

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
“КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”**



На правах рукопису

НОВОХАТ ОЛЕГ АНАТОЛІЙОВИЧ

УДК 676.056.5:66.085.1(.43.3)

**ПРОЦЕС СУШІННЯ ФЛЮТИНГУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ
ЕНЕРГІЇ ІНФРАЧЕРВОНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ**

Спеціальність 05.17.08 - процеси та обладнання хімічної технології

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, професор
Марчевський Віктор Миколайович,
Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут”,
професор кафедри машин та апаратів хімічних і
нафтопереробних виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Атаманюк Володимир Михайлович,
Національний університет “Львівська політехніка”,
інститут хімії та хімічних технологій,
завідувач кафедри хімічної інженерії

доктор технічних наук,
старший науковий співробітник
Малецька Кіра Дмитрівна,
лауреат Державної премії України в галузі науки і
техніки, пенсіонер

Захист відбудеться 27 грудня 2016 р. о 14 годині 30 хвилин на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 в Національному технічному університеті України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корпус 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України “Київський політехнічний інститут” за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий 26 листопада 2016 р.

Вчений секретар спеціалізованої
вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. У зв'язку зі зростаючим обсягом виробництва та попитом на гофрокартон суттєво збільшується виробництво паперу для гофрування – флютингу.

Лімітуючою стадією у виробництві флютингу є процес сушіння на сушильних циліндрах папероробної машини. Цей спосіб має ряд недоліків: висока вартість обладнання, викиди продуктів згоряння при виробництві водяної пари для сушильних циліндрів, складність конструкції сушильного обладнання та його обслуговування, налипання клею на поверхні сушильних циліндрів після проклеювання флютингу.

Ці недоліки є підставою для дослідження альтернативних способів сушіння та розробки нових конструкцій сушильних установок, що забезпечують зменшення негативного впливу на довкілля шляхом зменшення утворення обсягів продуктів згоряння, здешевлення обладнання та зменшення енерговитрат.

Одним з перспективних способів сушіння є використання енергії інфрачервоного випромінювання (ІЧВ), що має здатність проникати в об'єм матеріалу (радіаційний спосіб сушіння). Флютинг швидко нагрівається від теплоти, що виділяється в його об'ємі під час проходження ІЧВ, зменшуючи час нагрівання.

Розробка промислових установок сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ потребують знання кінетичних закономірностей цього процесу. Це вимагає дослідження кінетики процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та розробки методики розрахунку параметрів процесу, необхідних для конструювання сушильного обладнання.

Науково-теоретична та практична значущість обраного напряму досліджень підтверджує актуальність дисертаційної роботи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до плану наукової роботи кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» та ініціативної теми № 05/15 ІХФ “Процес сушіння паперу із використанням енергії випромінювання” (№ Державної реєстрації 0115U001991).

Дисертаційна робота відповідає напряму фундаментальних та прикладних наукових досліджень НТУУ “КПІ” – “Створення високоефективних, екологічно чистих, енерго- та ресурсозберігаючих технологій і обладнання у машинобудуванні, хімічній, легкій, нафтопереробній промисловості, промисловості будівельних матеріалів, розробки об'єктно-орієнтовних систем конструкційно-технологічного моделювання та забезпечення якості й надійності прогресивної техніки”.

Дисертаційна робота відповідає переліку пріоритетних напрямів розвитку науки і техніки на період до 2020 р., затверджених Кабінетом міністрів України (згідно Закону України № 2519-VI від 9.09.2010 р. Про внесення змін до Закону України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки та Перелік пріоритетних тематичних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок на період до 2015 року (Додаток до постанови Кабінету Міністрів України № 942 від 7 вересня 2011 р.)”).

Мета і задачі дослідження. Метою досліджень є визначення кінетичних закономірностей і основних параметрів процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, необхідних для інтенсифікації процесу та конструювання сушильного обладнання.

Відповідно до мети поставлені такі задачі:

- на основі аналізу літературних джерел запропонувати фізичну модель та математичне описання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- розробити експериментальну установку для дослідження кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ, методику проведення дослідження та провести експериментальні дослідження цього процесу;
- визначити адекватність математичної моделі експериментальним даним;
- на основі числового аналізу отриманих експериментальних даних встановити вплив основних параметрів процесу сушіння (густини теплового потоку, маси квадратного метру та початкового вологовмісту флютингу) на кінетику процесу та розробити рекомендації щодо їх вибору;
- запропонувати технічні рішення для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- розробити алгоритм розрахунку промислової установки для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

Об'єктом дослідження є процес сушіння флютингу із використанням енергії інфрачервоного випромінювання.

Предметом дослідження є кінетичні закономірності процесу сушіння флютингу із використанням енергії інфрачервоного випромінювання та визначення основних параметрів процесу, необхідних для інтенсифікації процесу сушіння та конструювання сушильного обладнання.

Методи дослідження. Теоретичним підґрунтям дисертаційної роботи є фундаментальні та прикладні положення теорії процесів та апаратів хімічної технології, тепло- й масообміну, фізичне і математичне моделювання.

Експериментальні дослідження проведені на комп'ютеризованій установці з використанням сучасних високоточних вимірювальних приладів. Результати досліджень використані для розрахунку задач математичного описання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

- вперше обґрунтовано підходи до процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та визначено основні параметри процесу;
- складено фізичну модель процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- науково обґрунтовано застосування математичної моделі радіаційного теплообміну для опису процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- вперше отримано кінетичні закономірності процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ, що необхідні для проектування сушильних установок;
- встановлено вплив параметрів процесу на швидкість сушіння і температуру флютингу та обґрунтовано способи інтенсифікації цього процесу;
- показано, що температура флютингу в першому періоді сушіння за малої

густини променевого потоку майже не змінюється і відповідає температурі мокрого термометра, а зі збільшенням густини променевого потоку температура збільшується і наближається до температури насичення.

Практичне значення одержаних результатів полягає в тому, що:

- встановлено технологічні засади проведення процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ;
- розроблено рекомендації для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ у визначених межах ефективних технологічних параметрів;
- запропоновано конструкції пристроїв для інтенсифікації процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ (патенти України на корисні моделі №35068, №58917, №1005807 та №105956);
- на основі визначених кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ розроблено алгоритм розрахунку промислових установок для сушіння флютингу;
- створено дослідну комп'ютеризовану установку для дослідження кінетики сушіння;
- науково-технічні результати дисертаційної роботи впроваджені в папероробному обладнанні, що виготовляє ТОВ ПТК “Вуглепром”, м. Дніпро;
- результати дисертаційної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ “КПІ”.

Особистий внесок здобувача. Виконано критичний аналіз літературних джерел щодо застосування енергії ІЧВ в процесах сушіння волокнистих матеріалів [1, 4, 14, 16, 20], визначено їх переваги та недоліки [1, 5, 19], встановлено закономірності кінетики тепло- й масообмінних процесів та формування науково-технічної проблеми [4, 7, 15]. Розроблено фізичну модель процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ [6, 17]. Розроблено експериментальну установку [1, 3, 5] та методику експериментальних досліджень [8], здійснено числовий аналіз отриманих кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу [1]. Розроблено алгоритм розрахунку сушильної установки та пристрої для сушіння флютингу [10-13, 18, 21, 22]. Впроваджені результати дисертаційної роботи [10].

Розробку математичної моделі процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ проведено спільно з науковим керівником проф. Марчевським В.М. [2, 9]

Апробація результатів досліджень. Основні положення дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на: XI Міжнародній науково-практичній конференції «Екологія. Людина. Суспільство» (Київ, 2008); IX міжнародній науково-практичній конференції “Проблеми пакувальної індустрії” (Київ, 2008); V, VI, VIII, XII Всеукраїнських науково-практичних конференціях студентів, аспірантів та молодих вчених “Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів” (Київ, 2009, 2010, 2011, 2013); I та V міжнародних науково-практичних конференціях студентів, аспірантів та молодих вчених “Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання” (Київ, Україна 2011, 2013).

Публікації. За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 22 наукові праці, у тому числі 9 статей у наукових фахових виданнях, з них 1 стаття у виданні

іноземної держави та 1 стаття у виданні України, що індексується в наукометричних базах даних; 4 патенти України на корисну модель, 9 праць та тез доповідей в збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Дисертаційна робота складається із вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 208 сторінок, у тому числі 8 додатків на 75 сторінках. Обсяг основної частини дисертації становить 111 сторінок, з яких площа 1 сторінки повністю зайнята рисунком. Основна частина містить 71 рисунок і 6 таблиць. Список використаних літературних джерел складається із 120 найменувань на 14 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі висвітлено стан проблеми інтенсифікації сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та проблему зменшення негативного впливу на довкілля, обґрунтовано доцільність і актуальність дослідження, встановлено значне застосування ІЧВ за кордоном для сушіння паперу та актуальність його впровадження в Україні, визначено мету та завдання роботи; сформульовано об'єкт, предмет та методи досліджень; зазначено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; наведено особистий внесок здобувача; подано перелік наукових конференцій, на яких доповідалися та обговорювалися результати роботи.

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз сучасних способів сушіння паперу для гофрування (флютингу), на базі якого визначено доцільність досліджень в цій сфері для створення більш ефективних способів сушіння зі зменшенням енергозатрат, металоємності та зменшення викидів вуглекислого газу в навколишнє середовище. На основі аналізу літературних джерел сформульовано мету та задачі досліджень.

У другому розділі дисертаційної роботи виконано теоретичні дослідження процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

Відповідно до положень сформульованої фізичної моделі, ІЧВ спрямоване на поверхню вологого флютингу. Середовище між інфрачервоним (ІЧ) випромінювачем та флютингом є поглинаючим і випромінюючим та складається з повітря та пари.

Вологий флютинг є сірим тілом, що має відбивну, поглинальну та пропускну здатності. Ці властивості змінюються зі зміною співвідношення маси квадратного метру флютингу та кількості вологи в ньому.

Під час проходження через шар флютингу ІЧВ викликає виділення в ньому теплової енергії, кількість якої зменшується за напрямком теплового потоку. У зв'язку з цим виникає градієнт температури, що спрямований від більш нагрітих поверхневих шарів флютингу до менш нагрітих всередині нього. Через наявність градієнта температури деяка кількість теплоти переноситься теплопровідністю в напрямку проходження ІЧВ. Проте за умов незначного перепаду температур між поверхнями та малої товщини флютингу кількість цієї теплоти незначна.

