падерборн, Німеччина, 2015); «Інтеграційні процеси й інноваційні технології. Досягнення і перспективи технічних наук» (Харків, 2015); наукових семінарах кафедри ІТПА в НТУ «ХП» (2015 – 2017).

**Публікації.** Основні результати дисертаційної роботи опубліковані в 13 наукових працях, з яких: 3 статті у наукових фахових виданнях України, 2 статті у закордонних наукових фахових виданнях, 2 патенти України на корисну модель, 6 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з анотацій на двох мовах, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації складає 223 сторінки, серед них 56 рисунків за текстом, 13 таблиць за текстом, список із 160 найменувань використаних джерел на 19 сторінках, 13 додатків на 46 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність та доцільність дисертації, сформульовано її мету і задачі, визначено об'єкт, предмет і методи дослідження, наукову новизну та практичну значущість роботи.

**Перший розділ** присвячено характеристиці деревного вугілля та піролізної галузі світових країн у цілому. Досліджено низку основних технічних передумов до збільшення попиту на деревне вугілля у якості палива. Проаналізовано використання біомасних енергоресурсів у розвинених країнах світу та перспективи галузі. Охарактеризовано сировинну базу України у розрізі можливого запровадження технологій вуглевипалювання у різних регіонах. Розглянуто досвід

країн Європейського союзу та США у використанні деревного вугілля як третього за значущістю енергоресурсу після нафти та природного газу. Наведено історичний огляд попиту на деревну сировину, придатну для піролізу, за останні десять років. Порівняно законодавчу базу з питань вуглевипалювання в Україні та країнах, схожих за сировинним потенціалом та географічним положенням.

Вивчено процес піролізу деревини як виробничу технологію. Описано чотири стадії виробництва з деталізацією супроводжуючих фізичних параметрів робочого середовища. Наведено загальну класифікацію видів піролізу, а також охарактеризовано продукцію, яку можна отримати кожним зі способів.

Представлено класичні та популярні конструкційні рішення в апаратурному забезпеченні процесу піролізу деревної сировини. Подано опис конструкцій та принципів роботи горизонтальних та вертикальних установок. Розглянуто тунельну сталеву вагонну реторту, тунельну цегляну вагонну реторту, вуглевипалювальну піч системи Козлова, цегляну камерну піч Шварца, модернізовану піч Шварца, УВП-5 та двох різновидів вертикальних реторт. Наведено довідку про сучасні вітчизняні розробки у галузі вуглевипалювального обладнання. Охарактеризовано вуглевипалювальну піч УП «ЄВРО», розроблену на базі харківського підприємства ТОВ «GREENPOWER». Розглянуто принцип роботи установки, її технологічні режими та особливості обслуговування персоналом під час експлуатації. Визначено перспективи модернізації існуючої установки задля забезпечення високого рівня енергоефективності функціонування в умовах стандартного технологічного навантаження.

**У другому розділі** детально описано стадії підготовки сировини та обладнання для здійснення процесу піролізу. Наведено розрахунок загального матеріального балансу виробництва за загальною формулою

$$\sum M_i = M_{\text{тв}} + M_{\text{рід}} + M_{\text{газ}}$$

де  $M_{\text{тв}}$  – кінцева маса твердої фази, кг;  $M_{\text{рід}}$  – кінцева маса рідкої фази, кг;  $M_{\text{газ}}$  – кінцева маса газової фази, кг.

Цільовим продуктом, на отримання якого спрямовані зусилля виробників, є деревне вугілля, усі інші продукти піролізу вважають побічними. В цьому контексті маси інших фаз обраховують доволі приблизно. Значення рідких продуктів піролізу деревини у наш час різко зменшилося, однак на деякі з них попит усе ж таки залишається. Склад газів, які виділяються під час піролізу, сильно змінюється. З підвищенням температури вміст діоксиду вуглецю зменшується та зростає вміст горючих компонентів – спочатку оксиду вуглецю, а потім метану, неграницьких вуглеводнів та водню. При цьому теплота згоряння газу збільшується.

Наведено принцип розрахунку кількості продуктів піролізу, що утворилися (питомий вихід газової та рідкої фази, ступінь переробки сировини). Показано, що для порівняння ефективності роботи установок різних типів або порівняння продуктивності одного апарату, який переробляє декілька порід деревини, розраховується коефіцієнт ефективності.

Досліджено стадію сушки деревини, де вологість матеріалу розглядається як важливий чинник, що суттєво впливає на якість та собівартість кінцевої продукції. Описано механізми підготовки сировини у складських та польових умовах. Змальовано середні значення вологості сировини для різних порід деревини.

Проведено дослідження внутрішньої структурної будови деревини. Розглянуто п'ять сортів деревини: бук, дуб, береза, сосна та червоне дерево.

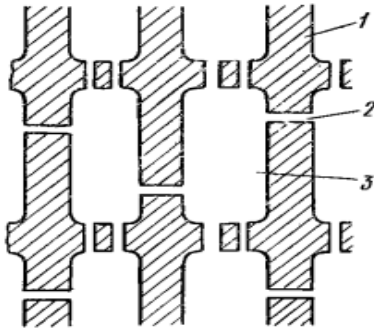


Рисунок 1 – Схема макрокапілярної структури деревини:  
1 – стінка клітини; 2 – пора;  
3 – порожнина клітини

Як будь-який живий організм, деревина складається з клітин, які здебільшого являють собою порожні трубки різного діаметру. Порожнини клітин, поєднані між собою порами (рис. 1), утворюють у деревині макрокапілярну систему, яка є добре проникною для рідин та газів у напрямку уздовж волокон й значно менше – уперек їх. Стінки клітин мають волокнисту будову. Вони формуються з малих окремих волокон – мікрофібрилів, орієнтованих уздовж вісі клітини або під невеликим кутом до неї. Між мікрофібрилами розміщуються інші органічні речовини – геміцелюлози та

лігнін, а також є вільні сполучені простори, заповнені повітрям та вологою, кількість якої в різний час неоднакова. Тобто, у стінках клітин наявна власна капілярна система, однак більш тонка, ніж макрокапілярна. За допомогою камери-мікроскопу для кожної породи дерев були отримані фотознімки внутрішніх структур у всіх розрізах. Для більш детального подальшого розгляду використовувались березовий та сосновий зразки. Аналіз знімків і результатів експериментів з визначення пористості деревини дозволив визначити основні закономірності у будові означених матеріалів. На основі цих даних були визначені інтервали коливань значення пористості для листвяних і хвойних порід.

