

Суска А. А.,
Д'яконов В. І.,
Шевченко С. А.,
Скрипник О. С.
Державний
біотехнологічний
університет, м. Харків,
Україна
E-mail:
v.i.diakonov@gmail.com

**ТЕОРЕТИЧНІ ЗАСАДИ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ТЕХНОЛОГІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ
БУДІВЕЛЬНИХ МАТЕРІАЛІВ
ДЛЯ ДЕРЕВ'ЯНОГО ЖИТЛОВОГО
БУДІВНИЦТВА**

DOI: <https://doi.org/10.31359/2311-441X-2025-26-89-101>

УДК 674.8

Суска А.А., Д'яконов В.І., Шевченко С.А., Скрипник О.С. Теоретичні засади забезпечення технологічних властивостей будівельних матеріалів для дерев'яного житлового будівництва.

Анотація. У статті йдеться про проблему зниження запасів якісної деревини та збільшення частки малоцінної деревини, що обмежує споживчі властивості. Особливу увагу приділено використанню залишків деревини після лісових пожеж як альтернативних джерел сировини для дерев'яного домобудівництва. В умовах зростання споживання деревини у світі та зменшення її якісних запасів, передбачається підхід до переробки пошкодженої деревини для створення композитних матеріалів.

Методом дослідження є розробка комплексного підходу до утилізації залишків деревини після лісових пожеж для виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями. У роботі визначено методологічні засади виробництва таких матеріалів.

Запропоновано технологію виготовлення композитів, що включає використання деревних частинок, сполучного та подрібнених полімерних відходів. Основна увага приділена методу пултрузії, який дозволяє формувати довгомірні профільовані вироби з постійною конфігурацією поперечного перерізу. Розглянуто особливості взаємодії деревини з термопластичними полімерними матрицями, а також вплив попередньої обробки волокон на міжфазну взаємодію компонентів.

Дослідження показали, що додавання антипіренів, таких як алюмохромфосфат, значно знижує горючість композитів, підвищуючи їхню безпеку.

Математичне моделювання процесів НВЧ-сушіння дозволило знайти оптимальні параметри установки для забезпечення рівномірної нагріву матеріалу. Використання НВЧ-енергії сприяє інтенсифікації процесів сушіння та підвищенню продуктивності.

Результати дослідження підтверджують доцільність використання залишків деревини після лісових пожеж та вторинного поліетилентерефталату (ПЕТ) для виробництва екологічно безпечних будівельних матеріалів із покращеними експлуатаційними властивостями. Це відкриває нові можливості для переробки сировини відповідно до сучасних екологічних вимог.

Ключові слова: обгоріла деревина, деревно-полімерні композити, поліетилентерефталат, утилізація, будівельні матеріали, пултрузія, екструзія, НВЧ-сушіння, реологічні властивості.

Suska A.A., Dyakonov V.I., Shevchenko S.A., Skrypnyk O.S. **Theoretical basis for ensuring technological properties of construction materials for wooden residential construction.**

Abstract. This study investigates the utilization of wood residues from forest fires and recycled PET to produce building materials for wooden houses. It focuses on a comprehensive technological approach involving pre-treatment and modification of damaged wood to enhance compatibility with a polymer matrix. The research optimizes composite formation with specific performance characteristics by examining burnt wood properties, component ratios, and technological parameters like temperature and pressure. It also assesses the effectiveness of microwave energy for drying and modifying wood, and for improving the water and fire resistance of the resulting composites. Furthermore, the environmental and economic viability of this waste disposal method is evaluated.

This study aims to scientifically justify and develop a comprehensive approach for utilizing substantial wood residues post-forest fires for wooden house construction. This involves establishing scientific, technical, and methodological bases for producing competitive building materials with specific properties. Achieving this requires analyzing fire-damaged wood characteristics, exploring modification and composite use, and considering global trends in wooden construction alongside environmental and economic waste disposal. The research plans to develop optimal wood-polymer composite formulations using recycled PET and identify the most effective production processes, ultimately providing practical recommendations for the industrial production of eco-friendly and cost-effective building materials from secondary resources.