Теплота з поверхонь флютингу виділяється в навколишнє середовище завдяки конвективній тепловіддачі від поверхонь та видаляється разом з утвореною парою.

Під час нагрівання вологого флютингу починається процес сушіння. Його інтенсивність найбільша в поверхневих шарах, де кількість виділеної теплоти

максимальна, та зменшується вглиб матеріалу. На поверхні флютингу виникає шар насиченої водяної пари, що є найбільшим дифузійним опором для проходження вологи в навколишнє середовище.

Рушійною силою процесу сушіння в першому періоді є різниця між тиском насиченої водяної пари в пограничному шарі на поверхні флютингу та парціальним тиском пари в навколишньому середовищі, а в другому періоді сушіння – різниця між величинами поточного та кінцевого рівноважного вологовмісту.

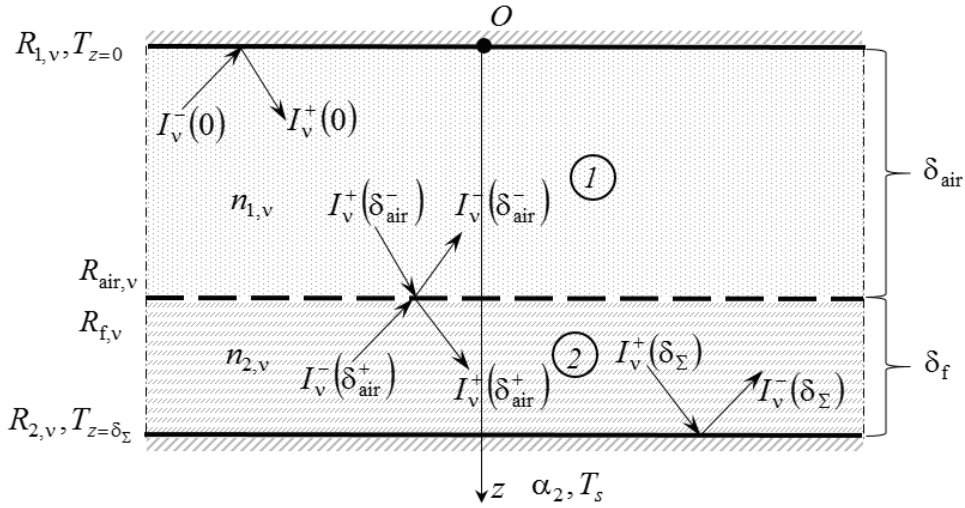
Під час сушіння випаровування вологи може відбуватися не тільки з поверхонь флютингу, а й з більш глибоких шарів.

У флютингу як капілярно-пористому тілі знаходиться вільна волога, волога в мікрокапілярах і волокнах та адсорбційно зв'язана волога. У першому періоді сушіння випаровується вільна волога, а швидкість процесу обмежена інтенсивністю теплового потоку. У другому періоді сушіння швидкість спочатку обмежена дифузією вологи в зону випаровування (видалення вологи в мікрокапілярах), а під кінець сушіння лімітується руйнуванням адсорбційних зв'язків вологи з флютингом та її випаровуванням.

До початку сушіння вологовміст та температура однакові по всій товщині флютингу. Під час сушіння в поверхневих шарах, де найвища кількість поглинутої теплоти від ІЧВ, значення температури найбільше, а вологовміст найменший. Оскільки під час проходження ІЧВ через флютинг кількість виділеної теплоти зменшується, то температура, відповідно, спадає, а вологовміст збільшується. В кінці сушіння вологовміст досягає рівноважного значення та вирівнюється по товщині.

Технологічний режим та обладнання для радіаційного сушіння флютингу дають можливість розглядати цей процес як одновимірний. Тому прийнято такі головні припущення для запису основних співвідношень нестационарного радіаційно-кондуктивного теплообміну в одновимірному випадку:

- поле температур та інші поля, що є похідними від нього, є одновимірними та змінюються тільки в напрямку вісі Oz вглиб флютингу (рис. 1);
- область моделювання складається з двох шарів: верхнього, який є сумішшю повітря з водяною парою (газ), та нижнього – вологого флютингу, що є пористим тілом (далі – система), що піддається процесу радіаційного сушіння (тобто система є двофазною);
- теплофізичні властивості (масова ізобарна теплоємність, густина та коефіцієнт теплопровідності) є ефективними значеннями та залежать від температури;
- шар газу вважається нерухомим, оскільки конвективна складова теплового потоку є набагато меншою за радіаційну;
- система з точки зору радіаційних властивостей є селективною напівпрозорою нерозсіювальною, поглинальною та випромінювальною; верхня границя системи (радіаційний випромінювач) є непрозорою, границя між шарами напівпрозора, а нижня сторона флютингу приймається непрозорою;
- всі границі системи є дифузними, тобто відбивання не залежить від напрямку;
- радіаційні властивості (коефіцієнт поглинання, показник заломлення, ступінь чорноти та коефіцієнти відбивання границь системи) є селективними (залежать від частоти випромінювання або довжини хвилі).



1 – вологе повітря;
2 – флютинг
Рисунок 1 – Схема проходження ІЧВ через флютинг

Якщо скористатися наближенням оптично тонкого шару з поправкою на поглинання та використати модель Бугера для визначення зміни густини радіаційного потоку в шарі вологого флютингу, то математичне формулювання одновимірної задачі радіаційно-кондуктивного процесу сушіння флютингу значно спрощується. Середовище для проходження ІЧВ, що являє собою вологий флютинг, приймається напівпрозорим «сірим» і поглинальним, а границі його шару та поверхня інфрачервоного нагрівника – дифузними. При цьому можна обмежитися розглядом тільки шару флютингу, але з більш складними умовами зовнішнього теплообміну ніж для двофазного селективного середовища. За такого наближення математична постановка задачі сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ включає систему рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{p\,eff}(T)\rho_{eff}(T)\frac{\partial T}{\partial \tau} = \lambda_{eff}(T)\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} - \frac{\partial q_r(z)}{\partial z} - \rho_f(T)r\frac{du}{d\tau}; \\ q_r(z) = nq_r(T_{z=0})e^{-\int_0^z K(T(z))dz}; \\ q_r(T_{z=0}) = \varepsilon_{pr}(K_{a-v})\sigma(T_{IR}^4 - T_{z=0}^4); \\ \frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g}[p_n(T_{z=0}^+) - p_n(T_{z=0}^-)] + k(u - u_p), \end{array} \right.$$

де $c_{p\,eff}(T)$ – температурна залежність масової ізобарної теплоємності вологого флютингу, Дж/(кг·К); $\rho_{eff}(T)$ – температурна залежність ефективної густини вологого флютингу, кг/м³; $\rho_f(T)$ – температурна залежність густини абсолютно сухого флютингу, кг/м³; T – абсолютна температура, К; τ – час, с; $\lambda_{eff}(T)$ – температурна залежність ефективного коефіцієнту теплопровідності вологого флютингу, Вт/(м·К); z – декартова координата, м; $q_r(z)$ – вектор густини радіаційного теплового потоку, Вт/м²; n – вектор нормалі до поверхні флютингу; r – масова теплота випаровування води, Дж/кг; $K(T(z))$ – температурна залежність «сірого» значення ефективного коефіцієнта поглинання вологого флютингу, м⁻¹; $du/d\tau$ – відносна швидкість сушіння, с⁻¹ (кг/(кг·с)); ε_{pr} – приведений ступінь чорноти вологого повітря; $\varepsilon_{z=0}$ – ступінь чорноти поверхні флютингу; F_{IR} , F_f – площа

поверхонь інфрачервоного випромінювача та флютингу, відповідно, м^2 ; K_{a-v} – «сіре» значення коефіцієнта поглинання вологого повітря, м^{-1} ; σ – стала Стефана-Больцмана, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; $T_{IR}, T_{z=0}$ – абсолютна температура поверхонь інфрачервоного випромінювача та флютингу, відповідно, К ; β – коефіцієнт вологообміну, $\text{с}/\text{м}$; k – константа швидкості сушіння в другому періоді, с^{-1} ; g – маса квадратного метру абсолютно сухого флютингу, $\text{кг}/\text{м}^2$; p_n, p_n – тиск насичення пари на поверхні шару флютингу та парціальний тиск водяної пари в прилеглому шарі навколишнього середовища (вологого повітря) відповідно, Па ; u, u_p – середній відносний вологовміст в поточний момент часу і відносний рівноважний у шарі флютингу, відповідно, $\text{кг}/\text{кг}$.

Приведений ступінь чорноти робочої поверхні випромінювача за відомою формулою (Исаченко В. П. Теплопередача: учебн. для вузов / В. П. Исаченко, В. А. Осипова, А. С. Сукомел. — М. : Энергоиздат, 1981. — 416 с.):

$$\varepsilon_{pr}(K_{a-v}) = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_{IR}} + \left(\frac{1}{\varepsilon_{z=0}} - 1 + \frac{3K_{a-v}\delta_{air}}{4} \right) \frac{F_{IR}}{F_f}}.$$

Для отримання дивергенції радіаційного потоку виконано ряд математичних перетворень. А рівняння теплопровідності записано через коефіцієнт ефективної температуропровідності (a_{eff} , $\text{м}^2/\text{с}$). Тоді система рівнянь набуває такого вигляду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial T}{\partial \tau} = a_{eff}(T) \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_r(T_{z=0})}{c_{p,eff}(T) \rho_{eff}(T)} K e^{-Kz} - \frac{\rho_f(T)r}{\rho_{eff}(T) c_{p,eff}(T)} \frac{du}{d\tau}; \\ q_r(T_{z=0}) = \varepsilon_{pr}(K_{a-v}) \sigma (T_{IR}^4 - T_{z=0}^4); \\ \frac{du}{d\tau} = \frac{\beta}{g} \left[p_n(T_{z=0}^+) - p_n(T_{z=0}^-) \right] + k(u - u_p). \end{array} \right.$$

Початкові умови ($\tau = 0$):

$$T = T(z), \quad 0 \leq z \leq \delta_f,$$

де δ_f – товщина флютингу, м .

Граничні умови:

– на непрозорій границі ІЧ-випромінювача задано граничні умови І роду:

$$T_{IR} = T(W),$$

де W – потужність ІЧ випромінювача, Вт .