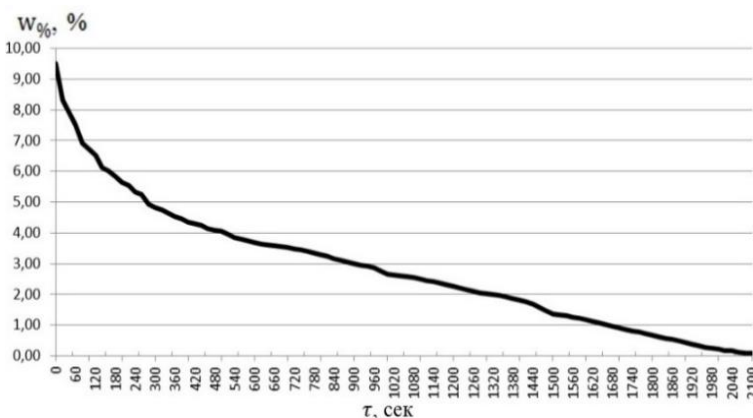


Рисунок 2 – Загальний вигляд кривих кінетики сушки деревини на прикладі породи береза

породами та диференціювання початкової вологості застосовано універсальну відсоткову величину вмісту води в матеріалі від початкової маси

$$v = \frac{G_{\text{поч.}} - W_i}{G_{\text{поч.}}} \cdot 100\%$$

Досліджено кінетику сушки дерев'яних зразків (рис. 2). Для цього використовувалися ті самі породи дерева з двома рівнями початкової вологості: максимально штучно насичена вологою деревина та сировина з «цеховою вологістю» (значенням, зазвичай присутнім на виробничих об'єктах). Для порівняння значень між різними

де  $G_{\text{поч.}}$  – вага зразку перед початком сушки;  $W_i$  – кількість вологи у матеріалі у певний момент часу,  $W_i = \frac{y_i \cdot G_{\text{поч.}}}{100}$ ,  $y_i$  – відсоток вологи від початкової ваги зразку.

Основними причинами руху вологи в деревині є нерівномірний розподіл вологи за об'ємом матеріалу, неоднакова температура за об'ємом матеріалу та наявність у внутрішніх шарах деревини надлишкового, в порівнянні із зовнішнім середовищем, тиску. У даному випадку, рівняння кінетики застосовані задля визначення швидкості процесу сушки.

Швидкість процесу сушки визначалась за формулою

$$v = -\ln(w_{\%i}/w_{\%0}),$$

де  $w_{\%i}/w_{\%0}$  – співвідношення між вологістю у  $i$ -тому інтервалі та початковою вологістю матеріалу.

Криві для усіх порід мають однорідний вигляд та на них відсутні різкі злами. Базуючись на цьому, існує можливість з'ясувати порядок реакції, яка відбувається. Розрахунковим шляхом встановлено, що відбувається реакція першого порядку, яку можна характеризувати загальною формулою  $y = ax + b$ .

Надано оцінку енергетичної складової процесу сушки. Розрахунок проводився за формулою

$$Q = c_d \cdot m_d \cdot \Delta T_d + c_v \cdot m_v \cdot \Delta T_v + r_v \cdot m_v,$$

де  $c_d$  та  $c_v$  – питомі теплоємності деревини та води відповідно, кДж/(кг·К);  $m_d$  та  $m_v$  – маса деревини та води відповідно, кг;  $\Delta T_d$  та  $\Delta T_v$  – різниця температур між кінцевим та початковим станом деревини та води відповідно, К;  $r_v$  – питома теплота пароутворення, Дж/кг.

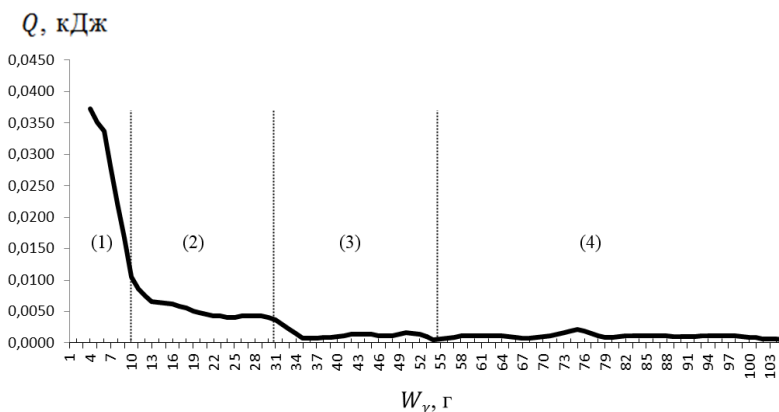


Рисунок 3 – Загальний вигляд енергетичних кривих сушки на прикладі породи береза:

(1)–(4) – умовні етапи сушіння сировини

процесу сушки та дозволили обрахувати енергетичні значення для заданих умов. Наведені результати досліджень надають змогу оцінити енергетичний внесок стадії сушки сировини до сукупних енерговитрат виробничого циклу піролізу.

Маючи набори точок замірів температури та кількості вологи в зразку, визначені через рівномірні проміжки часу, обраховується енергія для кожного інтервалу, а отримані енергетичні значення сумуються. Загальний вигляд кривої на прикладі березової сировини представлено на рис. 3. Проведені дослідження продемонстрували стадійність

Проаналізувавши енергетичні криві, зроблено висновок про фрагментарну доцільність застосування однакової кількості палива на усіх чотирьох етапах сушіння сировини (рис. 3). З точки зору максимальної економії без втрат якості кінцевого продукту варто інтенсифікувати процес на етапах (1) та (2) та максимально зменшити на етапах (3) та (4). Аналітичний розрахунок дозволив запропонувати заходи скорочення енергоспоживання на стадії сушки сировини. У перерахунку на частку початкової величини економія може складати біля 35% від величини енерговитрат існуючої технології.

**Третій розділ** присвячено проектуванню експериментальної установки для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини. Обґрунтовано необхідність оперування величиною коефіцієнту теплопровідності при встановленні найбільш енергоощадних параметрів проведення виробничого процесу.

Визначення коефіцієнта теплопровідності деревини відповідно до її породи і в залежності від температури дозволяє найбільш розумно спрямовувати необхідну кількість енергії на кожному з етапів виробництва продуктів піролізу. Це зумовлює економію енергії і, як наслідок, істотне зменшення витрат підприємства, пов'язаних із втратами тепла. Крім того, зменшення кількості викидів від використання палива в процесі виробництва сприятливо позначається на екологічній складовій технології.

