

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ПОЛІСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет лісового господарства та екології
Кафедра лісового та садово-паркового господарства
Кваліфікаційна робота
на правах рукопису

ІЛАЩУК ПАВЛО ЮРІЙОВИЧ

УДК 684.4.04

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛООБМІНУ ПРИ ПРОСОЧЕННІ ТА СУШІННІ
ДЕРЕВИНИ

205 «Лісове господарство»

Подається на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
кваліфікаційна робота містить результати власних наукових досліджень.
Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на
відповідне джерело

_____ Ілащук П.Ю.

Керівник роботи

Кульман Сергій Миколайович
кандидат техн. наук, доцент

Житомир – 2024

Висновок кафедри лісового та садово-паркового господарства
за результатами попереднього захисту: _____

Протокол засідання кафедри лісового та садово-паркового господарства

№ 8 від « 03 » 12 _____ 2024 р.

Завідувач кафедри лісового та садово-паркового господарства

к.с.-г. н., доцент _____ Сірук Юрій Вікторович

« 03 » 12 _____ 2024 р.

Результати захисту кваліфікаційної роботи

Здобувач вищої освіти Ілащук Павло Юрійович захистив кваліфікаційну
роботу з оцінкою:

сума балів за 100-бальною шкалою _____

за шкалою ECTS _____

за національною шкалою _____

Секретар ЕК

АНОТАЦІЯ

Ілащук П.Ю. Дослідження теплообміну при просоченні та сушінні деревини.– Кваліфікаційна робота на правах рукопису.

Кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня магістра за спеціальністю 205 – лісове господарство. – Поліський національний університет, Житомир, 2024.

У цьому дослідженні представлені результати моделювання конвективного теплообміну нагрівального елемента, який є основою технологічного процесу при сушінні та просочуванні деревини.

Отримані результати дозволяють говорити про адекватність запропонованої математичної моделі, що дозволяє оптимізувати керуючі програми сушильних камер.

Ключові слова: динамічна модель, конвекція, теплообмін, дифузія, тепловіддача, сушіння деревини.

ANNOTATION

Ilashchuk P.Yu. Study of heat exchange during impregnation and drying of wood.– Qualification work on manuscript rights.

Qualifying work for a master's degree in the specialty 205 – forestry. – Polissya National University, Zhytomyr, 2024.

This study presents the results of modeling the convective heat exchange of the heating element, which is the basis of the technological process during drying and impregnation of wood.

The obtained results allow us to speak about the adequacy of the proposed mathematical model, which allows optimizing the control programs of drying chambers.

Key words: dynamic model, convection, heat exchange, diffusion, heat transfer, wood drying.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ	5
РОЗДІЛ 2. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ	8
РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ	13
РОЗДІЛ 4. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ	16
4.1. Матеріали та методи	16
4.2. Результати та обговорення	18
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ	28
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	29
ДОДАТКИ	33

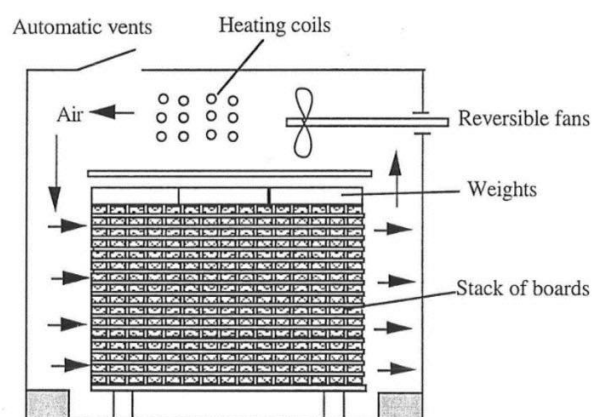
ВСТУП

Сушіння деревини є ключовою операцією обробки деревини, яка забезпечує збереження деревини фізичну цілісність і стабільність під час відновлення та використання. Однак у промисловій сушці все ще трапляються різні дефекти сушіння, до яких відноситься нерівномірний вміст вологи між і всередині дощок, деформація дошки, залишкові напруги висихання, які можуть викликати внутрішні та зовнішні перевірки, і розвал деревини.

Деревина як біологічний і відновлюваний матеріал була історично використовувався для будівель, меблів і прикрас. Щоб зберегти свою фізичну цілісність і механічну стійкість при переробці та експлуатації, вологість деревини вміст перед використанням зазвичай маніпулюють для а рівень, близький до значення, яке досягне деревина на задані навколишні умови (температура та відн вологість). Оскільки вологість зеленої деревини в нормі значно вище цільового значення, висихання деревини необхідний, який сьогодні проводиться в промислових сушарках. Коротше кажучи, між ними шар за шаром укладається брус які наклейки розміщені, щоб забезпечити проміжки для гарячого повітря (сушіння середовище), щоб протікати, як показано на Рис. 1.



(a)



(b)

Рис. 1. Камера для сушіння деревини (a) і схематичний вид з торця внутрішньої конфігурації камери (б).

Позначення на рис. 1: heating coils – нагрівальні елементи; automatic vents – автоматичні вентиляційні отвори; stack of boards – стопка дощок; weights – ваги; reversible fans – реверсивні вентилятори.

Оскільки головним конструктивним елементом сушіння, від якого залежить витрата питомої енергії на сушіння деревини є нагрівальний елемент (калорифер, heating coils), знання процесу конвективного теплообміну дуже важливо для ефективності регуляції роботи всієї сушіння. Тому вивчення характеру коанвективного обміну нагрівального елемента є метою багатьох сучасних досліджень.

Знання характеру зміни температури калорифера у його відключення чи переходу з одного теплового режиму в інший дозволяє програмувати режими сушіння для різних порід деревини.

Тому метою наших досліджень було моделювання динаміки конвективного теплообміну.

Під час проведення досліджень використовувалися такі методики: обчислювальний експеримент серед МАТКАД, і методи визначення температуропровідності і тепловіддачі.

Об'єкт досліджень – калорифер (нагрівальний елемент) робочим агентом якого є вода.

Предмет досліджень – особливості зміни ефективної роботи калорифера у разі зміни режимів його роботи.

Практична значимість одержаних результатів. Результати досліджень дозволяють краще зрозуміти особливості роботи водяного теплонагрівача (калорифера), особливо в період його початкового нагріву, що дає можливість з великою точністю регулювати режими сушіння та просочування деревини.

Публікації.

1. Ілащук П.Ю., магістрант, Кульман С.М., кандидат технічних наук, дослідження кінетики сушіння та гідратації термомодифікованої деревини сосни. II Міжнародної науково-практичної конференції

«актуальні проблеми дослідження лісових та урбоекосистем України в умовах воєнного стану» (20 листопада 2024 року): Київ – 2024.– 221 с.

2. Ілащук П.Ю., студент, Мосейчук В.В., студент, Горбатюк Р.В., студент
Дслідження теплообміну при просоченні та сушінні деревини. Ліс, наука, молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.
3. Горбатюк Р.В., студент Ілащук П.Ю., студент, Кульман С.М., кандидат технічних наук, Феномен реологічного вибуху деревини і деревних композитах, Ліс, наука, молодь: матеріали XII Всеукр. наук.-практ. конф. (26 листопада 2024 р.). – Житомир: Поліський національний університет, 2024. – 193 с.

Структура та обсяг роботи. Робота містить 29 сторінок основного тексту, 18 рисунків, 47 найменувань літератури та додатки.

РОЗДІЛ 1. СТАН ПИТАННЯ ТА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

Конвекція - вид теплообміну, при якому внутрішня енергія передається струменями та потоками самої речовини. Існує так звана природна конвекція, яка виникає в речовині мимовільно за його нерівномірного нагрівання в полі тяжіння.

Конвекція є режимом перенесення тепла, при якому тепло переноситься між поверхнею твердого тіла і сусідньою рідиною, що рухається (або газом). У конвекції є два елементи: перенесення енергії завдяки випадковому молекулярному руху (дифузія) та перенесення енергії об'ємним або макроскопічним рухом рідини (адвекція).

Даний механізм конвекції може бути пояснений наступним чином: у міру того, як шар рідини, що сусідить з гарячою поверхнею, стає теплішим, його щільність зменшується (при постійному тиску щільність обернено пропорційна температурі) і він стає спливаючим. Холодніша (важча) рідина біля поверхні замінюється теплою рідиною і формується структура циркуляції.

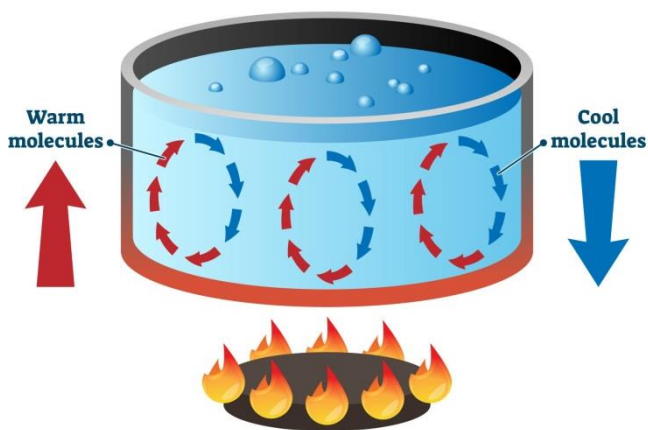


Рис. 2. Приклад конвективного теплообміну під час нагрівання рідини.