– на верхній та нижній поверхні флютингу задано граничні умови ІІІ роду:

$$n \cdot \left(-\lambda_{eff}(T) \nabla T \right) \Big|_{z=0} = \alpha_1 \left(T - T_{s1} \right) ; \quad n \cdot \left(-\lambda_{eff}(T) \nabla T \right) \Big|_{z=\delta_f} = \alpha_2 \left(T - T_{s2} \right)$$

де ∇ – оператор Гамільтона; α_1, α_2 – коефіцієнт тепловіддачі від зовнішніх поверхонь флютингу в оточуюче середовище, Вт/(м²·К).

Для числового розв'язання сформульованої задачі використано метод скінченних різниць. За числовою методикою складено алгоритм розрахунку, за яким розроблено спеціалізоване програмне забезпечення мовою програмування Mathcad.

За результатом розрахунку математичної моделі побудовано криві сушіння (рис. 2) флютингу з масами квадратного метру 112, 125, 140 та 200 г/м² та початковим вологовмістом 1,72 кг/кг за густини теплового потоку 35 кВт/м² (середнє значення густини теплового потоку під час сушіння флютингу найпоширенішим способом – на сушильних циліндрах). Визначено, що тривалість сушіння флютингу з масами квадратного метру 112, 125, 140 та 200 г/м² до вологовмісту 0,075 кг/кг становить 19, 22, 25 та 36 с, а до кінця першого періоду – 12,4, 13,9, 15,7 та 21,3 с відповідно.

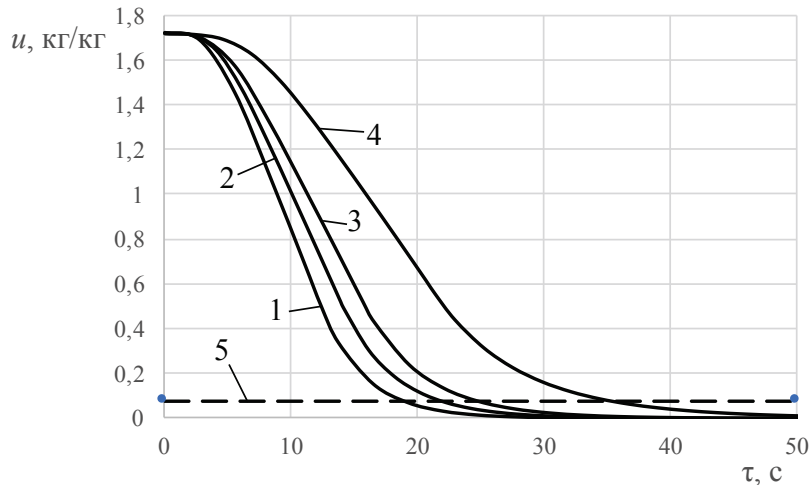


Рисунок 2 – Залежність вологовмісту від часу сушіння флютингу

Кінцевий вологовміст флютингу 0,075 кг/кг регламентується ДСТУ 7377-85 (кінцева вологість становить $w = 7_{-1}^{+2} \%$).

Встановлено, що зі збільшенням маси квадратного метру флютингу час сушіння до кінцевого вологовмісту 0,075 кг/кг зростає більш інтенсивно, ніж зростання тривалості першого періоду сушіння (рис. 3).

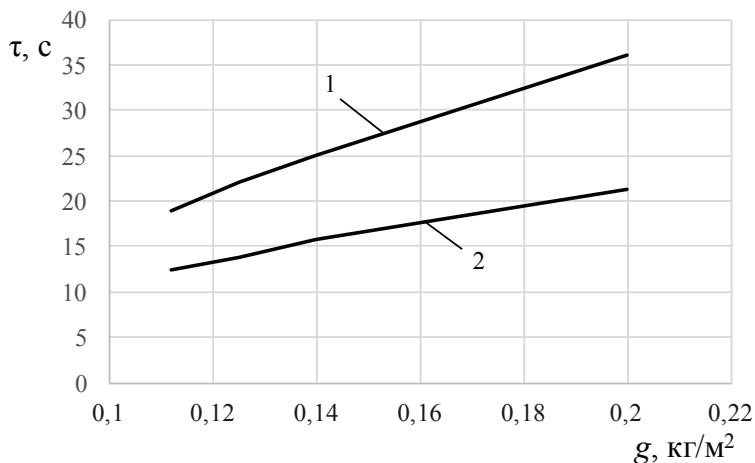
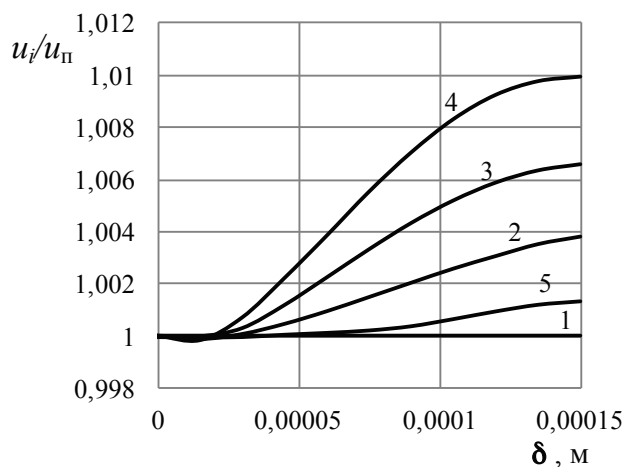


Рисунок 3 – Залежність часу сушіння від маси квадратного метру флютингу

Оскільки підвищення швидкості сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ в другому періоді менш інтенсивне, використання ІЧВ найбільш доцільне для періоду нагрівання та першого періоду сушіння.

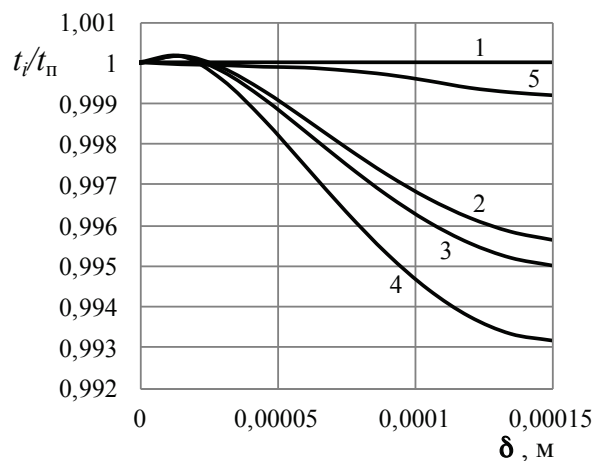
За результатами розрахунку математичної моделі встановлено як змінюється вологовміст та температура по товщині флютингу під час сушіння за густини теплового потоку 35 кВт/м^2 .

Залежності відносного вологовмісту u_i/u_n від товщини (рис. 4) вказують на наявність градієнта вологовмісту по товщині флютингу (де u_i – значення вологовмісту по товщині, u_n – значення вологовмісту на ближній до ІЧ випромінювача поверхні). За даними числового аналізу графічних залежностей перепад вологовмісту на обох поверхнях флютингу становить до $0,0015 \text{ кг/кг}$, зростаючи під час сушіння та при збільшенні густини теплового потоку. За маси квадратного метру флютингу 200 г/м^2 та 112 г/м^2 градієнт за вологовмістом становить $5,2 \text{ кг/(кг}\cdot\text{м)}$ та $11 \text{ кг/(кг}\cdot\text{м)}$ відповідно. Незначний перепад за вологовмістом пояснюється випаровуванням вологи по всій товщині паперу за температури більше 100°C та низьким опором перенесенню вологи та пари всередині флютингу. Вологовміст в поверхневому шарі дещо менший за вологовміст на поверхні через наявність теплових втрат з поверхні тепловіддачею.



1 – 0 с; 2 – 3 с; 3 – 6 с; 4 – 12 с; 5 – 20 с

Рисунок 4 – Зміна відносного вологовмісту по товщині флютингу під час сушіння



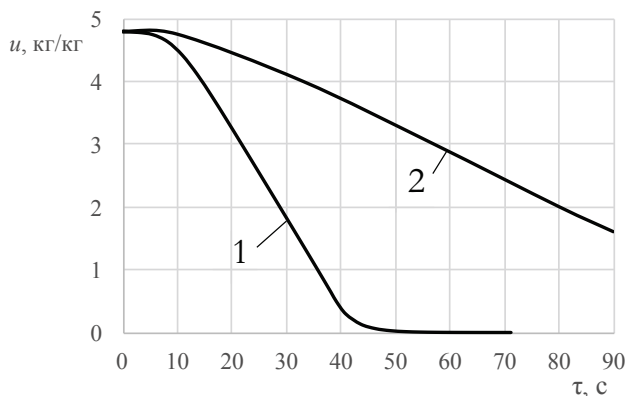
1 – 0 с; 2 – 3 с; 3 – 6 с; 4 – 12 с; 5 – 20 с

Рисунок 5 – Зміна відносної температури по товщині флютингу під час сушіння

Залежності відносної температури t_i/t_n від товщини (рис. 5) вказують на наявність градієнта температури по товщині флютингу (де t_i – значення температури по товщині, t_n – значення температури на ближній до ІЧ випромінювача поверхні). За існуючого перепаду температур на поверхнях флютингу в 2°C градієнт температури по товщині становить від 6935 К/м до 14641 К/м за маси квадратного метру 200 г/м^2 та 112 г/м^2 відповідно. Незначний перепад температури пояснюється малою товщиною паперу та достатньо високим ступенем поглинання ІЧВ по товщині флютингу. Температура в поверхневому шарі дещо вища температури на поверхні через наявність теплових втрат з поверхні завдяки тепловіддачі.

Наприкінці процесу сушіння градієнт за вологовмістом по товщині флютингу прямує до нуля. Градієнт температури зменшується, досягаючи постійного значення.

Результати числового моделювання процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ порівняно з даними контактного способу на сушильних циліндрах (рис. 6). Так, за однакових густин теплових потоків (близько 35 кВт/м^2) час сушіння паперу масою 112 г/м^2 зменшився: а) час періоду нагрівання скоротився в 2,1 раз; б) час сушіння до 50 % від початкового вологовмісту зменшився в 2,7 рази; в) час сушіння до 33% від початкового вологовмісту зменшився втричі. За вказаних умов за контактного способу сушіння швидкість процесу в першому періоді становить $0,043 \text{ кг/кг}\cdot\text{с}$, а за радіаційного – $0,144 \text{ кг/кг}\cdot\text{с}$, що більше в 3,3 раз. Температура флютингу за радіаційного способу в першому періоді сушіння не перевищувала 150°C , а за контактного способу складала близько 95°C .