Для коректного визначення температурних значень коефіцієнтів теплопровідності деревини необхідно абстрагуватися від геометричної складової в процесі передачі тепла всередині тіла, теплопровідність якого вимірюється. Вирішити подібну проблему допомогли методи математичного моделювання та відповідні алгоритми непрямого пошуку величин.

Проаналізовано існуючі способи ідентифікації коефіцієнту теплопровідності деревини. Стосовно до випадку з деревинним матеріалом необхідно модернізувати відомі методи, прилаштувавши їх до роботи з сировиною, враховуючи фізичні властивості матеріалу.

Більшість способів визначення теплопровідності матеріалів полягають у тому, що досліджується плаский зразок відомої товщини, який піддають тепловому контакту разом з еталонним зразком, фіксують температуру їх зовнішніх поверхонь за завчасно заданої температури та вимірюють температуру площини контакту. Застосування еталону або порівняння з ним не здатне вирішити проблему ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини через те, що цей матеріал має чітко виражені анізотропні властивості, а тому повинен досліджуватися як об'ємний, а не плаский зразок.

Існує певна можливість адаптувати деяку частину способів визначення коефіцієнту теплопровідності твердих матеріалів для завдань експерименту, але вони фізично не витримують навантаження в робочому діапазоні температур, більших за 400°C. Автори способів пропонують застосування пристроїв з двох (або більше) термостатуючих плит-нагрівачів, а також спеціального охолоджувача. В деяких випадках пропонується поєднати холодильник з вимірювачем теплового потоку, а також відокремити перетворювач електричної енергії датчика від однієї з термостатуючих плит.

Установка, що запропонована в роботі, дозволяє врахувати не тільки нелінійність зміни коефіцієнта теплопровідності деревини з підвищенням температури до 600°C, а й анізотропію теплопровідних властивостей матеріалу. Спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини передбачає утворення довкола циліндричного зразку теплового потоку, що спрямований від периметра зразку до його центру, звідки буде забезпечуватися тепловідвід. Цей спосіб відрізняється від усіх зазначених вище тим, що об'єкт дослідження у вигляді твердого тіла з анізотропією теплопровідних властивостей одночасно піддають нагріву ззовні та охолодженню зсередини, при цьому вимірюють температуру стаціонарних станів, визначаючи температурне поле у зразку.

Навколо зразка керамічним нагрівачем блочного типу створюється тепловий потік, спрямований від периферії циліндра до його центру, де прокачуванням охолоджувальної рідини через мідну трубку утворюється стік теплоти, яка пройшла через зразок деревини. Різниця температур холодоагенту на вході і виході з установки, яка визначається за сигналами термопар, відповідає кількості тепла, яке пройшло через зразок деревини за певний інтервал часу вимірювань. Температура у зразку змінюється при варіюванні теплового навантаження.

Найбільш повна передача тепла теплосприймаючим поверхням об'єктів забезпечується за їх безпосереднього контакту з теплогенеруючими елементами. Для цього за оригінальною технологією були виготовлені керамічні нагрівачі контактного типу, які монтувалися на зовнішніх поверхнях зразків деревини високотемпературними теплопередавальними клеями. Утворений нагрівачами тепловий потік проходить крізь тіло зразка і створює в ньому температурне поле. Температури фіксуються в об'ємі циліндричного зразка вздовж і впоперек волокон, як показано на рис. 4, за допомогою термопар в кварцовій уплітці діаметром 0,1 мм градування ТХА (ТХА – термопара хромель-алюміній).

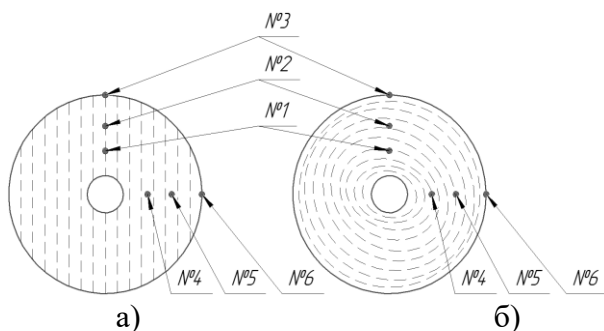


Рисунок 4 – Розміщення термопар у зразку деревини відносно волокон

В першій серії експериментів термопари 1–3 розташовані уздовж волокон деревини, а 4–6 перпендикулярно першій трійці (рис. 4, варіант а). Для другої серії експериментів була обрана більш природня постановка задачі з розміщенням волокон за концентричними «річними кільцями» росту дерева (рис. 4, варіант б). Таким чином, у другому випадку дані термопар 1–3 та 4–6, відповідно, призначені для уточнення даних одне одного.

У центрі кожного об'єкта вивчення (циліндра, виконаного з досліджуваної породи дерева), уздовж його вертикальної вісі розташовано отвір, до котрого без зазорів прилягає мідна трубка, крізь яку прокачується вода. Витрату води визначено за показаннями ротаметрами, а регулювання здійснено за допомогою використання запірних вентилів.

Установка для визначення коефіцієнта теплопровідності деревини включає в себе (рис. 5): теплову камеру, дві ємності для води, з'єднувальні трубки,

комплект з дев'яти термопар, пристрій для обробки термометричної інформації, який передає сигнали до персонального комп'ютера.

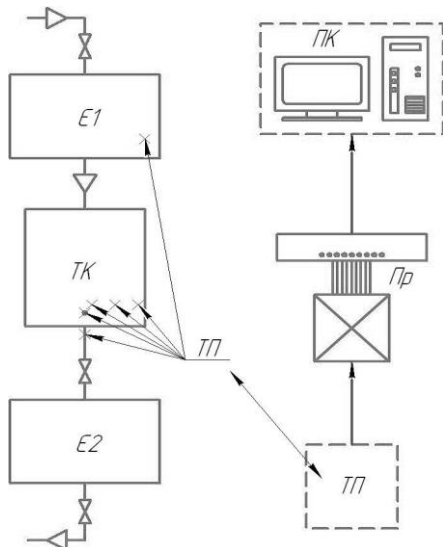


Рисунок 5 – Умовна схема експериментальної установки:  
 Є1 – початкова ємність з водою,  
 Є2 – ємність для збору води,  
 ТК – теплова камера, ТП – комплект термопар, Пр – перетворювач термометричної інформації, ПК – персональний комп'ютер

Сама теплова камера складається з: мідної трубки, досліджуваного зразка у вигляді дерев'яного циліндра, нагрівача з чотирьох блоків, подвійного шару теплової ізоляції з повсті МКРВ-200 з наклеєною на зовнішню поверхню алюмінієвою фольгою і корпусу, виконаного з полірованої фольги завтовшки 0,15 мм сплаву 20Х80Н, шви в якому герметизовані високотемпературним силіконовим герметом, й верхньої і нижньої кришки корпусу, ізоляція яких виконана аналогічним чином. Крім термопар, розташованих безпосередньо в досліджуваному зразку деревини, в тепловій камері також знаходиться термопара, яка вимірює температуру в прошарку ізоляції.