Швидкість теплообміну між рідиною температурою T_s та поверхнею твердого тіла площею S при температурі T_0 підпорядковується закону охолодження Ньютона, який можна записати так:

$$Q_{\text{конвекції}} = h S (T_s - T_o)$$

де h – коефіцієнт конвективної теплопередачі, а точніше тепловіддачі. Одиниці h – Вт/м²К. Коефіцієнт конвективної теплопередачі h залежить від руху рідини чи газу, геометрії та термодинамічних та фізичних властивостей.

Є два режими перенесення тепла конвекцією: природна (вільна) конвекція при якій рух рідини або газу, що примикають до поверхні твердого тіла, викликається силами виштовхування, на які впливає зміна щільності рідини або газу завдяки різниці температур між твердим тілом і рідиною або газом. Коли гаряча пластина залишена остигати на повітрі, частинки повітря, що стикаються з поверхнею пластини, нагріваються, їх щільність зменшується, і тому вони рухаються вгору, рис. 3.

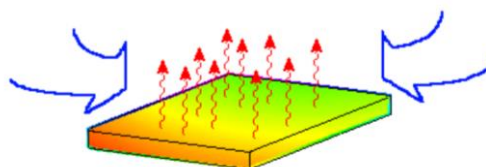


Рис. 3. Приклад вільної конвекції.

Примусова конвекція, коли якийсь зовнішній пристрій, наприклад вентилятор або насос, використовується для прискорення потоку рідини або газу по поверхні твердого тіла. Швидкий рух частинок рідини або газу поверхнею твердого тіла максимізує температурний градієнт і збільшує швидкість теплообміну. На рис. 4 повітря примусово нагнітається поверх гарячої пластини.

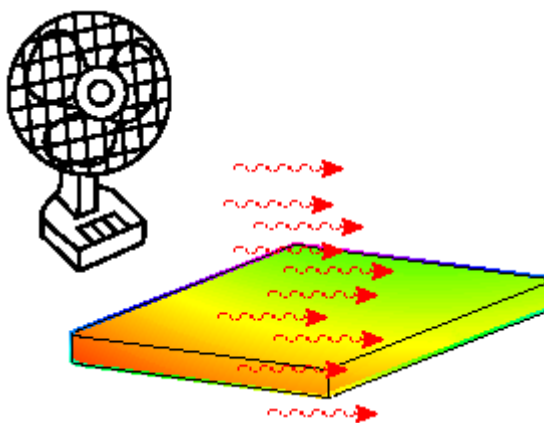


Рис. 4. Примусова конвекція.

Взаємодія деревини та води відіграє центральну роль у використанні деревини, оскільки вода впливає на багато важливих характеристик деревини. Ця тема досліджується понад століття, але нові знання продовжують генеруватися внаслідок вдосконалення експериментальних та обчислювальних методів.

Дерев'яні вироби є ключовими складовими сучасного суспільства і їх можна знайти всюди навколо нас у нашому повсякденному житті. Для всіх застосувань деревини матеріал піддається впливу води у вигляді пари у повітрі, а іноді і у вигляді рідкої води (наприклад, зовнішні дерев'яні конструкції, що піддаються впливу дощу). Подібно до багатьох біоматеріалів, деревина притягує молекули води з навколишнього середовища і поглинає їх усередині матеріалу структури. Ця вода різко впливає на характеристики матеріалу, які є важливими для застосування деревини. Наприклад, вода впливає на структурне використання деревини, змінюючи механічні властивості (жорсткість, міцність, повзучість) та розміри матеріалу [1–5].

Вода також змінює теплоємність та теплопровідність [6–9], тим самим впливаючи на експлуатаційні характеристики деревини та деревних ізоляційних матеріалів. Вироби з деревини повинні мати тривалий термін служби, але вода може вплинути на це, оскільки високий вміст вологи сприяє розкладанню гнильними грибами [10–12]. З іншого боку, виробництво волокон чи біохімічних речовин із деревини вимагає ефективного розкладання матеріал, якому вода допомагає у переробці деревної біомаси [13,14].

Крім того, транспорт води у деревині важливий, наприклад, при сушінні деревини. Таким чином, взаємодія води з деревиною займає центральне місце у всіх аспектах використання дерева у суспільстві. Через важливість взаємодії деревини та води цю тему було вивчено вже понад століття [4,10,15,16] та кілька книг та оглядів узагальнили існуючі дані та знання за багато років [17–25]. Нові та покращені експериментальні та обчислювальні методи були впроваджені в область науки про деревину. Ця еволюція продовжує генерувати

дані, які суперечать, підтверджують чи вносять нові нюанси у наші існуючі уявлення про воду у деревині. Це змушує нас регулярно переосмислювати та переформулювати наше розуміння води у деревині.

Процеси просочування можна розглядати як сукупність таких фізичних явищ:

- рух рідини в деревині під дією капілярного тиску;
- рух рідини в деревині під дією надлишкового тиску;
- дифузійне переміщення молекул та іонів просочувальних речовин в деревині по порожнинах клітин, заповнених водою [26].

На інтенсивність просочення впливають особливості капілярної будови деревини. В деревині хвойних порід водопровідну функцію переважно виконують трахеїди, діаметр порожнин яких в ранній зоні коливається від 3×10^{-5} до 5×10^{-5} м; в пізній зоні їхній розмір є наполовину меншим. Поєднуються між собою трахеїди обрамленими порами, перегородженими мембранами з отворами діаметром $2 \times 10^{-7} - 6 \times 10^{-7}$ м. Порівняльна капілярна проникливість визначається кількістю пор, їхнім діаметром та кількістю отворів у мембранах [27].

Мета цього дослідження полягала також в обґрунтуванні та створенні моделі конвекції, яка могла б бути основою способу прогнозування тривалості технологічних операцій пов'язаних із модифікацією деревини.

РОЗДІЛ 2. МОДЕЛЬ КОНВЕКТИВНОГО ТЕПЛООБМІНУ

Штучне сушіння деревини – це складний та енергоємний процес. Тому зниження енергетичних витрат при сушінні є актуальним технічним завданням.

Одним із найбільш поширених способів сушіння це конвективний спосіб з використанням калориферів, у яких робочим агентом є вода. Математична модель такого калорифера представлена на рис. 5 [10].

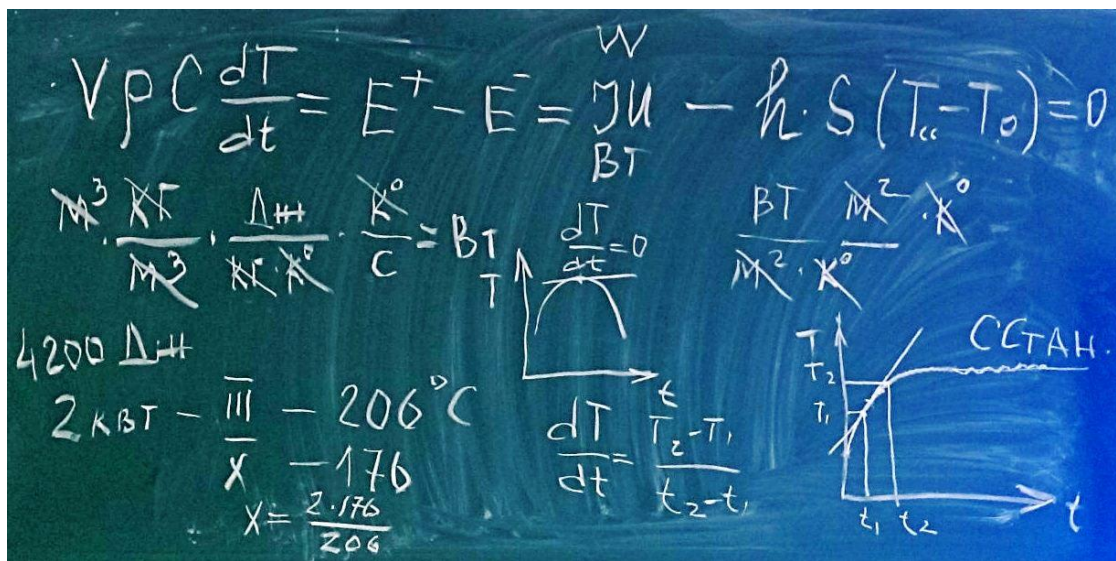


Рис. 5. Математична модель роботи калорифера, та його вихід до стаціонарного стану.

На основі закону збереження енергії було запропоновано базову математичну модель калорифера у вигляді визначального рівняння:

$$V\rho C_p \frac{dT(t)}{dt} = IU - hS(T(t) - T_o) \quad (1)$$

де V – обсяг робочого агента, тобто води, m^3 ;

ρ – щільність робочого агента, kg/m^3 , (у першому наближенні вважатимемо цю величину постійною);

C_p – питома теплоємність робочого агента при постійному тиску, J/kgK , (також вважатимемо її постійною);

$T(t)$ – поточна температура робочого агента на момент часу, t ;

I – Струм в нагрівальному елементі, A ;

U – напруга в нагрівальному елементі, v ;

h – коефіцієнт тепловіддачі, $вт/м^2K$;

S – площа тепловіддачі, $м^2$;

T_0 – температура термостата, тобто довкілля.