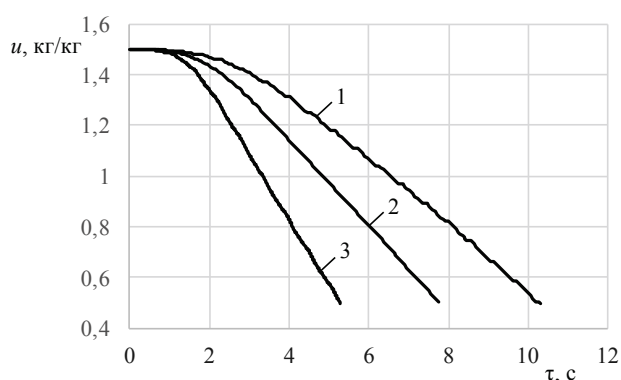


1 – радіаційний спосіб сушіння;

2 – контактний спосіб сушіння

Рисунок 6 – Порівняння кривих сушіння за радіаційним та контактним способами сушіння

Встановлено, що за комбінованого способу сушіння (наприклад, під час монтажу інфрачервоних випромінювачів на вільному пробігу полотна флютингу між сушильними циліндрами) тривалість процесу в порівнянні з контактним способом зменшується завдяки додатковому джерелу теплоти (ІЧВ): за густини теплового потоку 35 кВт/м^2 (як і від сушильних циліндрів) – на 24% (з 10,3 с до 7,8 с), за густини теплового потоку 100 кВт/м^2 – на 49 % (з 10,3 с до 5,3 с) (рис. 7).

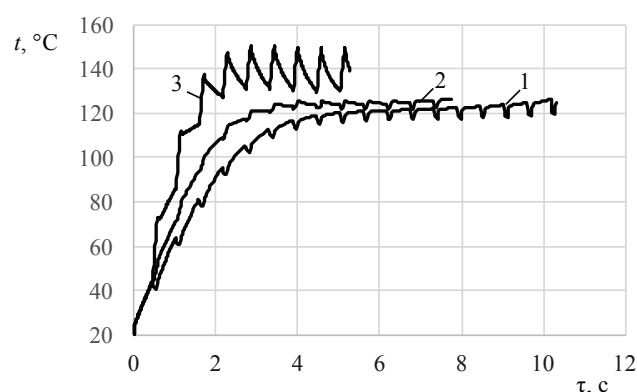


1 – без ІЧ випромінювачів;

2 – з ІЧ випромінювачами (35 кВт/м^2);

3 – з ІЧ випромінювачами (100 кВт/м^2)

Рисунок 7 – Залежність вологовмісту від часу сушіння (криві сушіння)



1 – без ІЧ випромінювачів;

2 – з ІЧ випромінювачами (35 кВт/м^2);

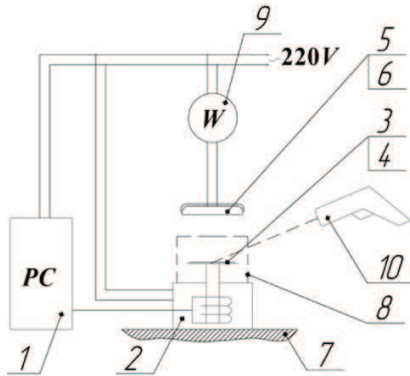
3 – з ІЧ випромінювачами (100 кВт/м^2)

Рисунок 8 – Залежність температури від часу сушіння

Температура поверхні флютингу (рис. 8) під час сушіння на сушильних циліндрах у кінці першого періоду становить 125°C , при встановленні ІЧ випромінювачів за густини теплового потоку 35 кВт/м^2 – 126°C , а за густини теплового потоку 100 кВт/м^2 – 139°C з піковим значенням близько 150°C .

Таким чином, під час комбінованого сушіння флютингу з періодичним впливом ІЧВ збільшення потужності випромінювачів зменшує часу сушіння. Проте потужність випромінювачів обмежена критичним значенням температури флютингу.

У третьому розділі дисертаційної роботи наведено опис експериментальної установки (рис. 9), методики проведення досліджень та обробки отриманих дослідних даних.



1 – персональний комп'ютер; 2 – електронні ваги; 3 – зразок флютингу; 4 – платформа вагів; 5 – ІЧ випромінювач; 6 – рефлектор; 7 – вібростійка поверхня; 8 – вітрозахисний кожух; 9 – ватметр; 10 – пірометр

Рисунок 9 – Експериментальна установка для визначення кінетики сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ

Параметри лабораторної установки. Метод сушіння флютингу – радіаційний (із застосуванням енергії ІЧВ). За джерело випромінювання використано керамічний електричний ІЧ випромінювач марки ЕСН4 номінальною потужністю 1 кВт. Робоча поверхня ІЧ випромінювача розміром $0,122 \times 0,122$ м має температуру робочої поверхні 560°C . Довжина хвиль, що генеруються робочою поверхнею інфрачервоного випромінювача, — $3,3 \dots 3,7$ мкм. Для вимірювання потужності випромінювача використано ватметр.

Величина густини променевого теплового потоку від робочої поверхні випромінювача до поверхні флютингу регулюється зміною відстані між ними.

Зразок флютингу під час досліду розміщується на платформі із сітчастою поверхнею. Платформа встановлена на електронних вагах. Для зменшення похибок вимірювання ваги розміщено на вібростійкій поверхні, а навколо платформи встановлений вітрозахисний кожух. Максимальна похибка вимірювання маси становить 3 мг. Ваги з частотою 3 Гц вимірюють поточне значення маси вологого флютингу. Значення маси фіксуються на персональному комп'ютері.

Температура поверхні флютингу вимірюється пірометром з точністю 1°C .

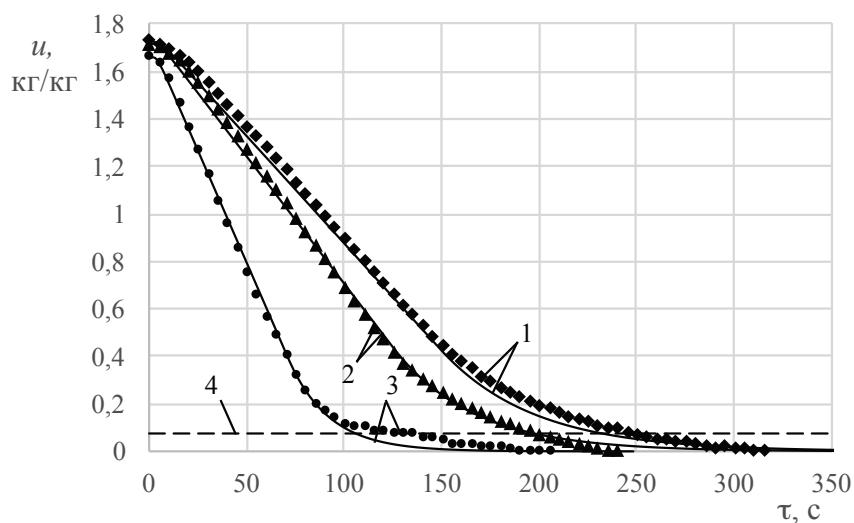
Для експериментальної перевірки густини теплового потоку від інфрачервоного випромінювача використано калібрований датчик теплового потоку ПТП-04т з допустимою похибкою 10 Вт/м^2 .

У дослідженнях використано зразки флютингу марки Б-1 за ДСТУ 7377-85 з густиною квадратного метру 112, 125 та 140 г/м^2 , а також зразки з нестандартного флютингу зі збільшеною питомою масою 200 г/м^2 .

Узагальнені результати експериментальних досліджень представлені у вигляді графічних залежностей вологовмісту флютингу від часу сушіння $u=f(\tau)$ (криві сушіння), температури поверхні флютингу від часу сушіння $t=f(\tau)$ та швидкості сушіння від вологовмісту $du/d\tau=f(u)$.

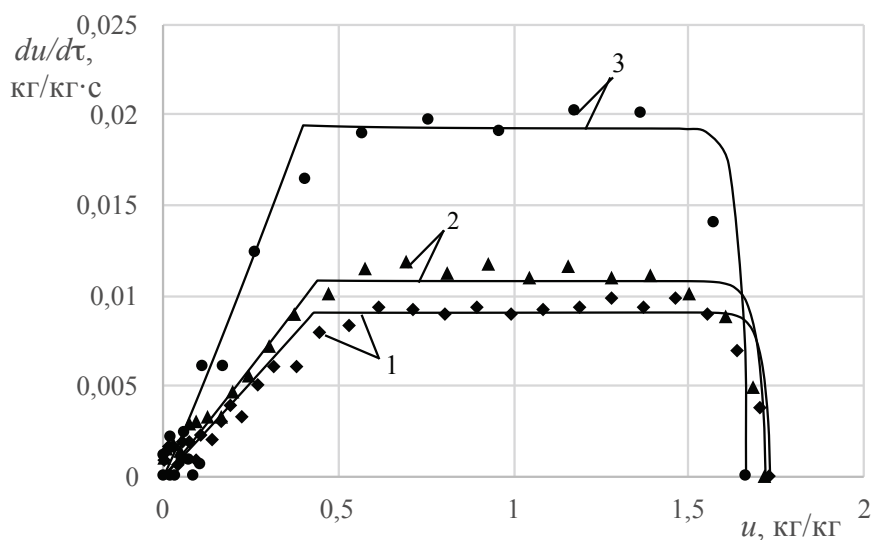
Отримано кінетичні закономірності процесу сушіння флютингу з масою квадратного метру 125 г/м^2 із застосуванням енергії ІЧВ за різної густини теплового потоку.

Встановлено, що інтенсивність сушіння в першому періоді збільшується зі збільшенням густини променевого теплового потоку (рис. 10, 11). Це можна пояснити тим, що ІЧВ спричиняє виділення теплоти в об'ємі флютингу. При цьому критичний вологовміст становить $u_{1к}=0,4$ кг/кг.