This research scientifically validated and developed a comprehensive approach for utilizing wood residues post-fire and recycled PET for wooden house construction. Optimal pre-treatment methods minimizing thermal damage to wood's properties were identified. New data on burnt wood characteristics informed the creation of wood-polymer composite formulations with specific properties. Recycled PET proved effective as a binder, enhancing water and biological resistance. Technological recommendations for pultrusion of long profiles were developed. The study investigated flame retardants' impact on fire resistance and used microwave drying modeling to determine optimal processing parameters. Economic analysis indicated potential benefits due to reduced costs. The findings can inform industrial production of eco-friendly building materials from secondary resources.

Key words: burnt wood, wood-polymer composites, polyethyleneterephthalate, recycling, waste materials, pultrusion, extrusion, microwave drying, rheological properties.

Постановка проблеми

Особливістю сучасного стану сировинної бази підприємств з переробляння деревини є суттєве зниження запасів якісної деревини та збільшення частини малоцінної деревини з невисокими споживчими властивостями. Одним із напрямків покриття дефіциту матеріалів для дерев'яного домобудування є підвищення ефективності використання величезного потенціалу вторинної деревної сировини у вигляді технічно можливих варіантів використання залишків деревини після лісової пожежі. Війна завдала великої за обсягами та довготривалої шкоди нашому навколишньому природному середовищу, зокрема лісовим екосистемам. Найбільшою шкодою лісовим екосистемам завдало значне збільшення площі лісових пожеж, які в

2024 році досягли рекордних площ. Постає актуальне запитання, що ж робити з деревиною після лісової пожежі. З іншої сторони, споживання деревини у світі постійно зростає, що призводить до того що, якісної деревини листяних і хвойних порід стає дедалі менше. Хоча пошкодження внаслідок пожежі можуть значно змінити властивості деревини, але деревина залишається придатною для подальшої переробки й, навіть якщо зовнішні шари обгоріли, така сировина може використовуватись для виробництва композитних матеріалів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Метою даної роботи є наукове обґрунтування та розроблення комплексного підходу до утилізації залишків деревини після лісової пожежі для потреб дерев'яного домобудівництва шляхом створення технологічних та методологічних засад виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів із заданими експлуатаційними властивостями, що ґрунтуються на поглибленому аналізі властивостей пошкодженої сировини та тенденцій розвитку дерев'яного будівництва.

Для досягнення поставленої мети потрібно розробити методологічні засади комплексного підходу до виробництва конкурентоспроможних будівельних матеріалів з деревини, що базується на особливостях залишків деревини після лісової пожежі, еколого-економічних аспектах вирішуваної проблеми, тенденціях розвитку дерев'яних.

Формулювання мети досліджень

З огляду на зростаючий попит на натуральні та екологічно безпечні матеріали, бджолиний віск набуває стратегічного значення не лише в межах пасічного господарства, але й у суміжних галузях харчової, фармацевтичної, косметичної, інженерної та енергетичної промисловості. Проте технології його вилучення, очищення та переробки у багатьох регіонах залишаються малоефективними, енергоємними та неадаптованими до сучасних умов виробництва.

Метою даної оглядової роботи є систематизація сучасних підходів до вдосконалення технологій витоплення бджолиного воску з акцентом на інженерні рішення, що сприяють підвищенню енергоефективності, якості кінцевого продукту, екологічної безпечності процесів і адаптивності обладнання до умов пасік різного масштабу. Особлива увага приділена аналізу інноваційних технічних рішень, новітніх матеріалів, методів очищення та переробки воскової сировини, а також перспективам їх впровадження в практику бджільництва та аграрного машинобудування.

Результати досліджень

Одним із технічно можливих варіантів використання залишків деревини після лісової пожежі та утилізації вторинного поліетилентерефталату є виробництво композитів, що складаються з деревних частинок з добавкою сполучного та подрібнених полімерних відходів. Композиційні плити та профільовані вироби можуть використовуватися як у меблевому виробництві, так і у будівництві. Дані напрями використання плитних матеріалів висувають певні вимоги до експлуатаційних характеристик плит і профільованих виробів [5, 6].