Тут у лівій частині, – зміна енергії системи в часі, а в правій, – прихід теплової енергії в систему за рахунок електричного теплоенергонагрівача, $W = IU$, $вт$, і витрата теплової енергії в навколишнє середовище при охолодженні під дією зовнішнього середовища (термостату), $hS(T(t) - T_0)$, $вт$.

Розв'яжемо диференціальне рівняння (1) за стандартним методом поділу змінних, яке представлене у вигляді лістингу в математичному середовищі MathCAD_13:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{W}{V \cdot \rho \cdot C_p} - h \cdot \frac{S}{V \cdot \rho \cdot C_p} \cdot (T - T_0)$$

$$\int_{T_0}^T \frac{1}{\frac{W - h \cdot S \cdot T + h \cdot S \cdot T_0}{V \cdot \rho \cdot C_p}} dT \rightarrow \frac{-\ln(W - h \cdot S \cdot T + h \cdot S \cdot T_0)}{h \cdot S} \cdot V \cdot \rho \cdot C_p + \frac{\ln(W)}{h \cdot S}$$

Наша модель дозволяє визначити час досягнення певної температури T при відомих конструктивних величинах калорифера, його потужності і термодинамічних величинах робочого агента:

$$Find(t) \rightarrow V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{(-\ln(W - h \cdot S \cdot T + h \cdot S \cdot T_0)) + \ln(W)}{h \cdot S}$$

Може бути визначена також температура T після певного часу:

$$Find(T) \rightarrow \frac{\left(-e^{\frac{\ln(W) \cdot V \cdot \rho \cdot C_p - t \cdot h \cdot S}{V \cdot \rho \cdot C_p}} \right) + W + h \cdot S \cdot T_0}{h \cdot S}$$

Або може бути визначена величина коефіцієнта тепловіддачі:

$$\text{Find}(h) \rightarrow V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{\left[-\ln \left[(-V) \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_0) \cdot \frac{W \left[(-t) \cdot e^{\frac{-(W \cdot t - V \cdot \rho \cdot C_p \cdot T \cdot \ln(W) + V \cdot \rho \cdot C_p \cdot T_0 \cdot \ln(W))}{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_0)}}}{V \cdot \rho \cdot C_p \cdot (T - T_0)} \right] \right] + \ln(W)}{t \cdot S}$$

Однак в першу чергу нас цікавить величина максимально можливої температури, яка може бути досягнута за певної потужності нагрівального елемента. Очевидно, наша складна система буде прагнути досягти свого стаціонарного стану, при якому повинен установитися баланс приходу і витрати теплової енергії.

У цьому випадку перша похідна від температури за часом повинна дорівнювати нулю:

$$\frac{dT}{dt} = 0.$$

Тоді:

$$\frac{W}{V \cdot \rho \cdot C_p} - h \cdot \frac{S}{V \cdot \rho \cdot C_p} \cdot (T - T_0) = 0$$

І значить,

$$\text{Find}(T) \rightarrow \frac{W + h \cdot S \cdot T_0}{h \cdot S}$$

Дане рівняння дозволяє спрогнозувати гранично можливу температуру при конкретних конструктивних та теплофізичних параметрах калориферу.

Використання моделі (1) дозволяє визначити час досягнення калорифером як нелінійної динамічної складної системи її стаціонарного стану. І в такий спосіб регулювати циклічність роботи калорифера з метою зменшення споживання електроенергії.

РОЗДІЛ 3. ОБЧИСЛЮВАЛЬНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

Проведемо обчислювальний експеримент із використанням параметричного аналізу побудованої математичної моделі.

Метою цього експерименту є визначення можливостей моделі спочатку якісно описувати процеси, що відбуваються у разі нагрівання робочого агента.

Для цього можна застосувати так званий параметричний аналіз. При якому нам необхідно шляхом зміни параметрів моделі оцінити зміну форми інтегральних кривих, щоб оцінити логічний зв'язок зміни параметрів з логікою зміни фазових змінних у часі.

Оскільки параметрами нашої системи є швидкості нагрівання, ми також визначимо, як змінюється процес нагрівання робочого агента залежно від співвідношення швидкостей процесів.

На рис. 6 представлена кінетична схема моделі за певних початкових умов. На рис. 7 показані графіки зміни у часу динамічних фазових змінних (інтегральні криві) у часу від 0 до 40 хв.

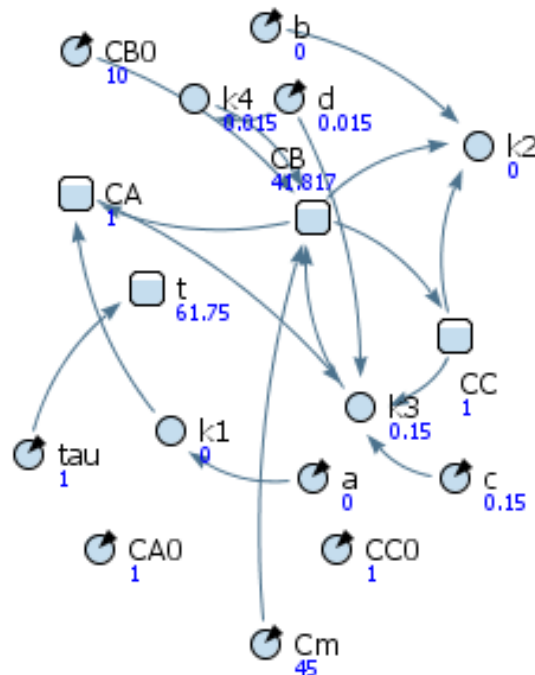


Рис. 6. Кінетична схема моделі у момент модельного часу 40 хв.

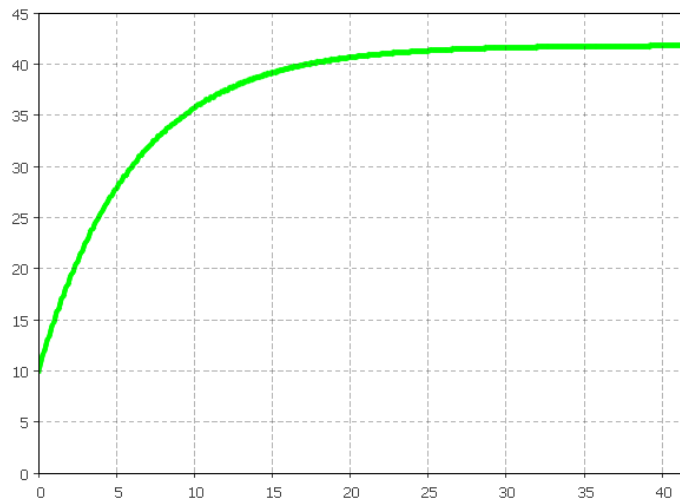


Рис. 7. Графіки зміни у часу динамічної фазової змінної $T(t)$ у проміжку від 0 до 40 хв. .

РОЗДІЛ 4. НАТУРНИЙ ЕКСПЕРИМЕНТ

4.1. Матеріали та методи

Як модель конвективного теплообміну при просоченні та сушінні деревини ми використовували калорифер (теплонагрівальний елемент) на основі електричної плитки з кількома рівнями нагріву. А саме, потужністю 1,5 кВт, 1,25 кВт та 1,0 кВт. Як робочий агент була вода об'ємом 2 л розташована в скляній ємності зі спеціального загартованого скла. Температура робітника в процесі експериментів вимірювалася за допомогою контактного термометра, який кріпився на спеціальній магнітній стійці. Точність виміру в межах 0,1 градусів. Температура та вологість навколишнього середовища (термостату) вимірювалася спеціальним вологоміром моделі.

На рис. 8 показана експериментальна модель калорифера та використане при цьому вимірювальне обладнання.



Рис. 8. Нагрівальний елемент, електроплитка; калорифер – кухоль зі спеціального скла; термометр і вологомір.