Реєструюче обладнання в складі перетворювача сигналу, силового вторинного приладу і персонального комп'ютера фіксує зміни під час роботи установки через однакові проміжки часу. Ці дані співвідносяться з величиною потужності нагрівача для кожного температурного і часового інтервалу. Автоматизацію збору термометричної інформації зведено до програмної фіксації результатів експерименту одразу ж під час його протікання з можливістю подальшої обробки зібраних даних.

У четвертому розділі подано механізми математичної обробки даних з кількох серій експерименту, виконаних згідно схеми з попереднього розділу. Визначено аналітичну основу для алгоритму та обрано граничні умови.

Оціночна математична модель базувалася на диференційному рівнянні

$$\frac{\partial t}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{c\rho} \cdot \left( \frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial z^2} \right) + \frac{q_v}{c\rho},$$

де  $\frac{\partial t}{\partial \tau}$  – зміна внутрішньої енергії з плином часу (розглядається кожний стаціонарний випадок, тобто  $\frac{\partial t}{\partial \tau} = 0$ );  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності, Вт/(м·К);  $c$  – питома теплоємність, Дж/К;  $\rho$  – густина, кг/м<sup>3</sup>;  $\frac{\partial^2 t}{\partial x^2}$ ,  $\frac{\partial^2 t}{\partial y^2}$  та  $\frac{\partial^2 t}{\partial z^2}$  – проекції вектору щільності теплового потоку на координатні вісі  $x$ ,  $y$  та  $z$  відповідно;  $q_v$  – питома щільність тепловиділення, Вт/м<sup>3</sup>.

Граничні умови (ГУ) мали кілька категорій:

а) ГУ другого роду. При цьому задано величини теплового потоку для кожної точки поверхні тіла та будь-якого моменту часу (вони наявні на зовнішній поверхні циліндру, до якої прилягає нагрівач);

б) ГУ третього роду. При цьому задано температуру навколишнього середовища та закон теплообміну між поверхнею тіла та навколишнім середовищем (задля коректного опису процесу теплообміну між середовищем та поверхнею тіла використовується закон Ньютона–Ріхмана);

в) ГУ четвертого роду характеризують умови теплообміну системи тіл або тіла з навколишнім середовищем за законом теплопровідності (відштовхуючись від уявлення про ідеальний контакт між тілами – температури дотичних поверхонь однакові – вони матимуть місце між зовнішньою стінкою металевої трубки та внутрішньою поверхнею отвору, який розташований у середині циліндру).

Також для розрахунків використано відомості про геометричні параметри зразків і фізичні залежності для допоміжних елементів: (для води та міді – теплопровідність  $\lambda(T)$  та коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$  – для води).

Чисельна модель процесу, тобто пряма задача теплопровідності, складена з використанням методу кінцевих елементів. Сутність методу полягає у тому, що область, в якій ведеться пошук рішення диференціальних рівнянь, розбито на кінцеву кількість елементів. У кожному з елементів обрано вигляд апроксимуючої функції. Значення функцій на границях елементів відомі завчасно. Коефіцієнти апроксимуючих функцій знаходяться, виходячи з умов про рівність значень сусідніх функцій на границях між елементами. Потім вони виражаються через значення функцій у вузлах елементів. Далі складається система лінійних алгебраїчних рівнянь. Кількість рівнянь дорівнює кількості невідомих значень у вузлах.

Маючи числову модель, проведено ідентифікацію екстремальними методами, за середньоквадратичним відхиленням отриманих рішень прямої задачі із експериментальними даними. Далі знайдено цільові значення, користуючись методом деформованого багатогранника Нелдера та Міда.

Нелінійна зворотна внутрішня задача теплопровідності розглядається як задача визначення стійкого рішення за даними вимірів температур в декількох внутрішніх точках просторової області. Формалізувати її можна таким чином

$$A[\lambda(T)] = T^e,$$

де  $\lambda(T)$  – залежність коефіцієнту теплопровідності від температури;  $T^e$  – змінна стану процесу, що має вигляд  $T^e = T(M)$ , і відома з експерименту;  $A$  – оператор, який пов'язує шукану залежність  $\lambda(T)$  з початковими даними  $T^e$ .

Дана задача, так само, як будь-яка інша зворотна задача теплопровідності (ЗЗТ), вважається некоректною за Адамаром через порушення причинно-наслідкового зв'язку, що зумовлює нестійкість отриманих рішень. Для вирішення такої некоректної задачі її або зводять до умовно-коректної, або залишають некоректною, але застосовують один з методів регуляризації. Наразі використовувався метод регуляризації А. М. Тихонова з пошуком регуляризуючого параметру.

Розглянуто тепловий процес у тілі, що займає у просторі область, яку можна описати крайовими задачами теплопровідності з наступної системи:

$$\left\{ \begin{array}{l} -\operatorname{div}(\lambda(T_l)\nabla T_l) = F(x), \quad x \in D, \\ -\lambda(T_l)\frac{\partial T_l}{\partial \nu} = q_l, \quad M \in \Gamma_1, \\ -\lambda(T_l)\frac{\partial T_l}{\partial \nu} = \alpha_c(T_l - T_{\text{сер}}), \quad M \in \Gamma_2, \\ T_l(M_k) = T_{kl}^e, \quad k = \overline{1, m}, \end{array} \right.$$

де  $T_l$  – температура тіла для крайової задачі, коли діє тепловий потік  $q_l$ ;  $l = \overline{1, n}$ ;  $D$  – область простору, яку займає тіло;  $\Gamma_1$  та  $\Gamma_2$  – частини границь області  $D$ ;  $\lambda(T_l)$  – коефіцієнт теплопровідності, який залежить від температури;  $\alpha_c$  – коефіцієнт тепловіддачі поверхні тіла  $\Gamma_2$ ;  $T_{\text{сер}}$  – задана температура зовнішнього середовища, котре оточує тіло;  $q_l$  – задані теплові потоки на границі  $\Gamma_1$ ;  $\nu$  – зовнішня нормаль до границі тіла;  $n$  – кількість стаціонарних нелінійних крайових задач з одним і тим самим шуканим коефіцієнтом теплопровідності;  $m$  – кількість вимірів температури для кожної крайової задачі;  $M_k$  – окремі точки області  $D$ , в яких виміряна температура  $T_{kl}^e$  при різних впливах теплових потоків  $q_l$  з похибкою, яка характеризується випадковою величиною, розподіленою за нормальним законом, з нульовим математичним очікуванням і дисперсією  $\sigma^2$ .