Поліетилентерефталат (ПЕТ) це термопластичний полімер, що є найпоширенішим представником класу полієфірів та відомий під різними торговими назвами. Однією з ключових характеристик ПЕТ є індивідуальна (характеристична) в'язкість, яка визначається довжиною полімерного ланцюга.

Обгоріла деревина за структурою є складним матеріалом з великим вмістом целюлози, лігніну, геміцелюлози, ефірних олій, танідів, цукрів, солей і органічних кислот. Наявність деяких сполук, що входять до складу деревини, негативно впливає на її використання як наповнювача. Найнесприятливішими з них вважаються найпростіші цукри та частина геміцелюлози. Хоча дослідниками були проведені роботи, спрямовані на нейтралізацію шкідливого впливу цих елементів, але розроблені технології виявилися дорогими. Оскільки деревинна тріска з великим вмістом целюлози має високий ступінь кристалічності, це ускладнює її використання для виробництва композиційних матеріалів. Обумовлюється це тим, що кристалічні області реагують між собою з утворенням сильних внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, які ускладнюють їх взаємодію з термопластичними полімерними матрицями.

Поліетилен попередньо пропонувалось застосовувати для виготовлення паливних брикетів. Така технологія підходить для виготовлення екструзійних профільованих виробів – поручнів для перил тощо. Тож для їх виробництва сформовано оптимальну структуру цеху (рис. 1).