Методи випробувань. У процесі випробувань проводилися періодичні вимірювання температури робочого агента за різних рівнів потужності

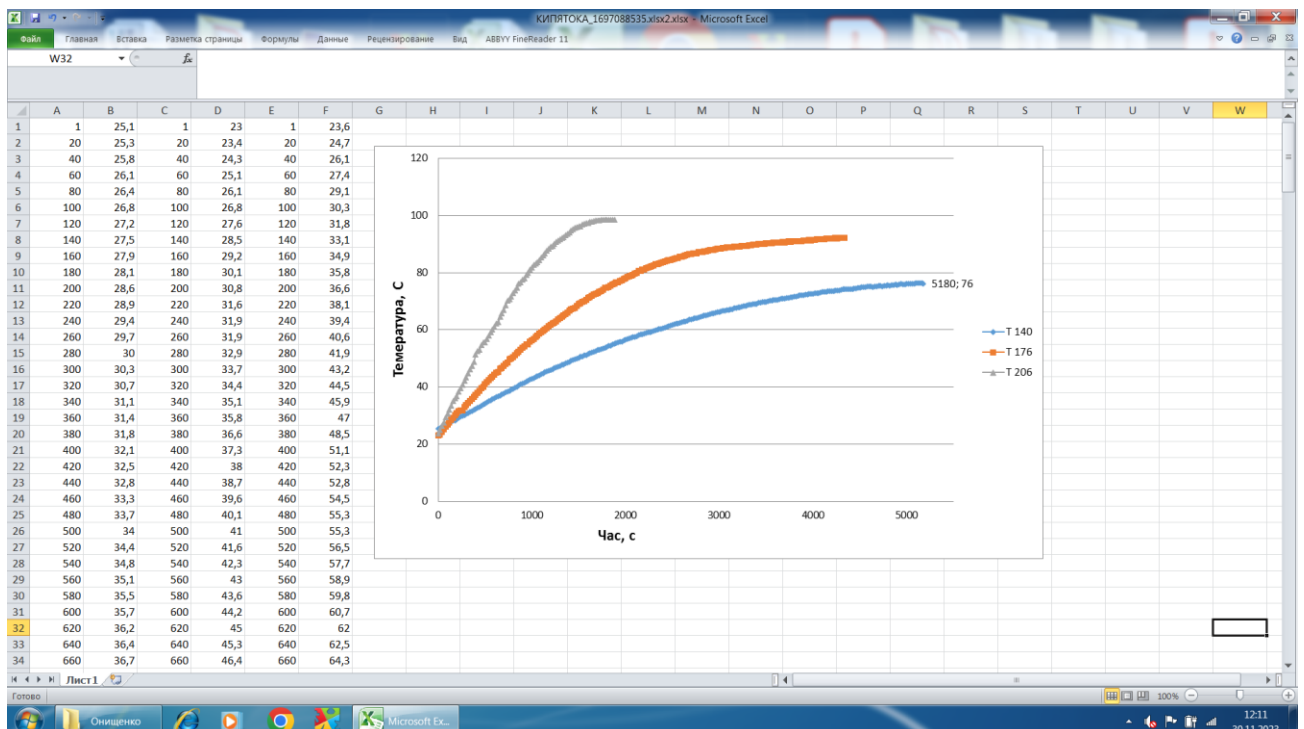
нагрівального пристрою. Перший режим при потужності нагрівача 1,5 кВт, що дозволяє забезпечувати початкову температуру розігрітої плитки до 206°C. Другий режим при потужності нагрівача 1,28 кВт та початковій температурі 176 С. Третій режим при потужності 1,02 кВт і температурі 140°C.

Усього проводили по 6 вимірювань зміни температури води у калорифері при кожному режимі.

4.2. Результати та обговорення

Вихідні середні результати із шести серій експериментів для кожного рівня потужності представлені у таблиці 1.

Таблиця 1. Вихідні середні результати із шести серій експериментів на кожному рівні потужності нагрівального елемента.



На Рис. 9. Результати змін температури робочого агента за різних початкових температур робочої поверхні електроплитки.

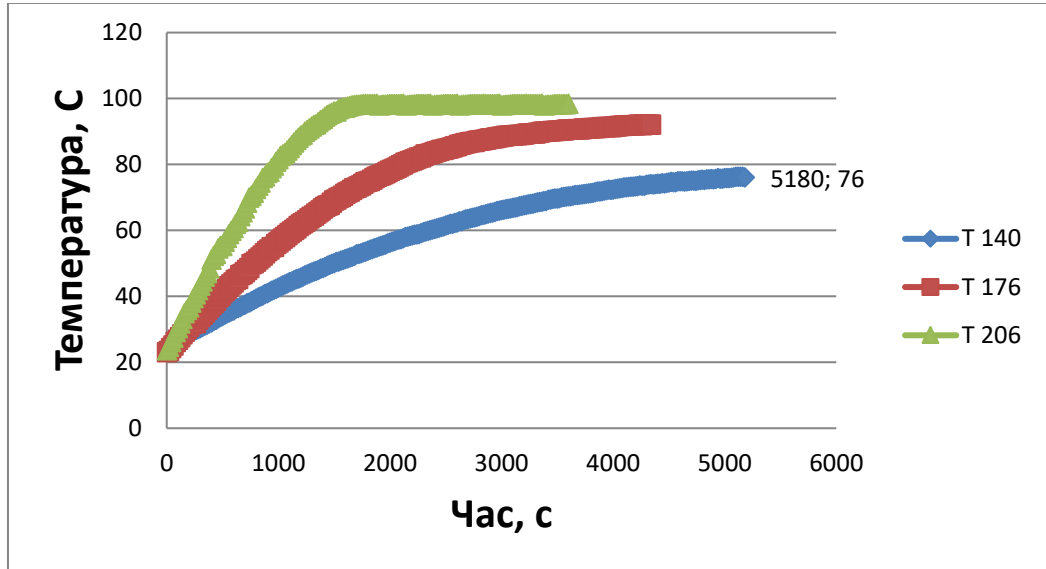


Рис. 9. Зміна температури робочого агенту калолрифера в часі за різних початкових величин температури нагрівального елемента.

На рис. 10 представлена крива зміни температури робочого агента при температурі плити 140 °С.

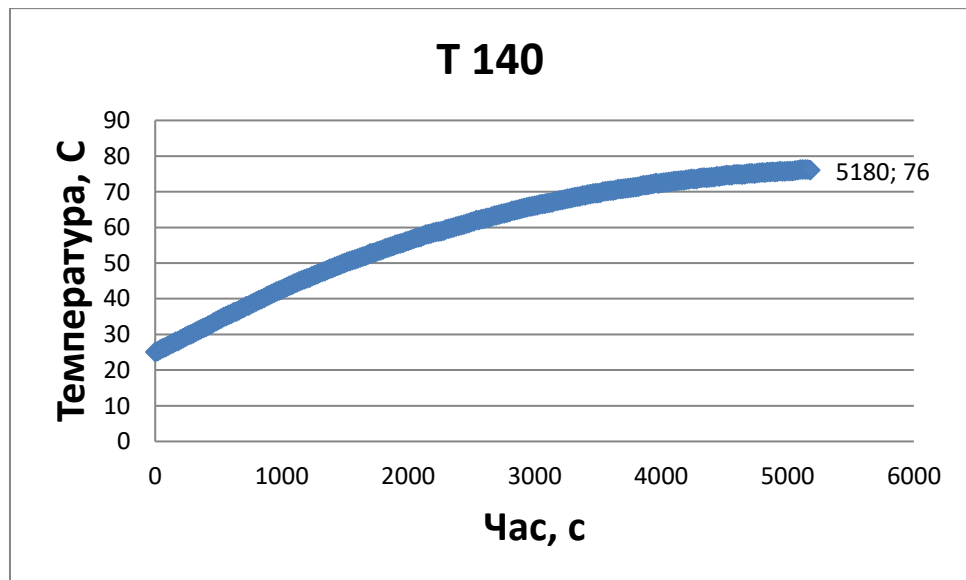


Рис. 10. Крива зміни температури робочого агента при температурі плити 140 °С.

На рис. 11 представлена крива зміни температури робочого агента при температурі плити 176 °С.

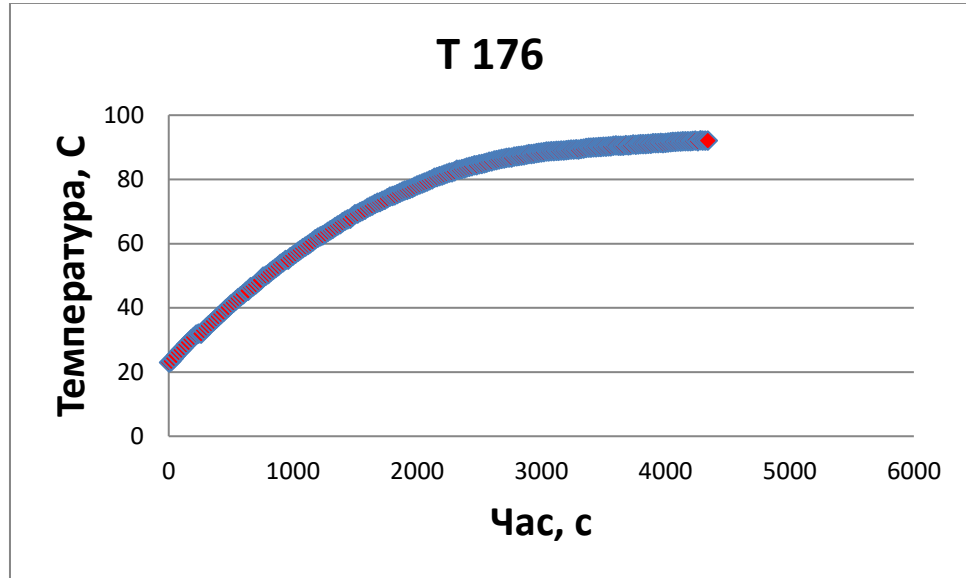


Рис. 11. Крива зміни температури робочого агента при температурі плитки 176 °С.

На рис. 12 представлена крива зміни температури робочого агента при температурі плитки 206 °С.