- 1 – $q=3665$ Вт/м²;
 2 – $q=4300$ Вт/м²;
 3 – $q=6835$ Вт/м²;
 4 – $u=0,075$ кг/кг ($w=7\%$);
 ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

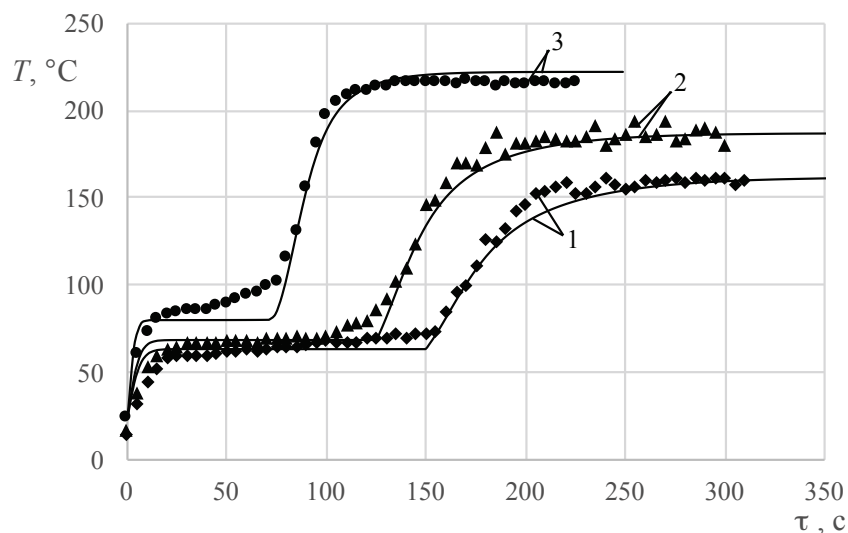
Рисунок 10 – Криві сушіння флютингу за різної густини теплових потоків



- 1 – $q=3665$ Вт/м²;
 2 – $q=4300$ Вт/м²;
 3 – $q=6835$ Вт/м²;
 ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

Рисунок 11 – Залежність швидкості сушіння флютингу від вологовмісту за різної густини теплових потоків

Тривалість нагрівання флютингу за цих умов сушіння становить лише 4...5 % від загального часу сушіння (рис. 12).



- 1 – $q=3665$ Вт/м²;
 2 – $q=4300$ Вт/м²;
 3 – $q=6835$ Вт/м²;
 ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

Рисунок 12 – Залежність швидкості сушіння флютингу від вологовмісту за різної густини теплових потоків

Температура вологої поверхні флютингу в першому періоді сушіння за густини променевого теплового потоку 3685 Вт/м^2 тримається майже сталою і є близькою до температури мокрого термометра (крива 1). Сталість температури в першому періоді сушіння підтримується постійною густиною променевого теплового потоку, що витрачається на випаровування поверхневої вологи та обмежує швидкість підведення теплоти.

Зі збільшенням густини променевого теплового потоку (крива 2) температура поверхні флютингу в першому періоді сушіння поступово зростає. Це обумовлено збільшенням виділення кількості теплової енергії від проходження ІЧВ у внутрішніх шарах флютингу.

За суттєвого збільшення значення густини променевого теплового потоку (крива 3) температура флютингу різко збільшується. Її величина поступово зростає протягом всього першого періоду сушіння та залежить від тиску насичення, не дорівнюючи температурі мокрого термометра.

На початку другого періоду сушіння спостерігаються прямолінійні ділянки температурних кривих (рис. 12). Таке положення кривих вказує на постійну швидкість зростання температури. Це можна пояснити постійною швидкістю випаровування вологи з мікрокапілярів флютингу.

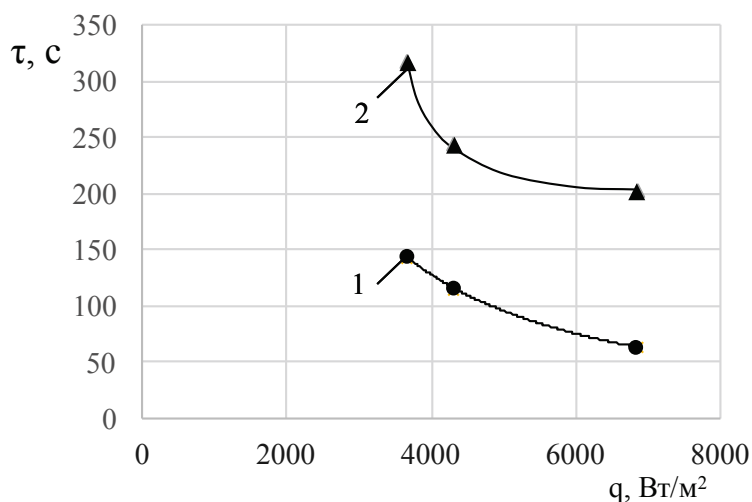
Перехід прямолінійних ділянок температурних кривих у криволінійні обумовлений випаровуванням адсорбційної вологи. Швидкість зростання температури прямує до нуля за досягнення рівноважної температури. Якщо температура поверхні флютингу наприкінці сушіння досягне температури окиснення, то швидкість збільшення температури зростає, а процес закінчиться спалахом.

Згідно результатам дослідження (табл. 1) сушіння флютингу до вологовмісту, меншого за $0,075 \text{ кг/кг}$ є недоцільним через суттєве збільшення тривалості сушіння та значного підвищення температури флютингу.

Таблиця 1 – Основні результати експерименту

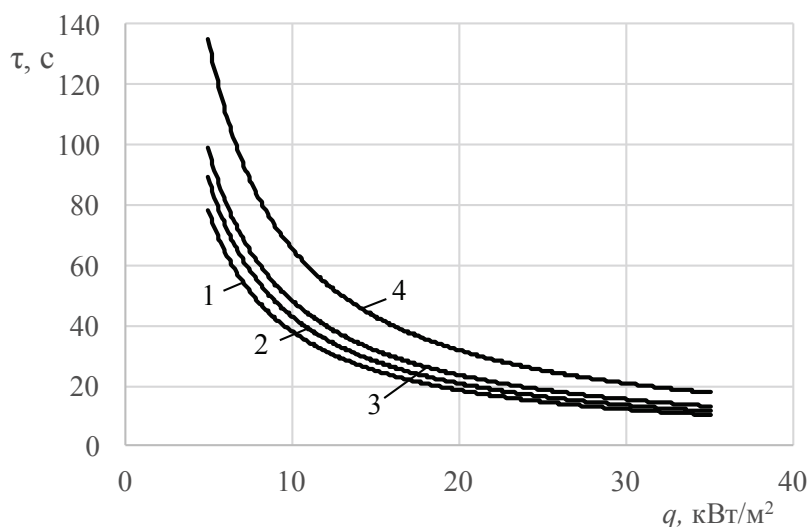
Густина теплового потоку, Вт/м^2	Швидкість сушіння в першому періоді, $\text{кг/кг}\cdot\text{с}$	Тривалість першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, $^{\circ}\text{C}$	Температура поверхні флютингу, $^{\circ}\text{C}$		Загальний час сушіння (до $u=0\text{кг/кг}$), с	
				$u=0,075 \text{ кг/кг}$	$u=0 \text{ кг/кг}$	до $u=0,075 \text{ кг/кг}$	до $u=0 \text{ кг/кг}$
3665	0,009	144	66	155	161	250	318
4300	0,012	116	69	182	187	200	244
6835	0,018	64	87	210	217	130	203

Встановлено, що за невеликих густин променивих теплових потоків до 7 кВт/м^2 і постійній відносній вологості повітря інтенсивність сушіння флютингу в першому періоді пропорційна густині теплового потоку і лімітується швидкістю підведенням теплоти. Проте збільшення густини теплового потоку непропорційне зменшенню часу сушіння флютингу. Це підтверджується результатами експериментів (рис. 13) та розрахунку згідно математичної моделі (рис. 14).



1 – тривалість сушіння флютингу до закінчення першого періоду сушіння;
2 – загальний час сушіння (до $u = 0$ кг/кг)

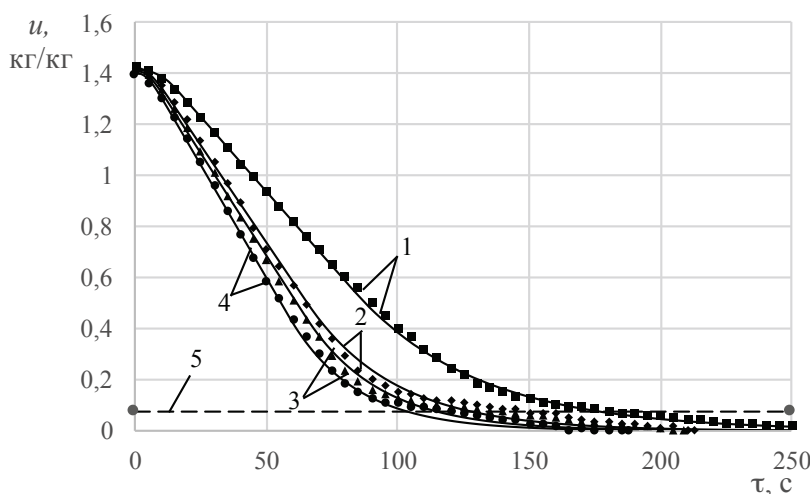
Рисунок 13 – Залежність часу сушіння флютингу від густини теплового потоку



1 – $g=112$ г/м²;
2 – $g=125$ г/м²;
3 – $g=140$ г/м²;
4 – $g=200$ г/м²

Рисунок 14 – Залежність часу сушіння флютингу від густини теплового потоку

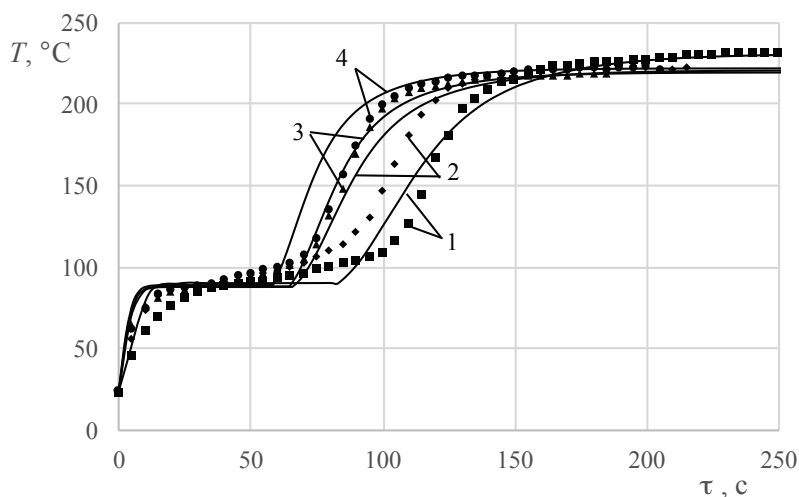
Досліджено вплив маси квадратного метру флютингу на кінетику процесу сушіння за величини густини теплового потоку 6835 Вт/м². Визначено, що зі збільшенням маси квадратного метру швидкість сушіння зменшується, а час сушіння зростає (рис. 15).