За даними теплофізичного експерименту знайдено залежність коефіцієнту теплопровідності від температури на усьому інтервалі температур, тобто  $\lambda(T) = \lambda(T_l)$  для кожної крайової задачі. Задля вирішення внутрішньої ЗЗТ використано принцип регуляризації за Тихоновим, що зводиться до мінімізації функціоналу

$$J = \sum_{l=0}^n \int_D [T_l(M) - T_l^e(M)]^2 dM + \alpha \cdot \Omega[\lambda(T)],$$

де  $T_l(M)$  – температура, яка моделюється для  $l$ -ої крайової задачі;  $T_l^e(M)$  – температура з теплофізичного експерименту;  $\alpha \in R$  – параметр регуляризації;  $\Omega[\lambda(T)]$  – стабілізуючий функціонал для всього інтервалу зміни температури.

Невідому функцію  $\lambda(T)$  представлено у вигляді

$$\lambda(T) = G(\vec{\Lambda}, T),$$

де  $\vec{\Lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_\lambda})$  – вектор параметрів;  $\lambda_i, i = \overline{1, n_\lambda}$  – вузлові значення коефіцієнту теплопровідності для кожної температури  $\bar{T}_i$ , котрі впорядковані за зростанням;  $\bar{T}_1$  та  $\bar{T}_{n_\lambda}$  – мінімальна та максимальна температури на інтервалі ідентифікації коефіцієнту теплопровідності;  $G$  – сплайн-інтерполяція для отриманого набору точок.

Таким чином, ідентифікація невідомого коефіцієнту теплопровідності зводиться до визначення невідомого вектору  $\vec{\Lambda} = (\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n_\lambda})$ . Розрахунок з використанням даних експерименту дозволив отримати максимальне відхилення рішення змодельованої задачі від точної залежності коефіцієнта теплопровідності (не вище за 5%) та ідентифікувати коефіцієнт теплопровідності в залежності від температури.

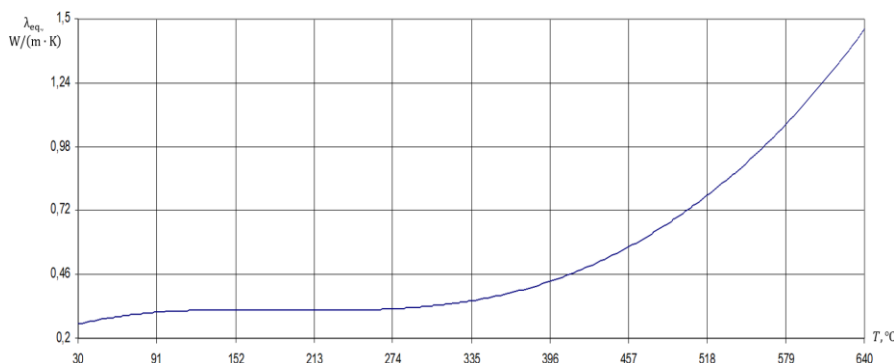


Рисунок 6 – Ідентифікація коефіцієнту теплопровідності деревини (сосна) від температури

Базуючись на загальному вигляді отриманих кривих, сформовано рекомендації щодо зменшення кількості палива, необхідного для проведення виробничого циклу за температур вище 300°C (рис. 6).

У п'ятому розділі наведено дослідження існуючої установки для піролізу деревної сировини і заходи її технічної модернізації. Розглянуто недоліки саморобних та низькокваліфікованих підприємств з виробництва деревного вугілля. Представлено результати обстеження працюючої установки та термометричні дані, зібрані на зовнішніх поверхнях елементів конструкції. Спираючись на сітку температурних даних поверхонь камери та топки, і знаючи кліматичні умови роботи установки, за класичною формулою обчислено величини теплових втрат:

$$Q_i = \alpha_i \cdot F_{\text{діл.}} \cdot (T_{\text{діл.}} - T_{\text{повітря}}),$$

де  $Q_i$  – теплові втрати на  $i$ -тій ділянці, Вт;  $F_{\text{діл.}}$  – площа ділянки, м<sup>2</sup>;  $T_{\text{діл.}}$  та  $T_{\text{повітря}}$  – температури ділянки та повітря, відповідно, К.

Температура повітря задається в залежності від кліматичних умов, що розглядаються: –10°C для зимового періоду та +25°C для літнього. Для обчислення конвективної складової коефіцієнт тепловіддачі розраховується згідно

$$\alpha_i = (Nu \cdot \lambda_{\text{повітря}}) / L,$$

де  $Nu$  – критерій подібності Нусельта (обчислюється для двох випадків через додаткові критерії подібності, які враховують вплив фізичних властивостей теплоносія та особливостей гідромеханіки його руху на інтенсивність тепловіддачі; фізичні властивості повітря, які входять до складу критеріальних рівнянь, узяті при визначаючій температурі);  $\lambda_{\text{повітря}}$  – коефіцієнт теплопровідності повітря (різний для різної пори року), Вт/(м·К);  $L$  – ширина ділянки (вважається, що повітря рухається уздовж стінки).

Для обчислення теплового випромінювання, як складової теплових втрат, коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_i$  вираховувано за наступною формулою:

$$\alpha_i = \varepsilon \cdot C_0 \cdot \left( \left( \frac{T_{\text{діл.}} + 273}{100} \right)^4 - \left( \frac{T_{\text{повітря}} + 273}{100} \right)^4 \right) / (T_{\text{діл.}} - T_{\text{повітря}}),$$

де  $\varepsilon$  – ступінь чорноти поверхні теплообміну;  $C_0$  – коефіцієнт випромінювання абсолютно чорного тіла.