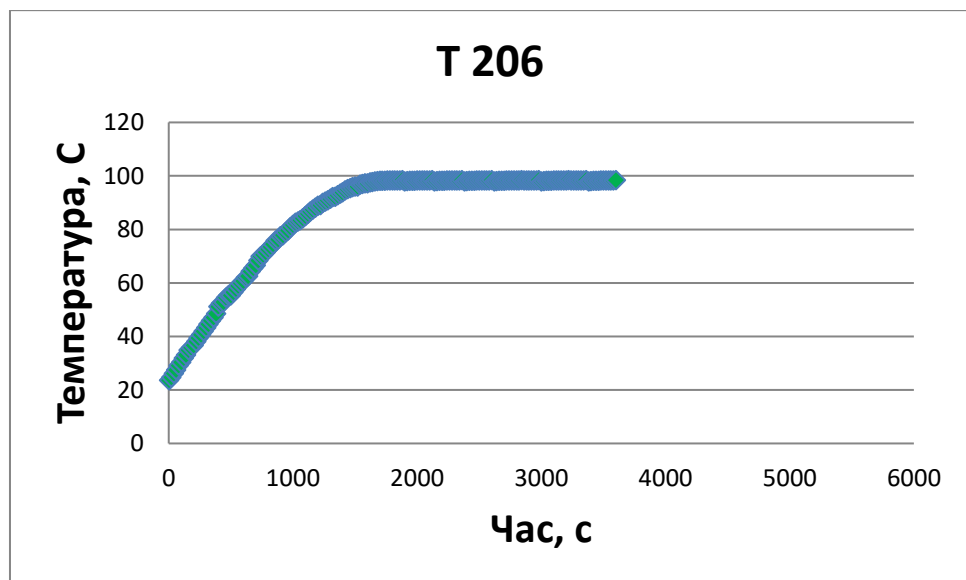


Рис. 12. Крива зміни температури робочого агента при температурі плитки 206 °С.

Як впливає з аналізу кривих нагрівання калорифера при всіх трьох режимах потужності, що підводиться, всі криві мають по дві ділянки з високим ступенем кореляції.

Це початкова пряmolінійна ділянка (лінія регресії у вигляді прямої), рис. 13, який потім перетворюється на логарифмічну криву, рис. 14. Третя ділянка кривої це пряmolінійна ділянка, яка визначає вихід системи в режим її стаціонарного стану. При якому зміни температури відбуваються у вигляді її коливань у її вузьких межах. Приклад таких коливань температури для режиму T206 наведено на рис. 15.

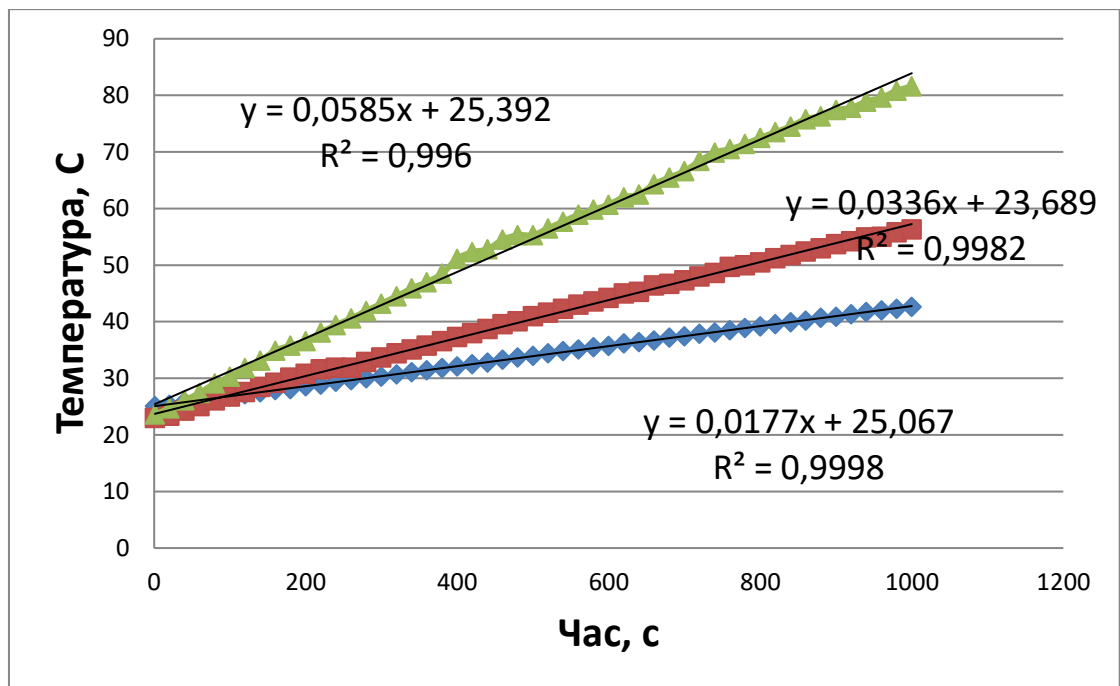


Рис. 13. Початкова ділянка кривої нагрівання при високих початкових температурах нагрівального елемента.

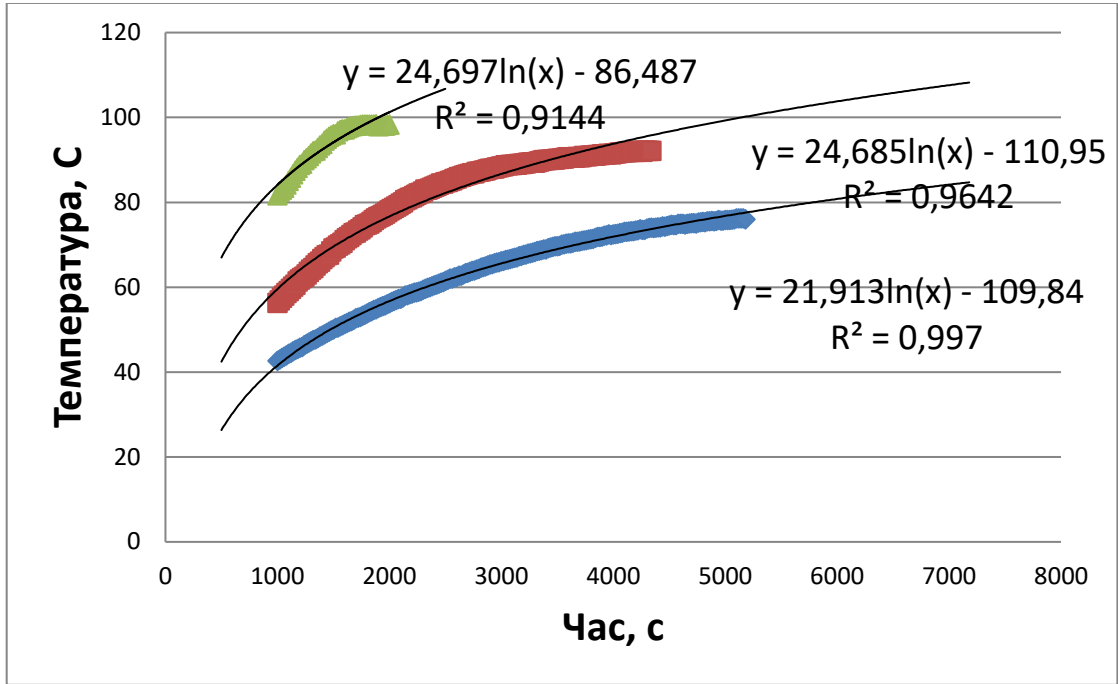


Рис. 14. Друга та третя ділянки звичних нагрівання робочого агента, що складаються з логарифмічної кривої та прямолінійних ділянок, які говорять про вихід системи в режим стаціонарного стану.

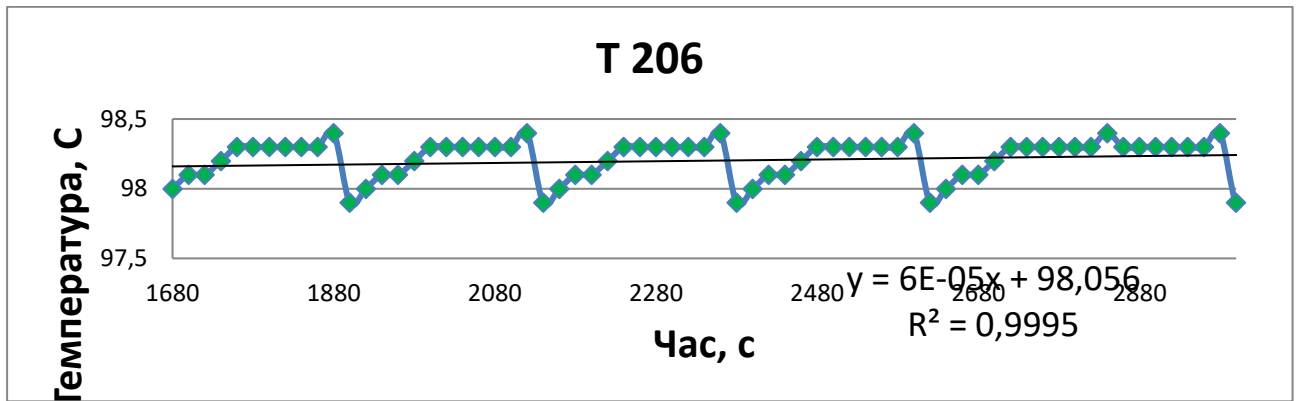


Рис. 15. Третя ділянка кривої, яка описує вихід системи в режим її стаціонарного стану, при якому зміни температури відбуваються у вигляді її коливань у деяких вузьких межах. Коливання температури для режиму T206 у режимі стаціонарного стану системи.