1 – $g=200$ г/м²; 2 – $g=140$ г/м²;
3 – $g=125$ г/м²; 4 – $g=112$ г/м²;
5 – $u=0,075$ кг/кг ($w=7\%$);
■, ◆, ▲, ● – дослідні дані;
— – теоретичні дані

Рисунок 15 – Криві сушіння флютингу за різної маси квадратного метру та сталому значенні густини теплового потоку

В першому періоді сушіння флютингу температура поверхні наближається до температури кипіння за атмосферного тиску (рис. 16). Більш висока температура поверхні зразків з більшою товщиною (табл. 2) обумовлена зростанням виділення теплової енергії в їх об'ємі і більшим термічним та дифузійним опором.



1 – $g=200 \text{ г/м}^2$; 2 – $g=140 \text{ г/м}^2$;
 3 – $g=125 \text{ г/м}^2$; 4 – $g=112 \text{ г/м}^2$;
 ■, ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

Рисунок 16 – Зміна температури поверхні флютингу за різної поверхневої маси та сталому значенні густини теплового потоку

Таблиця 2 – Основні результати експерименту

Маса квадратного метра, г/м^2	Швидкість сушіння в першому періоді, $\text{кг/кг} \cdot \text{с}$	Тривалість першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, $^{\circ}\text{C}$	Температура поверхні флютингу, $^{\circ}\text{C}$		Загальний час сушіння, с	
				$u=0,075 \text{ кг/кг}$	$u=0 \text{ кг/кг}$	$u=0,075 \text{ кг/кг}$	$u=0 \text{ кг/кг}$
112	0,0192	56	90	218	223	120	189
125	0,0178	61	92	218	223,5	137	203
140	0,0166	65	94	219	224	148	212
200	0,0112	90	98	225	231	180	252

Після першого критичного вологовмісту (рис. 16) температура поверхні зразків зростає в перехідному періоді за степеневим законом, після чого починається швидкий ріст температури за лінійним законом, що обумовлено випаровуванням вологи з мікрокапілярів. Із закінченням лінійного зростання температури починається її збільшення за степеневим законом від другої критичної до рівноважної кінцевої, що обумовлено випаровуванням адсорбційної вологи до рівноважного стану.

Досліджено вплив початкового вологовмісту на процес сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

Встановлено, що початковий вологовміст не впливає на швидкість сушіння флютингу (табл. 3). Проте зі збільшенням початкового вологовмісту час сушіння зростає в результаті більшої кількості вологи всередині матеріалу (рис. 17). Ця тенденція зберігається у разі зміни густини теплового потоку.

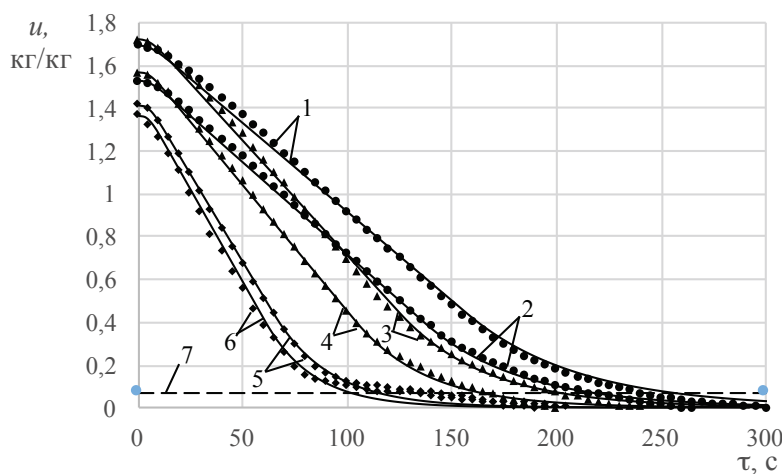
Для перевірки адекватності математичної моделі визначено середньоквадратичні відхилення за вологовмістом. Максимальне значення середньоквадратичного відхилення вологовмісту не перевищувало $0,04 \text{ кг/кг}$.

Співставлення теоретичних і експериментальних результатів підтверджує адекватність отриманих кінетичних закономірностей (ймовірність збігу теоретичних та експериментальних даних за Фішером становить не менше 95%). Це дає змогу виконувати інженерні розрахунки з достатньою точністю.

Суттєвого впливу початкового вологовмісту на температуру флютингу під час сушіння не виявлено (рис. 18).

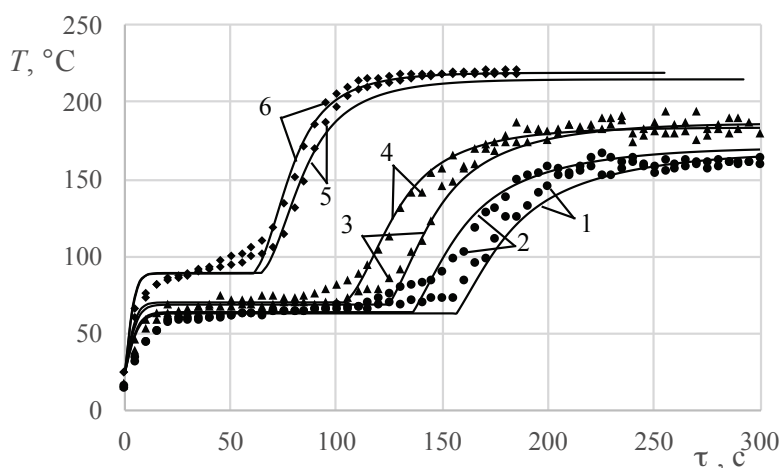
Таблиця 3 – Основні результати експерименту

Густина теплового потоку, Вт/м ²	Початковий вологовміст, кг/кг	Швидкість сушіння в першому періоді, кг/кг·с	Час завершення першого періоду сушіння, с	Середня температура поверхні флютингу в першому періоді, °С	Температура поверхні флютингу (рівноважна), °С		Загальний час сушіння, с	
					до $u=0,075$ кг/кг	до $u=0$ кг/кг	до $u=0,075$ кг/кг	до $u=0$ кг/кг
3665	1,71	0,0091	148	64	156	162	237	302
	1,53	0,0091	127	64	158	162	212	264
4300	1,72	0,0122	115	70	178	186	197	238
	1,57	0,0123	95	71	176	186	165	200
6865	1,41	0,0174	61	90	209	216	138	218
	1,36	0,0174	53	91	208	214	120	206



1 – $q=3665$ Вт/м², $u_0=1,71$ кг/кг;
 2 – $q=3665$ Вт/м², $u_0=1,53$ кг/кг;
 3 – $q=4300$ Вт/м², $u_0=1,72$ кг/кг;
 4 – $q=4300$ Вт/м², $u_0=1,57$ кг/кг;
 5 – $q=6835$ Вт/м², $u_0=1,41$ кг/кг;
 6 – $q=6835$ Вт/м², $u_0=1,36$ кг/кг;
 7 – $u=0,075$ кг/кг ($w=7\%$);
 ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

Рисунок 17 – Залежність вологовмісту від часу сушіння



1 – $q=3665$ Вт/м², $u_0=1,71$ кг/кг;
 2 – $q=3665$ Вт/м², $u_0=1,53$ кг/кг;
 3 – $q=4300$ Вт/м², $u_0=1,72$ кг/кг;
 4 – $q=4300$ Вт/м², $u_0=1,57$ кг/кг;
 5 – $q=6835$ Вт/м², $u_0=1,41$ кг/кг;
 6 – $q=6835$ Вт/м², $u_0=1,36$ кг/кг;
 ◆, ▲, ● – дослідні дані;
 — – теоретичні дані

Рисунок 18 – Залежність температури поверхні флютингу від часу сушіння

У четвертому розділі дисертаційної роботи наведено рекомендації щодо використання розроблених пристроїв для сушіння флютингу.

Рекомендації до застосування ІЧВ для сушіння флютингу:

- 1) в періодах нагрівання та постійної швидкості сушіння в зв'язку з тим, що швидкість у цих періодах лімітується швидкістю підведення теплоти до флютингу;
- 2) для швидкого сушіння поверхні флютингу після проклеювання;

3) для вирівнювання вологості флютингу по його ширині.

На основі розробленої математичної моделі складено алгоритм розрахунку промислової установки сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та відповідне програмне забезпечення.

За цим алгоритмом для конкретних вихідних даних можна визначити довжину та площу промислової установки сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та загальну кількість випромінювачів заданої потужності.

Поточне значення вологовмісту та температури поверхні флютингу визначаються за розробленою математичною моделлю процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

Розрахунок поточних вологовмісту та температури поверхні флютингу в залежності від заданих вихідних даних ведеться до тих пір, поки вологовміст не досягне заданого значення.

Розроблені пристрої. З метою швидкого нагрівання флютингу на початку сушіння розроблено пристрій сушильної секції папероробної машини (ПРМ) (патент України №35068).

Згідно патенту, полотно флютингу проходить під інфрачервоними випромінювачами, спрямованими до нього. Для зменшення теплових втрат інфрачервона панель накрита зверху та з боків кожухом з матеріалу, що має високу ступінь відбиття ІЧВ. Полотно флютингу, інфрачервона панель та бокові кришки утворюють канал для повітря. Кут між полотном та інфрачервоною панеллю зменшується по ходу полотна. Це створює рух повітря в напрямку, протилежному до руху паперового полотна. Це покращує відведення парів води, інтенсифікуючи процес сушіння.

Для модернізації ПРМ розроблено пристрій для нагрівання флютингу інфрачервоним випромінюванням (патент України №58917).

Згідно патенту, встановлення інфрачервоних випромінювачів на початку сушильної частини ПРМ дає змогу швидко нагрівати полотно флютингу. А особливість конструкції збільшує інтенсивність нагрівання в зв'язку з тим, що процес відбувається за 100 % відносною вологістю. Це зменшує інтенсивність випаровування в періоді нагрівання і вся теплота від ІЧВ витрачається на підвищення температури.