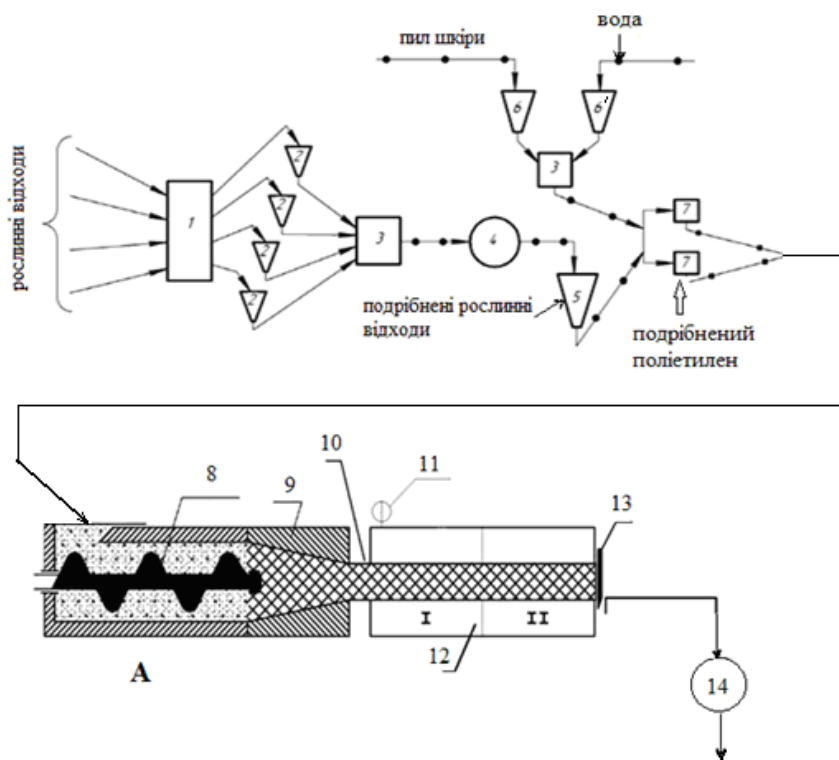


Рис. 1. Оптимальна структура цеху для виробництва довгомiрних профiльованих виробiв iз постійною конфiгурацiєю поперечного перерiзу шляхом протягування через формуючу фiльсеру сумiшi вiдходiв: 1 – пристрiй очищення; 2 – бункери для зберiгання неподрiбненої бiосировини; 3 – багатокомпонентний дозатор; 4 – подрiбнювач бiосировини; 5 – бункер для подрiбненої бiосировини; 6 - бункер для зберiгання пилу шкiри; 6' - бак для води; 7 - змiшувач бiосировини з вiдходами полiетилену; А – прес-автомат для виробництва довгомiрних виробiв; 8 – шнековий транспортер; 9 – формуюча головка; 10 – фторопластова трубка з отворами; 11 – насос; 12 – камера термообробки НВЧ типу (I – перша секцiя мiкрохвильового пристрою на основi системи хвилевiдного типу; II – друга секцiя мiкрохвильового пристрою (адаптер) на основi уповiльнюючої системи довжиною); 13 – нiж i стiл для охолодження виробiв; 14 – бункер для зберiгання готової продукцiї.

Цех складається із очисного пристрою 1, бункера для неподрібнених рослинних відходів 2, багатокомпонентного дозатора 3, пристрою для подрібнення рослинних відходів 4 та прес-автомата А. Він складається із шнекового транспортера 8, формуючої головки 9, камери термообробки НВЧ типу 12.

Згідно з Директивою 2008/98/ЄС Європейського Парламенту та Ради від 19.XI.2008 про відходи та скасування деяких директив, слід дотримуватися принципу каскадного використання біомаси та ієрархії відходів. Як і будь-яка біомаса, деревина повинна бути використана так, щоб забезпечити її найвищу економічну та екологічну додану цінність в наступному порядку пріоритетів: виробу з деревини чи на її основі, продовження терміну експлуатації виробів з деревини чи на її основі, повторне використання деревини, перероблення деревини, використання деревини як палива та утилізація деревини.

Отже, залишки деревини після лісової пожежі доцільно переробляти, використовуючи пултрузію – метод формування довгомірних профільованих виробів із постійною конфігурацією поперечного перерізу шляхом протягування через формуючу філь'єру суміші відходів. Відмінна риса процесу – послідовний рівномірний рух матеріалу через усі технологічні вузли установки. При використанні методу пултрузії за цією технологією послідовно реалізуються всі технологічні операції: ущільнення та нагрів сировини; плавлення матричного матеріалу; просочення та монолітизація нагрітого матеріалу; фіксування цієї форми охолодженням; відрізання профілю необхідної довжини.

Послідовний рівномірний рух матеріалу через усі технологічні вузли установки доцільно створювати за допомогою шнекового транспортера (преса). Шнекові преси мають меншу масу, ніж поршневі, оскільки відсутні масивні поршні і маховики. Шнекові преси працюють значно тихіше, завдяки відсутності ударних навантажень. До недоліків можна віднести підвищені витрати енергії і швидкий знос конічної частини шнека [12]. Теоретичний опис руху біомаси при формуванні виробів шнековим робочим органом є аналітичним підґрунтям для визначення раціональних параметрів преса. При розрахунку і конструюванні машин необхідно розглядати деформацію сировинної біомаси з урахуванням її фізико-механічних і реологічних її властивостей, а також взаємодії зі шнековим механізмом у процесі утворення виробів.

Важливою величиною, що характеризує формуючу зону, є кут конусності каналу. Цей кут, з одного боку, повинен бути таким, щоб забезпечити більш плавне наростання тиску, оскільки це покращує якість та рівномірність просочення за товщиною перерізу та сприяє більш повному видаленню повітряних включень із формуючої зони у вхідну зону. Проте надто маленька конусність призводить до не виправданого збільшення цієї зони, а значить, і габаритів усієї філь'єри.

Для аналізу доцільно звернутися до питань реологічних властивостей полімерних систем. У зв'язку з нетривіальністю реологічних властивостей аналізованої системи, її багатокомпонентністю та поєднанням дві кількох факторів (зсувних напруг, температури та пластифікуючої теплової обробки) звернемося до основ реології полімерних систем і спробуємо поширити їх на пултрузію деревної тріски, пластифікованої розчином пилу шкіри, при середній вологості 13-14%.

Закономірності виникнення та розвитку незворотних деформацій в'язкої течії в полімерних системах аналізуватимемо методами реології. Під дією прикладеної напруги зсуву в полімері виникає деформація зсуву (рис. 2).