Четверта серія експериментів складалася в тому, що нагрівальний елемент не був попередньо нагрітий і має термостат термотературу. Таким чином зміна температури робочого агента фіксувалося від T_0 до температури насичення (температури стаціонарного стану) при різних величинах потужності нагрівання, що підводиться.

На рис. 16 представлені результати четвертого експерименту при якому початкова температура нагрівального елемента дорівнювала температурі навколишнього середовища (термостата).

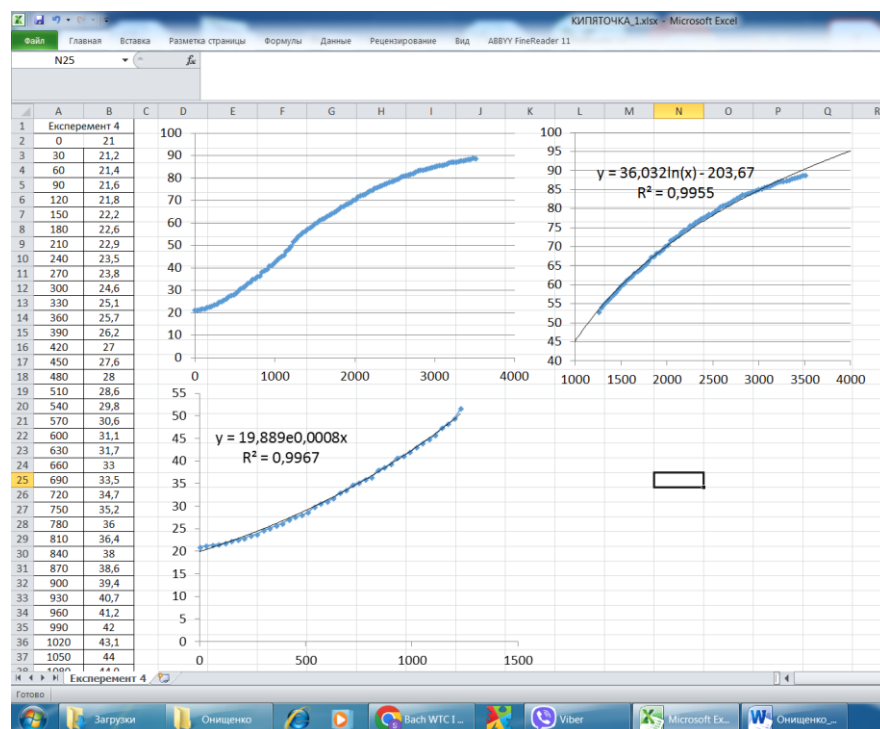


Рис. 16. Результати четвертого експерименту при якому початкова температура нагрівального елемента дорівнювала температурі навколишнього середовища (термостату).

Як бачимо, форма кривої нагріву робочого агента значно відрізняється від попередніх. У разі це класична S – образна крива, яка ще називається кривою насичення. Ця крива зазвичай містить дві ділянки, причому перша це експонента, а друга ділянка насичення, наближається до логарифмічної кривої, причому обидва з дуже високим ступенем кореляції.

Проаналізуємо наші криві нагріву та визначимо точку перегину цих кривих. Тобто визначимо ділянку на якій наша пряма у перших трьох

експериментах та експонентах у четвертому переходять у логарифмічну криву, які закінчуються описом стаціонарного стану системи.

Визначимо, за якої температури і за якого часу прямолінійна ділянка переходить у логарифмічну лінію насичення. На рис. 17 показаний листинг цих розрахунків у середовищі МатКад 13.

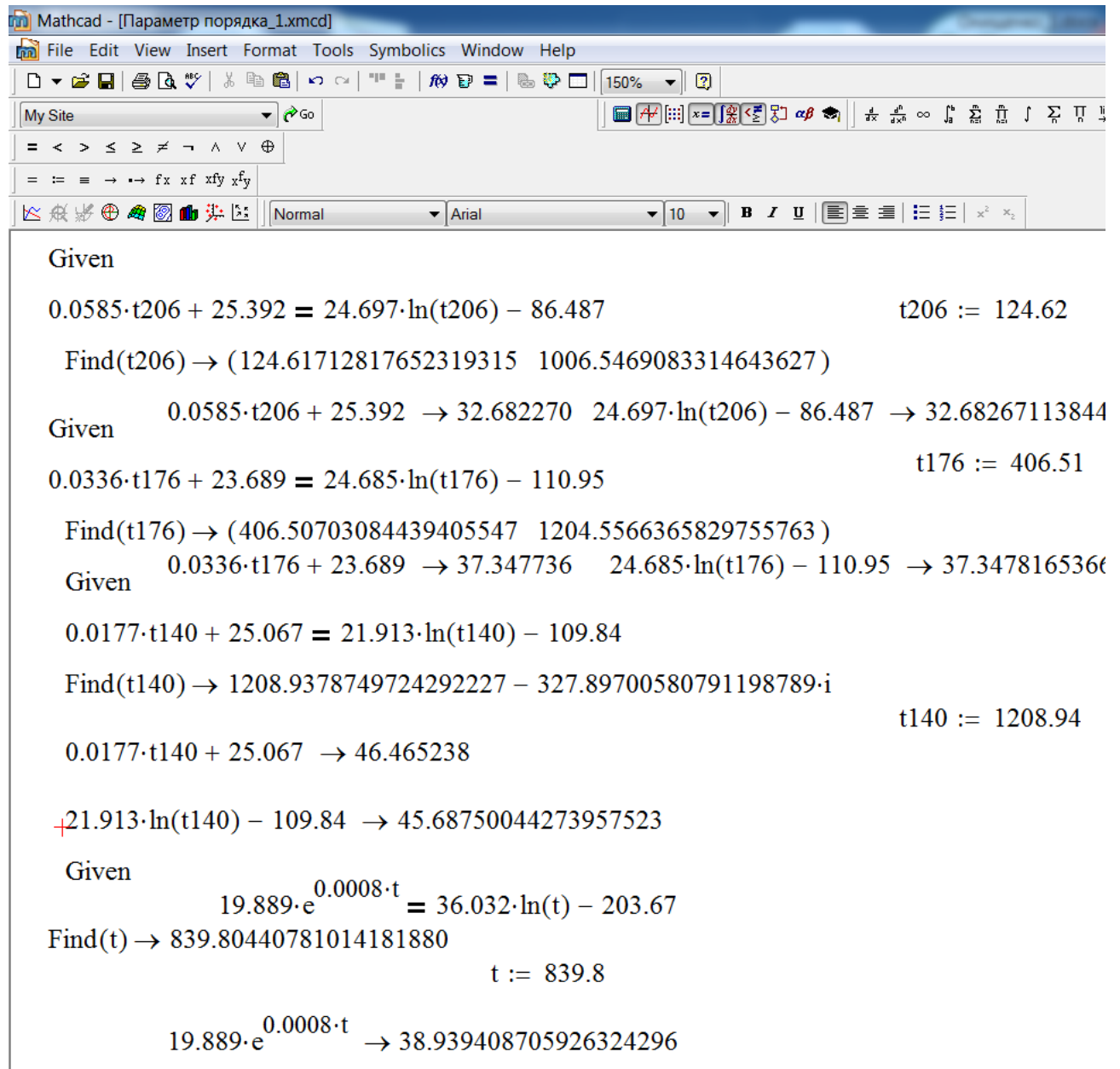


Рис. 17. Листинг аналитического расчета точек перегиба кривых нагрева, уравнения которых показаны на рис. 13, 14 и 16.

Из расчетов следует, что точки перегиба имеют следующие значения:

T206 – 32,7 °C; T176 – 37,3 °C; T140 – 46,5 °C; T21 – 38,9 °C.

Як бачимо, точки перегину розташовані у дуже вузькому діапазоні значень температури, що лежить у межах від 33 до 46 °C. Такий вузький діапазон значень може говорити про вплив деяких фундаментальних фізичних властивостей робочого агента на процеси, що відбуваються при нагріванні.

Оскільки ми знаємо, що щільність води змінюється зі збільшенням температури, можна припустити, що це властивість може вплинути зміну характеру кривих нагрівання. На рис. 18 представлені графіки зміни густини води в залежності від температури.