Для інтенсифікації сушіння полотна флютингу завдяки застосування ІЧВ, швидкого та зручного відведення, в разі необхідності, гарячої поверхні випромінювачів розроблена конструкція (патент України №100580). Теплота від проходження ІЧВ поглинається флютингом, інтенсифікуючи процес сушіння. А циркуляційні отвори зменшують вологість парогазової суміші біля поверхні флютингу.

Для інтенсифікації сушіння флютингу розроблено конструкцію сушильної групи ПРМ (патент України №105956), де установки інфрачервоних випромінювачів монтуються на вільному пробігу полотна флютингу. Додаткове підведення теплоти завдяки встановленню інфрачервоних випромінювачів зменшує час сушіння флютингу і, відповідно, кількість сушильних циліндрів.

За такою схемою можливо встановлювати пристрої з інфрачервоними випромінювачами на вже існуючі сушильні групи ПРМ, цим їх модернізуючи.

Питомі затрати. Визначено питомі затрати на споживання електроенергії для сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та затрати на природний газ для виробництва пари під час сушіння флютингу на сушильних циліндрах.

Встановлено, що питомі затрати під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за багатозонної тарифікації електроенергії в нічний період менші, ніж під час контактного способу сушіння: 0,141 грн/МДж проти 0,325 грн/МДж (за тризонної тарифікації електроенергії) та 0,197 грн/МДж проти 0,325 грн/МДж (за двозонної тарифікації електроенергії).

Встановлено економію в гривнях на тонну флютингу під час його сушіння в періоді нагріву на ПРМ зі швидкістю 400 м/хв та шириною полотна флютингу 4,25 м за різної тарифікації електроенергії (рис. 19).

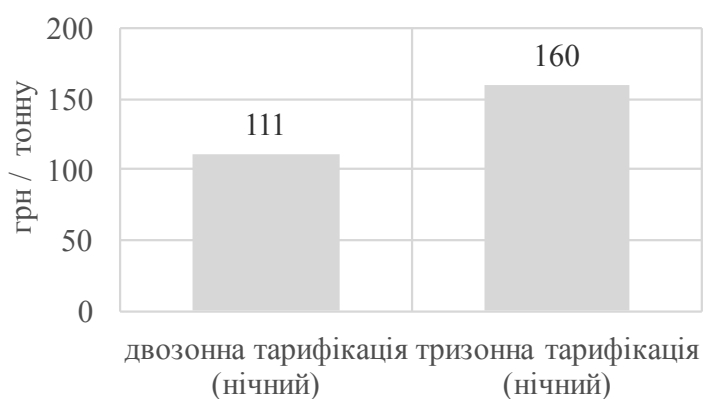
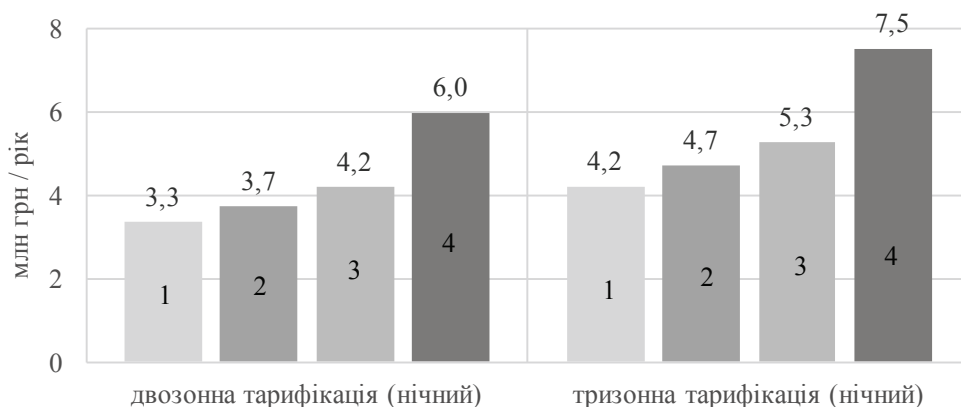


Рисунок 19 – Зменшення затрат на тонні виготовленого флютингу

Визначено, що зі збільшенням маси квадратного метру флютингу річний економічний ефект від застосування енергії ІЧВ під час сушіння флютингу зростає (рис. 20). Це пов'язано зі збільшенням кількості поглинутої теплоти. Найбільший економічний ефект спостерігається за тризонної тарифікації електроенергії в нічний період.

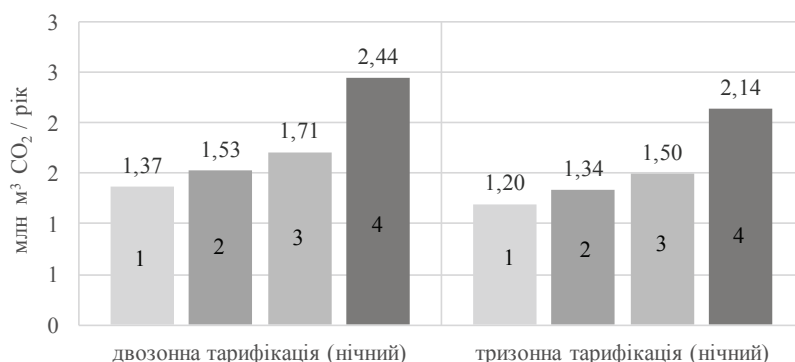


1 – $g=112 \text{ г/м}^2$;
 2 – $g=125 \text{ г/м}^2$;
 3 – $g=140 \text{ г/м}^2$;
 4 – $g=200 \text{ г/м}^2$

Рисунок 20 – Річний рівень зменшення затрат під час сушіння флютингу різної маси квадратного метру

Крім питомих затрат, встановлення інфрачервоних випромінювачів зменшить кількість сушильних циліндрів, вартість яких значно вища за сушильну установку з інфрачервоними випромінювачами.

За цих параметрів ПРМ розраховано річне зменшення кількості викидів CO_2 , що утворюються під час спалювання природного газу для виробництва пари (рис. 21).



1 – $g=112$ г/м²;
 2 – $g=125$ г/м²;
 3 – $g=140$ г/м²;
 4 – $g=200$ г/м²

Рисунок 21 – Річний рівень зменшення викидів CO₂

ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішено важливу науково-технічну задачу створення ефективного та екологічного способу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання та розробку відповідного обладнання.

За результатами проведених досліджень зроблено наступні висновки:

1. Науково обґрунтовано доцільність використання енергії інфрачервоного випромінювання для сушіння флютингу.

2. Науково обґрунтовано фізичну та математичну моделі процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

3. Отримано нові кінетичні залежності процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за різних технологічних параметрів процесу.

4. Встановлено вплив технологічних параметрів на інтенсивність процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ та надано рекомендації щодо вибору цих параметрів.

5. Експериментально визначено, що застосування ІЧВ сприяє інтенсифікації сушіння флютингу в періоді нагрівання та першому періоді сушіння.

6. На основі отриманих експериментальних результатів підтверджено адекватність математичної моделі сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ.

7. На основі встановлених кінетичних закономірностей та основних параметрів процесу сушіння флютингу розроблено алгоритм розрахунку сушильної установки з інфрачервоними випромінювачами.

8. Отримані кінетичні закономірності і основні параметри процесу сушіння флютингу із застосуванням ІЧВ дозволяють здійснювати проектування промислових процесів сушіння флютингу та ефективного обладнання для сушіння.

9. Встановлено питомі затрати на енергоресурс під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за різної тарифікації електроенергії та порівняно з затратами на використання водяної пари в сушильних циліндрах.

10. Показано, що застосування ІЧВ для сушіння флютингу зменшить витрати природного газу на виробництво водяної пари та дозволить зменшити викиди в атмосферу вуглекислого газу, що утворюються під час спалювання природного газу.

11. Результати дисертаційної роботи впроваджено у папероробному обладнанні, що виготовляє ТОВ ПТК "Вуглепром", м. Дніпро.

12. Результати дисертаційної роботи впроваджено в навчальний процес кафедри машин та апаратів хімічних і нафтопереробних виробництв інженерно-хімічного факультету НТУУ "КПІ".

ПЕРЕЛІК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Marchevsky V. Kinetics of corrugated board flute drying with the use of infrared radiation / V. Marchevsky, **O. Novokhat** // The Advanced Science Journal. – 2015. — №6. — P. 69-72. (Входить до наукометричних баз CrossRef, CNKI Scholar, Index Copernicus International, WorldCat OCLC, EBSCO, Mendeley, Google Scholar, BASE, CiteSeerX, PTFS Europe, Japan Link Center). *(Особистий внесок здобувача: вдосконалення математичної моделі сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, отримання теоретичних графічних залежностей розподілу температури та вологовмісту по товщині флютингу).*
2. Marchevsky V. Paper drying process for corrugation (fluting) using radiant energy / V. Marchevsky, **O. Novokhat**, O. Tsepka // Ukrainian Journal of Food Science. – 2015. — №2. — P. 310-321. (Входить до наукометричних баз EBSCO, Google Scholar, Index Copernicus, Universal Impact Factor, Directory of Open Access scholarly Resources (ROAD)). *(Особистий внесок здобувача: отримання кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання).*
3. Марчевський В.М. Інфрачервоне випромінювання в процесі сушіння паперу / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Наукові праці ОНАХТ. – 2008. – №32. – Т2. – С. 42-44. *(Особистий внесок здобувача: розробка лабораторної установки та її опис, визначення переваг інфрачервоного випромінювання для сушіння паперу).*
4. Марчевський В.М. Кінетичні закономірності нагріву та сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Наукові праці ОНАХТ. – 2009. – №35. – Т2. – С. 79-81. *(Особистий внесок здобувача: визначення методики отримання регресійних рівнянь, що описують процес сушіння паперу).*
5. Новохат О.А. Застосування інфрачервоного випромінювання в процесі сушіння паперу / О.А. Новохат // Наукові праці ОНАХТ. – 2011. – №39. – Т2. – С. 249-251.
6. Марчевський В.М. Інфрачервоне нагрівання і сушіння паперу й картону / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2011. – № 2(8). – С. 42-44. *(Особистий внесок здобувача: розроблення фізичної моделі процесу сушіння паперу).*
7. Марчевський В.М. Кінетика інфрачервоного нагрівання й сушіння паперу / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2012. – № 1(9). – С. 44-46. *(Особистий внесок здобувача: побудова та аналіз кінетичних закономірностей процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання).*
8. Новохат О.А. Дослідження роботи електричного інфрачервоного випромінювача для сушіння санітарно-гігієнічного паперу / О.А. Новохат, О.О. Татарчук // Наукові праці ОНАХТ. – 2014. – 45(2). – С. 90-93. *(Особистий внесок здобувача: визначення методики визначення густини теплового потоку від інфрачервоного випромінювача та встановлення його теплових інерційних властивостей).*
9. Марчевський В.М. Сушіння санітарно-гігієнічного паперу з