Результати обчислень свідчать про недостатність теплової ізоляції уздовж всього периметру камер та топки. В результаті експериментів з різними теплоізоляційними матеріалами та клейовими речовинами, було підбрано необхідну ізоляцію, яка зменшила теплові втрати та знизила температури зовнішніх поверхонь до величин, нормованих державними стандартами.

Проведено дослідження альтернативних способів завантаження сировини до вагонеток установки піролізу деревини. На основі феноменологічної моделі теплопровідності для композитно-пористих тіл оцінено внесок радіаційної складової до процесів теплообміну у внутрішньому просторі вагонетки.

Представлено розрахункову модель рівномірного розподілу твердої фази в закритому об'ємі. Запропоновано алгоритм розрахунку безрозмірних величин внеску зон твердої фази та газового прошарку до еквівалентної теплопровідності таких ділянок. Відзначено роль радіаційної складової в теплообміні поряд з конвективною. Показано, що відсоток випромінювання в подібних теплових процесах в окремих випадках сягає чверті від загальної величини теплопереносу.

Оцінено доступні габарити комплексу технологічного обладнання. На базі цього обчислено можливі розміри вагонеток для закладання сировини. Розглянуто три варіанти розміщення дерев'яних полін в об'ємі вагонетки. Виходячи з попередніх припущень про ідеальну циліндричну форму полінець, розраховано корисний та шкідливий об'єм для кожного варіанту орієнтації пакету полін у вагонетці з урахуванням різного діаметру полін. Обрано найбільш доречний варіант розміщення сировини – як з точки зору економії місця в об'ємі, так і з точки зору напрямку теплового потоку в просторі піролізної камери.

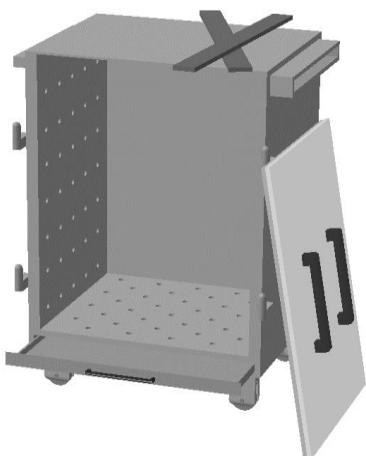


Рисунок 7 – Вагонетка вдосконаленої конструкції

Враховано неідеальність геометричної форми сировинних дерев'яних полін, розглянуто перелік заходів, перспективних для модернізації конструкції вагонетки. Запропоновано зміну конструкції вагонетки.

Нова конструкція передбачає:

- створення цільного колекторного ходу, що знаходиться у простінках і між двома днищами вагонетки;
- перфорацію внутрішніх бокових стінок вагонетки та внутрішнього днища для проникнення теплоти вторинних (піролізних) газів із колектору до простору вагонетки і додаткового прогріву сировини;
- парні роз'єми для з'єднання вагонеток одна до одної в ланцюг з подальшим приєднанням до основного колекторного ходу, який веде до камери спалювання у топці;
- окремий лоток для збору конденсату і тріски, що дозволяє позбавитись від отворів у піролізній камері для відводу побічних продуктів піролізу.

Підбито детальні підсумки за кожним видом модернізації конструктивних елементів установки піролізу деревної сировини. Відзначено недоліки рішень проектувальників у окремих вузлах досліджуваного апарату. Оцінено величину можливої економії та технологічні вигоди від використання обладнання вдосконаленої конструкції.

У додатках для різних порід дерева наведені графіки кінетичних залежностей сушки, графіки швидкості сушки, функції для пошуку порядку реакції процесу сушки, енергетичні криві процесу сушки, принципова схема експерименту з визначення коефіцієнту теплопровідності, два патенти на корисні моделі: UA 103355 «Спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини» та UA 107688 «Пристрій для ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини», а також дані термометричних досліджень конструктивних елементів діючої установки для піролізу деревної сировини, список публікацій здобувача та акт впровадження результатів дисертаційної роботи до навчального процесу в НТУ «ХП».

## ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено науково-практичну задачу вдосконалення технологічних режимів роботи та модернізації апаратурного забезпечення установки піролізу деревної сировини у промислових умовах.

1. Проаналізовано стан галузі переробки деревної сировини та використання біопалива в Україні та світі. Огляд наукової і патентної літератури дозволив підтвердити актуальність тематики переробки деревинної сировини на високоякісне деревне вугілля.

2. Досліджено класичне та сучасне апаратурне забезпечення галузі піролізу деревини на прикладі вуглевипалювальних печей різних конструкцій, що дозволило окреслити доступні шляхи модернізації існуючих виробництв.

3. Досліджено мікроскопічну структурну будову сировинного матеріалу та визначено основні закономірності для листвяних та хвойних порід дерева. Встановлено інтервали коливань значень пористості досліджуваних матеріалів. Проведено експериментальне дослідження етапу сушки сировини з різною початковою вологістю для п'яти різних порід деревини. Визначено кінетичні закономірності проведення процесу піролізу деревної сировини. Розраховано первинні енергетичні витрати, необхідні для висушування вологої сировини до робочих показників вологості. Оцінено величину можливої економії первинних енергоресурсів, яка дозволяє забезпечити зменшення відносної кількості палива на рівні 35% від початкового значення за рахунок досягнення максимальної енергоефективності окремо для кожного етапу сушки.

4. Розроблено експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини, яка враховує не тільки нелінійність зміни коефіцієнта теплопровідності деревини з підвищенням температури до 640°C, а й анізотропію теплопровідних властивостей матеріалу. Запропоновано спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини, який передбачає утворення довкола циліндричного зразку теплового потоку, що спрямований від периметра зразку до його центру, звідки буде забезпечуватися тепловідвід. Здобуто два патенти на корисну модель – для установки та способу ідентифікації коефіцієнту теплопровідності деревини.

5. За результатами теплофізичного експерименту розроблено математичний алгоритм ідентифікації коефіцієнту теплопровідності деревини. Виконано

комплекс розрахунків за експериментальними даними, що дозволили визначити залежність коефіцієнту теплопровідності деревини від температури з похибкою збіжності ідентифікованих даних із точною залежністю, яка не перевищує 5%.

6. Розроблено нову методику розміщення сировини у об'ємі апарату. Запропоновано зміни конструктивних особливостей вагонетки для закладання деревинної сировини. Обрано найбільш доцільний варіант розміщення сировини – як з точки зору економії місця у об'ємі, так і з точки зору напрямку теплового потоку у піролізній камери. Обґрунтовано необхідність внесення змін до окремих елементів конструкції існуючої вагонетки з урахуванням геометричних параметрів матеріалів, які поступають на переробку, та технологічних можливостей основного і допоміжного устаткування. Запропоновано додаткові заходи вдосконалення конструкції установки для піролізу деревної сировини.