Між двома паралельними площинами А і В знаходиться крапля рідини – активатор для роботи екструдера. До верхньої пластинки прикладена сила F , що зміщує площину А щодо площини В (без зміни відстані між ними) на величину Δl . Процес, що відбувається, може бути охарактеризований величинами напруги зсуву та швидкості

зсуву (градієнта швидкості зсуву). Так, при площі верхньої пластинки A на одиницю її площі діє напруга зсуву τ . Під дією напруги зсуву τ за одиницю часу відбувається зміщення пластинки A на величину Δl . Величина цього зміщення може бути охарактеризована тангенсом кута повороту прямої, що з'єднувала протилежні точки до початку деформування, або, що те саме відношенням величини зсуву Δl до відстані між площинами h . Відносна деформація зсуву γ складе $\gamma = \Delta l/h$, а швидкість деформації становитиме $v = d\gamma/dt$. Таким чином, швидкість деформації, характеризує кутову швидкість зсуву або градієнт лінійної швидкості зсуву. У найпростішому випадку зв'язок між швидкістю зсуву та напругою зсуву виражається законом Ньютона:

$$\tau_{заг} = k_0 \gamma, \quad (1)$$

де k_0 – в'язкість, Па·с; γ – швидкість зсуву.

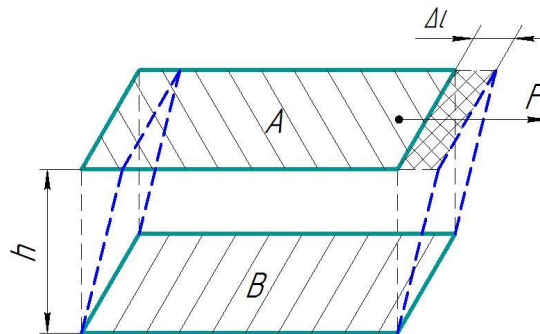


Рис. 2. Схема деформації зсуву рідини між плоскопаралельними пластинами

Як правило, зі збільшенням напруги зсуву швидкість зсуву зростає більшою мірою, ніж це впливає із закону Ньютона. Системи, поведінка яких описується зазначеним чином, називаються псевдопластичними рідинами. Аналіз кривої течії такого типу показує, що у псевдопластичних рідинах зі збільшенням швидкості зсуву в'язкість зменшується. Це називається аномалією в'язкості. Кожному значенню швидкості зсуву притаманне відповідне відношення напруги та швидкості зсуву $k_0 = \tau_{заг} / \gamma$ – тобто, власне значення ефективної в'язкості.

На відміну від в'язкої течії, при якій незворотні деформації розвиваються за будь-якої напруги, пластичність полягає в здатності системи до розвитку незворотних деформацій лише під дією навантаження, що перевищує певну межу – межу плинності. Найпростішою моделлю пластично-в'язкого середовища є так зване тіло Бінгама. Це ідеально пластичне тіло, для якого співвідношення між напругою зсуву τ і швидкістю зсуву γ має вигляд:

$$\tau_0 = k_0 \gamma, \quad (2)$$

де τ_0 – межа плинності; k_0 – пластична (бінгамовська) в'язкість.

Серед реальних полімерних систем до тіла Бінгама за своїми механічними властивостям найбільш близькі деякі наповнені полімери та колоїди; оскільки досліджувана система може розглядатися як наповнена, вона також може відноситися до тіл Бінгама.

У процесі зволоження деревних частинок на їх поверхні знаходяться максимально зволожені шари – наприклад, у вигляді геміцелюлозного гелю, які і надають системі екструдованості. У разі подрібненої тирси деревини ясеня ці поверхневі шари взагалі можуть являти собою аквакомплекс, що знаходиться у в'язко-плинному стані у найширшому температурному діапазоні. Унаслідок зволоження система набуває здатності до екструдування – відбувається відновлення капілярно-