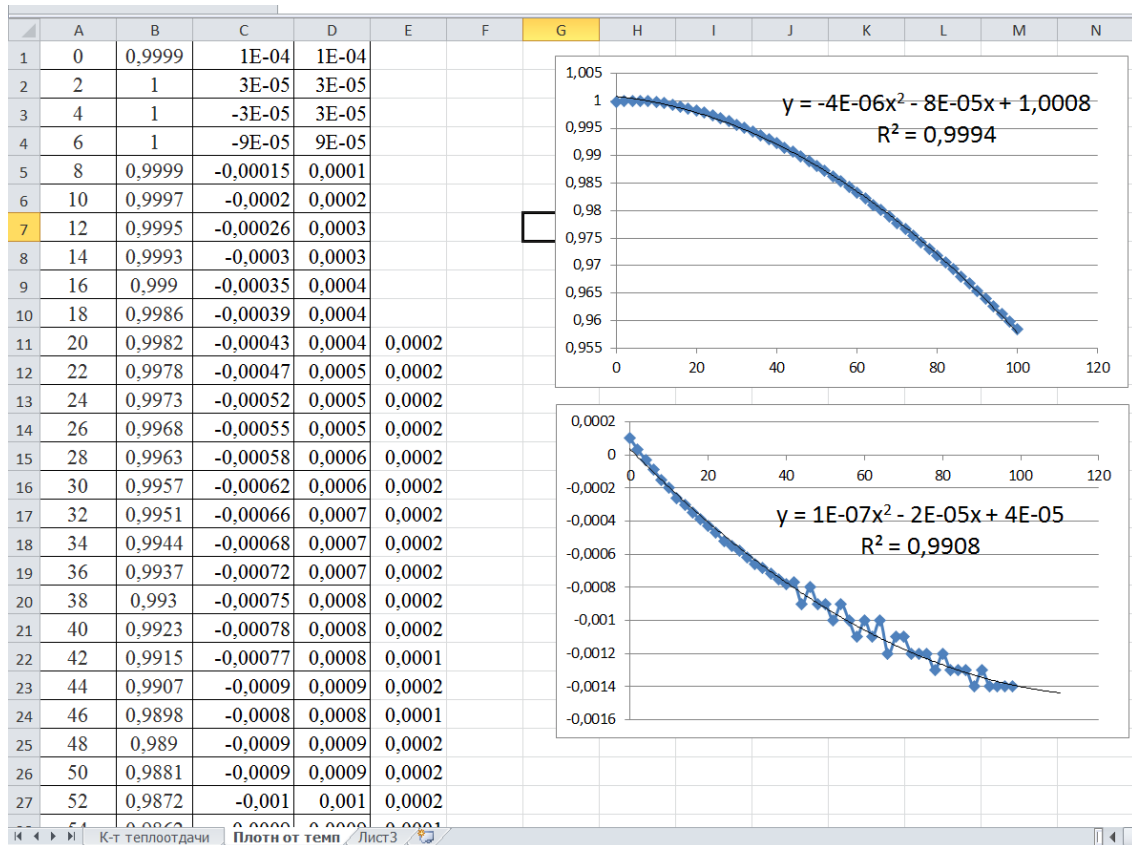


Рис. 18. Зміна величини абсолютної густини води при підвищенні температури, - верхній графік і зміна відносної густини води при підвищенні температури. - нижній графік.

Як впливає з аналізу верхнього графіка, це гладка, тобто в усіх точках функція, що диференціюється. У той час, як нижній графік показує зміну характеру функції при досягненні деякої величини температури. А саме, при досягненні температури близько 40 0C ця функція стає не гладкою і значить диференційованою.

Таким чином, крива зміни відносної щільності води розділена на дві ділянки. Перша ділянка гладкої функції, що диференціюється, під час якої температура підвищується за рахунок теплопередачі (тобто дифузії) або хаотичних коливань молекул води біля їх положень рівноваги. При цьому молекули можуть коливатися з все більшими амплітудами, що призводить до підвищення загальної температури робочого агента.

Однак при досягненні деякої критичної температури відбувається зміна характеру їхнього руху. Вони починають колективно переміщатися у певному напрямку. Тобто відбувається їхнє конвективне (спільне) переміщення.

Тобто початкова ділянка кривої нагрівання до точки перегину це ділянка дифузійного нагріву, тобто нагрівання за рахунок теплопровідної (дифузії), а друга, це конвективне нагрівання за рахунок спільного (синергетичного) руху. При цьому стінки калорифера віддають тепло у зовнішнє середовище за рахунок тепловіддачі, що приводить робочий агент до стаціонарного стану.

Та обставина, що обидві криві, і крива нагрівання робочого агента і крива зміни відносної густини мають дві характерні ділянки, а також те, що температура точки перегину кривих нагрівання близька до точки зміни поведінки відносної густини води говорить про те, що між цими двома процесами існує досить щільний кореляційний зв'язок. Але це потребує додаткових досліджень.

За результатами проведених експериментів можна оцінити адекватність нашої математичної моделі, створеної на підставі закону збереження енергії та показаної в рівнянні (1).

Як бачимо, згідно з графіками показаними на рис. 13, 14 та 16 наша модель досягає стаціонарного стану через певний час, величина якого визначається фізико-технічними параметрами моделі.

Такими як:

- $W = IU$ – потужність нагрівального елемента, Вт. Причому в кожному з експериментів ця потужність складала такі величини: $W1 = 1500$ Вт, $W2 = 1280$ Вт, $W3 = 1020$ Вт.
- h – коефіцієнт тепловіддачі калориферу, Вт/м²К.
- $T1st$ – температура стаціонарного стану системи за потужності нагрівача $W1$, °К. $T2st$ – температура стаціонарного стану системи за потужності нагрівача $W2$, °К. $T3st$ – температура стаціонарного стану системи за потужності нагрівача $W3$, °К.
- S – площа тепловіддачі, м².
- $T1o$ – температура термостата при $W1$. $T2o$ – температура термостата при $W2$. $T3o$ – температура термостата при $W3$.

Узагальнені результати експериментів представлені у таблиці 2.

Таблиця 2. Узагальнені результати експериментів.

№ експерим.	D, м діаметр калориферу	H, м висота	S, м ² , площа тепловіддачі	W, Вт потужність нагрівача	To, К температура термостату	Tst, К температура стаціонарного стану	h, Вт/м ² К, коеф. тепловіддачі
1	0,1	0,2	0,07065	1500	294	371	275,73
2	0,1	0,2	0,07065	1280	294	365	255,18
3	0,1	0,2	0,07065	1020	294	348	267,36
4	0,1	0,2	0,07065	1280	294	361	270,41
середнє значення коефіцієнта тепловіддачі							267,17

Результати експериментів говорять про адекватність запропонованої нами моделі теплоелектронагрівача.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ ТА РЕКОМЕНДАЦІЇ

1. Запропоновано новий розрахунково-аналітичний метод визначення узагальненого коефіцієнта тепловіддачі, який може бути використаний під час проектування калориферів з конвективним тепловідведенням.
2. Метод дозволяє визначати теплоенергетичні та конструктивні характеристики калориферів.
3. Верифікація моделі шляхом проведення обчислювального та натурного експериментів показали, що модель адекватно описує динаміку підвищення температури конвекційного калориферу.
4. Результати експериментів з високим ступенем достовірності дозволяють зробити висновок, що кінетика процесу конвективного теплообміну може бути описана логарифмічною залежністю. У цьому коефіцієнт кореляції загалом сягає 88%.
5. Результати дозволили краще зрозуміти процеси не тільки просочення, а й змодельовати процес сушіння деревини, що може бути використане як тема подальших досліджень.
6. Оскільки обидва режими нагрівання робочого агента можуть використовуватися при виборі режимів роботи калориферів, їх застосування при програмуванні режимів сушіння дозволяє більш точно їх регулювання.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Gerhards, C.C. Effect of moisture-content and temperature on the mechanical-properties of wood—An analysis of immediate effects. *Wood Fiber* 1982, 14, 4–36.
2. Armstrong, L.D.; Kingston, R.S.T. The effect of moisture content changes on the deformation of wood under stress. *Aust. J. Appl. Sci.* 1962, 13, 257–276.
3. Gibson, E.J. Creep of Wood—Role of Water and Effect of A Changing Moisture Content. *Nature* 1965, 206, 213–215. [CrossRef]
4. Tiemann, H.D. Effect of Moisture upon the Strength and Stiffness of Wood; Bulletin 70; US Department of Agriculture, Forest Service: Washington, DC, USA, 1906.
5. Markwardt, L.J.; Wilson, T.R.C. Strength and Related Properties of Woods Grown in the United States; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1935.
6. Hearmon, R.F.S.; Burcham, J.N. Specific heat and heat of wetting of wood. *Nature* 1955, 176, 978. [CrossRef]
7. Kühlmann, G. Untersuchung der thermischen Eigenschaften von Holz und Spanplatten in Abhängigkeit von Feuchtigkeit und Temperatur im hygroskopischen Bereich. *Holz Roh Werkst.* 1962, 20, 259–270. [CrossRef]
8. Sonderegger, W.; Hering, S.; Niemz, P. Thermal behaviour of Norway spruce and European beech in and between the principal anatomical directions. *Holzforschung* 2011, 65, 369–375. [CrossRef]
9. MacLean, J.D. Thermal conductivity of wood. *Heat. Pip. Air Cond.* 1941, 13, 380–391.
10. Zeller, S.M. Humidity in relation to moisture imbibition by wood and to spore germination on wood. *Ann. Mo. Bot. Gard.* 1920, 7, 51–74. [CrossRef]
11. Griffin, D.M. Water potential and wood-decay fungi. *Annu. Rev. Phytopathol.* 1977, 15, 319–329. [CrossRef]