7. Проведено термометричне обстеження існуючої установки для піролізу деревної сировини. Для різних погодних умов і способів встановлення печі розраховано величину теплових втрат у навколишнє середовище через недосконалість теплової ізоляції, що дозволило підібрати нові теплоізоляційні матеріали та заходи для зменшення температури зовнішніх поверхонь піролізного апарату.

8. Результати дисертаційної роботи впроваджено у навчальний процес на кафедрі інтегрованих процесів та апаратів для підготовки спеціалістів за напрямком «Процеси та обладнання хімічної технології».

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Миронов А. М. Оцінка енерговитрат процесу сушки деревинної сировини / В. Є. Ведь, О. І. Ровенський, А. М. Миронов // Щоквартальний науково-практичний журнал «Інтегровані технології та енергозбереження» – Харків, 2014. – № 4. – С. 34–37.

*Здобувачем проведено оцінку витрат первинного палива на етап сушки деревинної сировини при підготовці до процесу піролізу.*

2. Миронов А. М. Сучасні проблеми вуглевипалювання і піролізу деревини / В. Є. Ведь, А. М. Миронов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Харків: НТУ «ХПІ», 2014. – № 49. – С. 88–95.

*Здобувачем сформульовано перелік проблем, з якими стикається обслуговуючий персонал сучасних вуглевипалювальних установок різної конструкції.*

3. Миронов А. М. Дослідження зв'язку між структурою деревини та кінетикою процесу її сушки / В. Є. Ведь, А. М. Миронов // Вісник Національного технічного університету «ХПІ» – Харків: НТУ «ХПІ», 2015. – № 44. – С. 47–51.

*Здобувачем проведено дослідження структурної будови деревини, для зразків різних порід досліджено кінетику сушки та обчислено її швидкість.*

4. Mironov A. Identification algorithms for thermal conductivity coefficient of wood using the inverse problem / V. Ved, S. Lushpenko, A. Mironov // Scientific technical journal «Industrial Technology and Engineering». Shymkent: M. Auezov South Kazakhstan State University – 2016. – № 1 (18). – PP. 16–21.

*Здобувачем проведено експеримент з визначення залежності коефіцієнту теплопровідності деревини від температури за координатними вісями.*

5. Mironov A. Installation for identification of heat conductivity coefficient of wood / V. Ved, A. Mironov, M. Satayev, A. Saipov // Scientific technical journal «Industrial Technology and Engineering». Shymkent: M. Auezov South Kazakhstan State University – 2016. – № 2 (19). – PP. 31–35.

*Здобувачем розроблено експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини.*

6. Патент на корисну модель 103355 Україна, МПК G01N 25/18. Спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини / А. М. Миронов, В. Є. Ведь; заявник і власник патенту НТУ «ХП». – № u 2015 06444; заявл. 30.06.2015; опубл. 10.12.2015, бюл. № 23. – 4 с.

*Здобувачем розроблено спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини.*

7. Патент на корисну модель 107688. Україна, МПК G01N 25/18. Пристрій для ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини / А. М. Миронов, В. Є. Ведь; заявник і власник патенту НТУ «ХП». – № u 2015 10415; заявл. 26.10.2015; опубл. 24.06.2016, бюл. № 12. – 5 с.

*Здобувачем розроблено пристрій для ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини.*

8. Миронов А. Н. Краткий обзор технологий углежжения и пиролиза древесного сырья / В. Е. Ведь, А. Н. Миронов // Тези доповідей XXII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків: НТУ «ХП», 2014. – Ч. III. – С. 11.

*Здобувачем викладено основні тенденції у сучасній галузі вуглевипалювання.*

9. Mironov A. Alternative sources of energy / A. Mironov // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції студентів і молодих вчених «Інтеграційні процеси й інноваційні технології. Досягнення і перспективи технічних наук» (іноземними мовами) – Kharkiv: KhNAHU, 2015. – Р. 99.

10. Myronov A. Determination of rational parameters for energy efficient drying process of different wood species / A. Myronov, V. Ved // Тези доповідей Міжнародної науково-практичної конференції Computer Aided Process Engineering (CAPE) – Paderborn, Germany: CAPE Forum 2015, 2015. – Р. 67–69.

*Здобувачем запропоновано принцип визначення оптимальних технологічних параметрів для проведення стадії сушки деревинної сировини.*

11. Миронов А. М. Важливість визначення коефіцієнту теплопровідності сировини для проведення процесу піролізу деревини / В. Є. Ведь, А. М. Миронов // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків: НТУ «ХП», 2016. – Ч. II. – С. 300.

*Здобувачем обґрунтовано важливість визначення коефіцієнту теплопровідності сировини для проведення процесу піролізу деревини.*

12. Миронов А. М. Огляд європейського досвіду у галузі піролізу деревної сировини / В. Є. Ведь, А. М. Миронов, В. О. Давидов // Тези доповідей XXIV

міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків: НТУ «ХП», 2016. – Ч. II. – С. 298.

*Здобувачем проаналізовано європейський досвід у галузі піролізу деревної сировини.*

13. Миронов А. М. Передумови до збільшення попиту на деревне паливо та його похідні у Європі та світі / В. Є. Ведь, А. М. Миронов, Д. С. Король // Тези доповідей XXIV міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» – Харків: НТУ «ХП», 2016. – Ч. II. – С. 299.

*Здобувачем змальовано основні передумови до збільшення попиту на деревне паливо та його похідні у європейських та світових країнах.*

## АНОТАЦІЇ

**Миронов А. М. Теоретичні та експериментальні дослідження теплообмінних процесів термічного розкладу вуглецевмісної сировини в удосконаленому піролітичному апараті.** На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та обладнання хімічної технології. – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» Міністерства освіти і науки України, Харків, 2017 р.

Дисертацію присвячено вивченню теплових процесів, які відбуваються у апаратах піролізу вуглецевмісної сировини, задля вдосконалення конструкції основного та допоміжного обладнання установок для вуглевипалювання.

Розглянуто існуючий попит на деревне вугілля як один з альтернативних енергетичних ресурсів сучасності. Досліджено актуальність тематики для розвинених країн світу та України зокрема.