пористої гетерогенної структури матеріалу. Рідкий поверхневий шар слугує своєрідним «рідким мастилом» при екструзії, призводячи до зниження витрати енергії. Звернемо увагу на зміну в цих умовах релаксаційного стану лігніну. Слід зазначити, що у подрібненій деревині знаходиться вже не вихідний лігнін, а продукти його механодеструкції, які мають значно меншу молекулярну масу. Під дією високої температури, що сприяє пластифікації, дії розчину пилу шкіри, а також зсувних напруг в екструдері, лігнін переходить у вимушений в'язкотекучий стан. Більше того, внаслідок значних зсувних напруг і високих температур у формуючій головці екструдера різко падає в'язкість системи, яка переходить від максимальної ньютонівської в'язкості до мінімальної ньютонівської в'язкості. При виході з екструдера сформований, але не висушений виріб (покищо без з'єднання деревини з поліетиленом) спрямовується в НВЧ піч.

При класичній екструзії схема процесу екструзії може бути розділена на три зони: 1 – зона сипучого стану; 2 – зона пластичного стану; 3 – зона в'язко-плинного стану. У екструдері для отримання будівельних виробів відбуваються ті самі процеси, як і при екструзії синтетичних полімерів. Зазвичай гранули полімерів мають сферичну, кубічну або циліндричну форму. Можна припустити, що на початку першої зони (безпосередньо під завантажувальним бункером) шнек працює лише як транспортер. Однак при просуванні в циліндрі екструдера механізм переміщення системи змінюється. Частинки ущільнюються і надалі переміщуються як монолітна маса (корок). Такий затор повинен переміщатися у гвинтовому каналі екструдера у напрямку, перпендикулярному нарізці, але в той же час шнек захоплює полімер, змушуючи його здійснювати обертальний рух. Надалі система піддається в екструдері дуже великим зусиллям стиснення-зсуву, що призводять не лише до переведення системи у вимушено-пластичний стан, а й до переходу системи від максимальної до мінімальної ньютонівської в'язкості.

Основною проблемою при створенні термопластичних композиційних матеріалів з рослинним наповнювачем є рівномірний розподіл компонентів у матеріалі. Тому в технологічних схемах виробництва значна увага приділяється засобам дозування, перемішування та подачі матеріалів в екструдер.

Практика показує знижену енергію взаємодії між матрицею і наповнювачем, що призводить до зменшення механічних властивостей. Щоб компенсувати несумісність на межі розділу, часто вдаються до модифікації поверхні волокон. Однак при цьому виникає ряд технологічних проблем, що створюють певні обмеження для використання природної тріски при створенні композиційних матеріалів. Оскільки тріска з великим вмістом целюлози має високий ступінь кристалічності, то кристалічні області реагують між собою з утворенням сильних внутрішньомолекулярних водневих зв'язків, що ускладнює їх взаємодію з термопластичними полімерними матрицями. Попередня обробка волокон (хімічна модифікація) має значний вплив, оскільки від неї залежить величина міжфазної взаємодії між компонентами, але це економічно не вигідно, тому ми знайшли шляхи удосконалення існуючої технології за рахунок додавання шкіряного пилу у кількості 2%.

Основна проблема, що виникає в робочій камері пристрою для обробки матеріалу енергією НВЧ – нерівномірність нагріву оброблюваного матеріалу, що в підсумку визначить неякісну внутрішню структуру. Так, аналізуючи роботу камери побутової мікрохвильової печі (рис. 3) ми бачимо суттєвий розкид температурному впливу.

Таким чином, при розробці НВЧ пристрою особливу увагу необхідно приділити малому розкиду температури в біомасі, що в підсумку визначає внутрішню структуру і якісні характеристики одержуваної продукції.