використанням інфрачервоного випромінювання/ В.М. Марчевський, **О.А. Новохат**, Л.Г. Воронін, О.О. Татарчук // Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. – 2015. – № 1(14). – С. 29-31. *(Особистий внесок здобувача: проведення експериментальних досліджень сушіння інших типів паперу інфрачервоним випромінюванням та визначення можливості застосування математичної моделі сушіння флютингу для інших типів паперу).*

10. Патент №35068 Україна, МПК (2008) D21F 5/04. Сушильна секція / Марчевський В.М., **Новохат О.А.** – опубл. 26.08.2008, Бюл. № 16. *(Особистий внесок здобувача: приймав участь в розробці конструкції, зробив її опис).*

11. Патент №58917 Україна, МПК (2011) D21F 5/00. Пристрій для нагрівання паперу інфрачервоним випромінюванням / Марчевський В.М., Загребельна Ю.І., **Новохат О.А.** – опубл. 26.04.2011, Бюл. № 8. *(Особистий внесок здобувача: виконав аналіз впливу пари на швидкість нагріву, описав конструкції).*

12. Патент №100580 Україна, МПК (2015.01) D21F 5/00. Пристрій для сушіння паперового чи іншого волокнистого полотна / **Новохат О.А.**, Татарчук О.О. – опубл. 27.27.2015, Бюл. № 14. *(Особистий внесок здобувача: розробив конструкцію пристрою).*

13. Патент №105956 Україна, МПК (2016.01) D21F 5/00. Сушильна частина папероробної машини / Карпенко К.О., **Новохат О.А.** – опубл. 11.04.2016, Бюл. № 7. *(Особистий внесок здобувача: розробив конструкцію пристрою).*

14. Марчевський В.М. Інфрачервоне випромінювання в процесі сушіння паперу та зменшення викидів в атмосферу / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Екологія. Людина. Суспільство: XI міжн. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 13-18 травня, 2008): збірник тез доповідей — К. : НТУУ «КПІ», 2008. – С. 188-189.

15. Марчевський В.М. Процес сушіння паперу з розробкою відповідного обладнання // В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Проблеми пакувальної індустрії: IX міжн. наук.-практ. конф. (Київ, 4 листопада 2008): зб. тез доп. – К.: НУХТ, 2008. – С. 8-10

16. Марчевський В.М. Інтенсифікація процесу сушіння паперу / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: V всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 5 листопада 2009): зб. тез доп. — К. : НТУУ «КПІ», 2009. – С. 16-17.

17. Марчевський В.М. Процес сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання / В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: VI всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 15-16 квітня 2010): зб. тез доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2010. – С. 10-11.

18. Новохат О.А. Модернізація сушильної частини картоноробної машини / О.А. Новохат, А.С. Галстян // Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: VI всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 15-16 квітня 2010): зб. тез доп. – К.: НТУУ «КПІ», 2010. – С. 3-4.

19. Новохат О.А. Застосування інфрачервоного випромінювання при сушінні паперу на папероробній машині / О.А. Новохат // Обладнання хімічних виробництв і

підприємств будівельних матеріалів: VIII всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 13 квітня 2011): зб. тез доп. К. : НТУУ «КПІ», 2011. – С. 110-111.

20. Новохат О.А. Аналіз результатів дослідження процесу сушіння паперу із застосуванням інфрачервоного випромінювання / О.А. Новохат // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: I міжн. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 1-4 листопада 2011): зб. тез доп. – К.: НТУУ «КПІ», 2011. – С. 114-115.

21. Новохат О.А. Перша привідна група сушильної частини папероробної машини / О.А. Новохат, О.О. Татарчук// Обладнання хімічних виробництв і підприємств будівельних матеріалів: XII всеукр. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 15-16 травня 2013): зб. тез доп. – К.: НТУУ «КПІ», 2013. — С. 99-100.

22. Татарчук О.О. Пристрій для інтенсифікації сушіння паперу / О.О. Татарчук, В.М. Марчевський, **О.А. Новохат** // Ресурсоенергозберігаючі технології та обладнання: V міжн. наук.-практ. конф. студ., аспірантів та молодих вчених (Київ, 20 - 23 листопада 2013): зб. тез доп. – К. : НТУУ «КПІ», 2013. – С. 72-73.

АНОТАЦІЯ

Новохат О.А. Процес сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.17.08 – процеси та апарати хімічної технології (технічні науки). Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут” МОН України, Київ, 2016 р.

Дисертаційна робота присвячена дослідженню процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання. Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено ефективність сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання, насамперед в періодах нагрівання та першому періоді сушіння. В основу теоретичних досліджень покладено принципи фізичного та математичного моделювання. Отримано нові кінетичні залежності процесу сушіння флютингу із застосуванням енергії інфрачервоного випромінювання за різних технологічних параметрів процесу. Показано, що температура флютингу в першому періоді сушіння за малої густини променевого потоку майже не змінюється і є рівною температурі мокрого термометра; а зі збільшенням густини променевого теплового потоку температура флютингу в першому періоді сушіння збільшується і наближається до температури насичення. Встановлено вплив технологічних параметрів на інтенсивність процесу та надано рекомендації щодо раціонального вибору цих параметрів. Встановлено питомі затрати на енергоресурс під час сушіння флютингу із застосуванням енергії ІЧВ за різних тарифікації електроенергії та порівняно з затратами на використання водяної пари в сушильних циліндрах. Показано, що застосування ІЧВ для сушіння флютингу зменшить витрати природного газу на виробництво водяної пари та викиди вуглекислого газу в атмосферу при

спалюванні природного газу. Результати роботи впроваджено на папероробному обладнанні.

Ключові слова: флютинг, сушіння, інфрачервоне випромінювання, вологовміст.

ANNOTATION

Novokhat O.A. The drying process fluting using infrared energy. – Manuscript.

The dissertation for Philosophy Doctor (eng.) degree on specialty 05.17.08 – Processes and equipment of chemical technology. – National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, MES of Ukraine, Kyiv, 2016.

The dissertation is devoted to research the process of drying fluting using infrared energy. Theoretically substantiated and experimentally confirmed the effectiveness fluting drying using infrared energy, especially in periods of heating and drying the first period. The basis of theoretical research on the principles of physical and mathematical modeling. A new kinetic relationships fluting drying process using infrared energy at different technological parameters of the process. Shown that the temperature of fluting in the first period of drying the low density of radiant flux is almost constant and is equal to the temperature of wet thermometer; temperature fluting in the first period of drying increases during increasing density of radiant heat flow and approaches the saturation temperature. The influence of process parameters on the intensity of the process and recommendations on rational choice of these parameters. Established specific energy expenditure during drying fluting using infrared energy at different charging and electricity costs compared to the use of water vapor in the drying cylinders. Shown that infrared drying fluting reduce the cost of natural gas for the production of water vapor and carbon dioxide emissions into the atmosphere by burning natural gas. The results introduced in paper-making machinery.

Keywords: fluting, drying, infrared radiation, moisture content.

АННОТАЦИЯ

Новохат О.А. Процесс сушки флютинга с использованием энергии инфракрасного излучения. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.17.08 – процессы и аппараты химической технологии (технические науки). Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт" Министерства образования и науки Украины, Киев, 2016 г.

В диссертационной работе проведен анализ современных способов сушки бумаги для гофрирования (флютинга), на базе которого определена целесообразность исследований в этой сфере для создания более эффективных способов сушки с уменьшением энергозатрат, металлоемкости и уменьшение выбросов углекислого газа в окружающую среду.

Предложена физическая модель и математическое описание процесса сушки флютинга с использованием энергии инфракрасного излучения.

Для численного решения математического описания процесса сушки флютинга

использован метод конечных разностей. По числовой методике разработано специализированное программное обеспечение на языке программирования Mathcad и составлен алгоритм расчета установки для промышленной сушки флютинга.

Установлено, что с увеличением удельной массы флютинга общее время сушки увеличивается более интенсивно, чем скорость роста времени.

Поскольку скорость сушки флютинга радиационным способом во втором периоде менее интенсивная, то использование инфракрасного излучения наиболее целесообразно для периода нагрева и первого периода сушки.

Установлено, что при переменном подведении теплоты излучением и контактным способом (например, при монтаже инфракрасных излучателей на свободном пробеге полотна флютинга между сушильными цилиндрами) время сушки по сравнению с контактным уменьшается благодаря дополнительному источнику теплоты.

В диссертационной работе приведены описание экспериментальной установки, методики проведения исследований и обработки полученных опытных данных.

Обобщенные результаты экспериментов представлены в виде графических зависимостей влагосодержания флютинга от времени сушки (кривые сушки), температуры поверхности флютинга от времени сушки и скорости сушки от влагосодержания.

Анализ результатов показывает, что при небольшой плотности тепловых потоков и постоянной относительной влажности воздуха в зоне сушки интенсивность сушки флютинга в первом периоде пропорциональна плотности теплового потока. Начальное влагосодержание на скорость сушки не влияет. А с увеличением массы квадратного метра флютинга время сушки увеличивается.

Анализ полученных теоретических и экспериментальных результатов подтверждает достаточную адекватность полученных кинетических закономерностей.

На основе разработанной математической модели составлен алгоритм расчета промышленной установки для сушки флютинга с применением энергии инфракрасного излучения.

Алгоритм для конкретных исходных данных позволяет определить длину и площадь промышленной установки сушки флютинга с применением энергии инфракрасного излучения и общее количество излучателей заданной мощности.

С целью быстрого нагрева флютинга в начале сушки разработаны два устройства. Также разработаны две конструкции для увеличения интенсивности сушки. На все технические решения получены патенты Украины на полезные модели.

Определены удельные затраты на сушку флютинга с применением энергии инфракрасного излучения и альтернативные затраты на природный газ для производства пара для сушки флютинга на сушильных цилиндрах. Установлено, что удельные затраты энергии при сушке флютинга радиационным способом в ночное время при многотарифной тарификации электроэнергии меньше, чем при контактной сушке.

Ключевые слова: флютинг, сушка, инфракрасное излучение, влагосодержание.