Проведено мікроскопічне дослідження структурної будови деревини п'яти порід. Досліджено кінетику сушки сировини із різним рівнем початкової вологості. Побудовано енергетичні криві сушки і аналітично оцінено можливу економію первинного палива на цій стадії виробничого циклу.

Розроблено експериментальну установку для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини, яка враховує не тільки нелінійність зміни коефіцієнта теплопровідності деревини з підвищенням температури до 600°C, а й анізотропію теплопровідних властивостей матеріалу. Запропоновано спосіб ідентифікації коефіцієнта теплопровідності деревини, який базується на розробленій експериментальній установці. Для визначення коефіцієнту теплопровідності деревини за результатами теплофізичного експерименту вирішено зворотню задачу теплопровідності.

Виявлено неефективність теплової ізоляції на зовнішніх поверхнях елементів конструкції існуючої установки. Запропоновано нові заходи ізолювання для зменшення теплових втрат до навколишнього середовища. Запропоновано новий принцип закладання дерев'яних полін з урахування геометрії сировини та вагонетки. Вдосконалено конструкцію вагонетки таким чином, що максимізувати корисний вплив усіх теплових потоків, які циркулюють у апараті.

*Ключові слова:* вуглецевмісна сировина, зворотна задача теплопровідності, коефіцієнт теплопровідності, піроліз, піролітичний апарат, пористість, сушка, теплові процеси, теплообмін.

**Миронов А. Н. Теоретические и экспериментальные исследования теплообменных процессов термического разложения углеродсодержащего сырья в усовершенствованном пиролизическом аппарате.** На правах рукописи.

Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и оборудование химической технологии. – Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт» Министерства образования и науки Украины, Харьков, 2017 г.

Диссертация посвящена изучению тепловых процессов, происходящих в аппаратах пиролиза древесного сырья, для совершенствования конструкции основного и вспомогательного оборудования.

Рассмотрен существующий в Украине спрос на древесный уголь как один из наименее затратных альтернативных энергетических ресурсов, поддающийся восстановлению. Изучен опыт стран ЕС и мира по использованию энергии биомассы и углеродсодержащего сырья. Исследована конструкция и принцип действия известных установок для проведения процесса пиролиза и углежжения. Определены их преимущества и недостатки в условиях требований, предъявляемых стандартами нашего времени. Представлена конструкция действующего аппарата современного типа, подлежащего конструктивной модернизации.

Приведены основные сведения о процессе пиролиза. Рассмотрены мероприятия по подготовке начального древесного сырья к производственному циклу. Проведено микроскопическое исследование структурного строения древесины различных пород: берёзы, сосны, дуба, бука и красного дерева. Исследована кинетика процесса сушки сырья с различным уровнем начальной влажности для всех указанных пород. Построены энергетические кривые процесса сушки и аналитически оценено возможную экономию первичного топлива на этой стадии производственного цикла.

Обоснована необходимость определения коэффициента теплопроводности материала для корректного проведения производственного процесса. Разработано экспериментальную установку для определения коэффициента теплопроводности древесины, которая учитывает не только нелинейность изменения коэффициента теплопроводности древесины с повышением температуры до 600°C, но и анизотропию теплопроводных свойств материала.

Проведено обследование действующей установки пиролиза древесного сырья. Выявлена неэффективность тепловой изоляции на наружных поверхностях элементов конструкции установки. Предложены новые меры изоляции для уменьшения величины тепловых потерь в окружающую среду. Исследовано явление композитной пористости твёрдых материалов. Предложено расчётную модель эффективной пористости, адаптированную для древесины, помещённой в закрытый объём. Рассмотрены доступные масштабы модернизации вагонетки

для закладки сырья. Предложена новая методология закладки деревянных поленьев с учётом геометрии сырья и вагонетки. Конструкция вагонетки модернизирована таким образом, чтобы максимизировать влияние всех тепловых потоков, циркулирующих в аппарате.

*Ключевые слова:* коэффициент теплопроводности, обратная задача теплопроводности, пиролиз, пиролитический аппарат, пористость, сушка, тепловые процессы, теплообмен, углеродосодержащее сырьё.

**Myronov A. M. Theoretical and experimental research of the heat exchange processes of carbon-containing raw materials thermal decomposition in an improved pyrolytic apparatus.** Manuscript.

Thesis for granting the Degree of Candidate of Technical sciences in specialty 05.17.08 – processes and equipment of chemical technology. – National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute» of Ministry of Education and Science of Ukraine, Kharkiv, 2017.

The thesis is dedicated to the study of thermal processes taking place in pyrolysis apparatus of carbon-containing materials, to improve the design of the main and auxiliary equipment for charcoal burning installations.

The existing demand for charcoal as one of the alternative energy resources of the present days is considered. The urgency of the subject for the developed countries of the world and Ukraine, in particular, has been explored.

A microscopic study of the structure for five woods breeds is conducted. The kinetics of the raw materials drying process with a different level of initial moisture is studied. The energy curves of the drying process are constructed and the possible saving of primary fuel for this stage of production cycle is analytically estimated.

An experimental installation for determining the thermal conductivity coefficient of wood, which takes into account not only the nonlinearity of the wood thermal conductivity change with temperature increasing up to 600°C, but also the anisotropy of material thermal conductive properties is developed. The method of wood thermal conductivity coefficient identifying, based on the developed experimental installation, is proposed. For the identification of the wood thermal conductivity coefficient, the inverse heat conduction problem is solved by the results of the thermophysical experiment.

The inefficiency of the existing pyrolysis unit thermal insulation is identified. New measures of isolation that helps to reduce heat losses into the environment are proposed. A new methodology for wooden logs loading, taking into account the geometry of raw materials and trolleys, is proposed. The construction of the trolley is modernized in a way to maximize the effect of all heat flows that circulate in the apparatus.

*Key words:* carbon-containing materials, coefficient of thermal conductivity, drying, heat exchange, inverse heat conduction problem, porosity, pyrolysis, pyrolytic apparatus, thermal processes.





Підписано до друку 03.11.2017 р. Формат 60x90/16.  
Папір офсетний. Друк – цифровий. Ум. друк. арк. – 0,9.  
Гарнітура Times New Roman. Наклад 100 прим. Зам. №17110501

---

Надруковано у копі-центрі «МОДЕЛІСТ»  
(ФО-П Миронов М.В., свідоцтво ВО4№022953)  
м. Харків, вул. Мистецтв, 3 літер Б-1  
тел. 7-170-354  
**[www.modelist.in.ua](http://www.modelist.in.ua)**