12. Brischke, C.; Alfredsen, G. Wood-water relationships and their role for wood susceptibility to fungal decay. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 2020, 104, 3781–3795. [CrossRef]
13. Amidon, T.E.; Liu, S. Water-based woody biorefinery. *Biotechnol. Adv.* 2009, 27, 542–550. [CrossRef]
14. Liu, S.; Lu, H.; Hu, R.; Shupe, A.; Lin, L.; Liang, B. A sustainable woody biomass biorefinery. *Biotechnol. Adv.* 2012, 30, 785–810. [CrossRef]
15. Volbehr, B.F.K.J. Untersuchungen über die Quellung der Holzfaser. In *Philosophischen Fakultät; Universität Kiel: Kiel, Germany*, 1896; pp. 1–37.
16. Carrington, H. The elastic constants of spruce as influenced by moisture content. *Aeronaut. J.* 1922, 26, 462–471.
17. Engelund, E.T.; Thygesen, L.G.; Svensson, S.; Hill, C.A.S. A critical discussion of the physics of wood-water interactions. *Wood Sci. Technol.* 2013, 47, 141–161. [CrossRef]
18. Venkateswaran, A. Sorption of aqueous and nonaqueous media by wood and cellulose. *Chem. Rev.* 1970, 70, 619–637. [CrossRef]
19. Skaar, C. Theories of water sorption by wood. In *Wood-Water Relations*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1988; pp. 86–121.
20. Siau, J.F. Basic Wood-Moisture Relationships. In *Transport Processes in Wood*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1984; pp. 1–34.
21. Hawley, L.F. Wood-Liquid Relations; Technical Bulletin 248; US Department of Agriculture: Washington, DC, USA, 1931; pp. 1–34.
22. Tarkow, H. Interaction of Moisture and Wood; Report No. 2198; US Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1960; pp. 1–8.
23. Wangaard, F.F.; Wengert, E.M.; Mitchell, P.H.; Rosen, H.N.; Skaar, C.; Simpson, W.T.; Beall, F.C.; Spalt, H.A.; Arganbright, D.M.; Stewart, H.A.; et al. Proceedings of the Wood Moisture Content—Temperature and Humidity Relationships Symposium, Blacksburg, Virginia, 29

October 1979; Rosen, H.N., Simpson, W.T., Wengert, E.M., Eds.; USDA Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 1979.

24. Stamm, A.J. Wood and Cellulose Science; The Ronald Press Company: New York, NY, USA, 1964.

25. Glass, S.V.; Zelinka, S.L. Chapter 4. Moisture Relations and Physical Properties of Wood. In Wood Handbook. Wood as an Engineering Material; FPL-GTR-282; Ross, R.J., Ed.; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory: Madison, WI, USA, 2021.

26. Фенгель Д. Древесина (химия, ультраструктура, реакции): Пер. с англ. Фенгель Д., Вегенер Г. М.: Лесная пром-сть, 1988.

27. Білей П.В. Сушіння та захист деревини / П.В.Білей, В.М.Павлюст.- Львів: 2008.- 312 с.

28. Thybring, E.E.; Fredriksson, M.; Zelinka, S.L.; Glass, S.V. Water in Wood: A Review of Current Understanding and Knowledge Gaps. Forests 2022, 13, 2051. <https://doi.org/10.3390/f13122051>

29. Пінчевська О.О., Горбачова О.Ю. Захисне оброблення дерев'яних конструкцій. - К.: 2013 р. - 191 с.

30. Вітій А., Б. Маросвельдь, 2012: A fajszi kísérleti Paulownia ültetvények újabb kutatási eredményei (Управління екологічними ресурсами та охорона та екологічна співпраця), Дослідницький центр Non-profit Ltd, Шопрон (в Угорщині).

31. Walker, J.C.F., Butterfield, B.G., 1996: Зміна основної щільності в межах молоді деревини ялини Сітка (*Picea sitchensis*), New Zealand Journal of Forestry 40(4): 34–40.

32. Zhang, S. Y. (1997): Взаємозв'язок питомої ваги деревини та механічних властивостей на рівні виду, Wood Science and Technology 31(3):181-191.

33. Мамонтов Е.А. Проектирование технологических процессов изготовления изделий деревообработки: учебное пособие / Е.А. Мамонтов, Ю.Ф. Стрежнев. – Санкт-Петербург: «ПрофиКС», 2006. – 581с.
34. Гончаров Н.А., Башинский В.Ю., Буглай Б.М. Технология изделий из древесины. – М.: Лесная промышленность, 1990. – 528 с.
35. ГОСТ 1146-80. Шурупы с полупотайной головкой // ИПК издат. стандартов. М.: 1982, 4 с.
36. Прокопович Б.В. Основы проектування столярно-меблевих виробництв: Навч.посібник / Б. В. Прокопович - К.: ІЗМН Міністерства України. 1998. – 303 с.
37. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
38. Баканов М. И. Теория экономического анализа / Баканов М.И., Шеремет А. Д. – М.: Финансы и статистика, 1997. – 416 с
39. Шеремет А. Д. Теория экономического анализа: Учебник. / А.Д. Шеремет – М.: Инфра-М, 2002. – 333 с.
40. Житна І.П. Економічний аналіз господарської діяльності підприємств / І. П. Житна – К.: Вища шк., 1992. Мец В. О. Економічний аналіз фінансових результатів та фінансового стану підприємства: Навч. посібник. / В. О. Мец – К.: КНЕУ, 1999. – 132 с.
41. ГОСТ 1759.4-87 Болты, винты и шпильки механические свойства и методы испытания // ИПК издат. Стандартов. – М: 1997 г., 10 с.
42. ГОСТ 16483.23-73 Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон // ИПК издат. Стандартов. – М: 1973 г., 11 с.
43. Електронний ресурс: <http://matemonline.com/metki/mathcad/>.
44. Пижурин А.А. Исследование процессов деревообработки. – М: Лесная промышленность, 1984 – 232с.

45. Билей П.В., Никитюк Л.А. и др. Основы научных исследований технологических процессов д/о. Конспект лекцій, Львів, 1994.
46. Л.О. Никітюк. Наукові дослідження в д/о. Львів: 1994; 1995; 1997.
47. Франк-Каменецкий Д.А. Основы макрокинетики. Диффузия и теплопередача в химической кинетике: Учебник-монография / Д.А. Франк-Каменецкий. – 4-е изд. – Долгопрудный: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 400 с.

ДОДАТКИ

24.09.23

$$\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = u_0 - h(T - T_0)$$


$$A = A_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

$$\frac{dT}{dt} = A_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}}$$

$$\frac{dT}{dt} = 0 \quad A_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} = 0$$

$$e^{-\frac{E}{RT}} = e^{\left(\frac{RT}{E}\right)} = 0$$

$$\ln 0 = -\infty$$

$$u_0 - h(T - T_0) = 0$$

$$T - T_0 = \frac{u_0}{h}$$

$$u_0 \equiv W = \frac{E}{T} \quad T = T_0 + \frac{u_0}{h}$$

$$\frac{dT}{dt} = A_0 \cdot e^{\left(\frac{RT}{E}\right)}$$

$$\int \frac{dT}{e^{(RT/E)}} = A_0 \int dt$$

$$L = \frac{R}{E} \quad \downarrow \text{м.д. } T = T_0 + \frac{u_0}{h}$$

06.10.23

$$\rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = u_0 - h(T - T_0) \cdot S$$

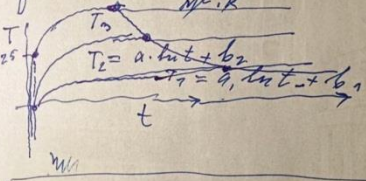
h-т теплообмен

$$\frac{RT}{m^3} \cdot \frac{\Delta H}{RT \cdot K} = \frac{H \cdot M}{M^2 \cdot C} = \frac{K \cdot M}{C^2 \cdot \frac{1}{K}}$$

$$= \frac{K \cdot M}{C^2} = \frac{K \cdot M^3}{C}$$

$$u_0 = \frac{\Delta H}{C} = BT$$

$$h = \frac{q}{\Delta T} \left[\frac{BT}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$q = h \Delta T = \frac{BT}{m^2 \cdot K} \cdot K \cdot K - \text{тепловой поток}$$


$$T_1 = a_1 \cdot t + b_1$$

$$T_2 = a_2 \cdot t + b_2$$

$$T_1 = q_1 \cdot \ln t + b_1$$

$$T_2 = q_2 \cdot \ln t + b_2$$

$$\left\{ \begin{array}{l} V \cdot \rho \cdot C_p \frac{dT}{dt} = W - hS(T - T_0) \\ \downarrow \text{объем воды} \quad \downarrow \frac{\Delta T}{\Delta t} = \frac{170-25}{1} \end{array} \right.$$

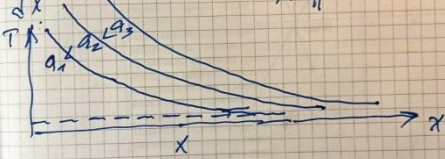
06.10.23.

Кружка

$$V \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dt} = W - hS(T - T_0)$$

$$h = \frac{q}{S \cdot \Delta T} \left[\frac{BT}{m^2 \cdot K} \right] - \text{к.т. теплообмен}$$

$$q - \text{тепл. поток} = h S \Delta T = \frac{BT}{m^2 \cdot K} \cdot m^2 \cdot K = BT$$

$$\frac{d}{dx} (a \cdot \ln(x) - b) \rightarrow \frac{a}{x} \quad \text{определение?}$$


$$\frac{d}{dx} (a \cdot \ln x - b) = 0 \rightarrow$$