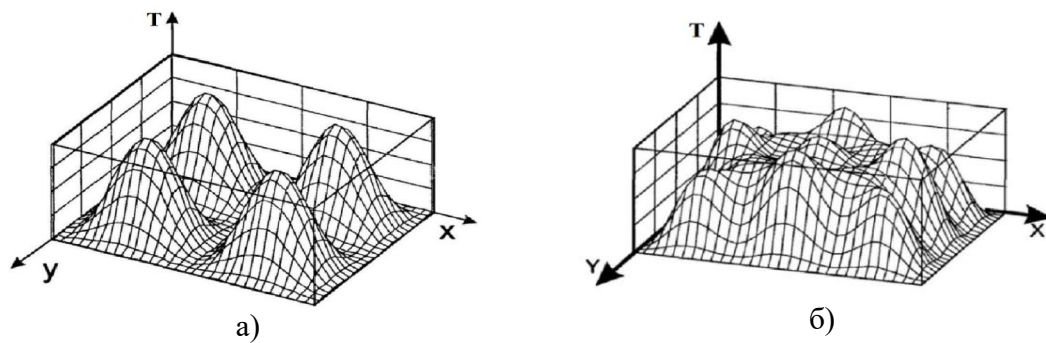


Рис. 3. Розподіл температури в робочій зоні мікрохвильового пристрою: а) на прикладі побутової мікрохвильової печі; б) приклад мікрохвильового пристрою, необхідного для виконання технологічного процесу.

Застосування енергії надвисоких частот (НВЧ) дає змогу інтенсифікувати процеси сушіння та підвищити продуктивність промислових технологічних установок. Забезпечити високу продуктивність можливо тільки в камерах з рухомим об'єктом, який в ній обробляється. Тож у надвисокочастотних камерах з біжучою хвилею найбільш просто забезпечити транспортування. На першому етапі роботи було проведено аналіз існуючих НВЧ установок та вибрана проточна конструкція НВЧ пристрою, яка показана на рис. 4.

Один з основних напрямів використання НВЧ-енергії це застосування її у якості сушіння та формування виробів. Особливого значення набуває посилення досліджень зі створення сучасних засобів для боротьби з грибковою мікрофлорою рослинних відходів. Основна проблема, що виникає в робочій камері пристрою для обробки матеріалу енергією НВЧ, це нерівномірність нагріву оброблюваного матеріалу, що в підсумку визначить неякісну внутрішню структуру.

У цій роботі проведено математичне моделювання процесів НВЧ з метою досягнення необхідної якості термообробки (потрібної температури та вологості) та вибору оптимальних параметрів установки та режимів її експлуатації.

Пропонована установка для НВЧ сушіння діелектричних матеріалів [7, 8] (рис. 4) складається з наступних основних елементів: джерела живлення та НВЧ генератора, що працює на частоті 2450 МГц; робочої НВЧ камери з біжучою хвилею з поперечною взаємодією; системи підігріву повітря в робочій камері та видалення парів вологи; шнекового транспортера для переміщення матеріалу в робочій камері; датчиків технологічного процесу (для контролю температури та вологості матеріалу); датчиків керуючих впливів (потужності НВЧ генератора); датчика витрати повітря у вентиляційній установці для видалення парів вологи; датчиків зовнішніх впливів (напруги мережі, температури навколишнього повітря, споживання електроенергії); системи керування.

Для моделювання формування паливних брикетів використана така методика, та наведені розрахункові формули для розподілу температур (1) і вмісту вологи (2) в i -й секції НВЧ сушарки:

$$\Theta_i = \Theta_{i-1} e^{-\frac{2(h_i+h_{ut})y}{c_i\rho_i d \cdot v}} + P \frac{e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{b(h_i+h_{ut})} \left[1 - e^{-\frac{2(h_i+h_{ut})y}{c_i\rho_i d \cdot v}} \right], \quad (3)$$

$$\Delta m = \frac{h_{ui} b d l c_i \rho_i}{(h_{ui} + h_i) r} \left[\Theta_{i-1} - \frac{P \alpha_i e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{b(h_{ui} + h_i)} \left(1 - e^{-\frac{2(h_{ui} + h_i) y}{c_i \rho_i d v}} \right) + \frac{2 P h_i a_i b l e^{-\sum_{n=1}^{i-1} 2\alpha_n l}}{r_i v (h_{ui} + h_i)} \right], \quad (4)$$

де P – потужність НВЧ генератора; b – ширина тонкої стінки хвилеводу; d – товщина діелектрика; c, ρ – питома теплоємність та щільність діелектрика; v – швидкість руху діелектрика; a – постійне згасання електромагнітної хвилі; r – питома теплота випаровування.

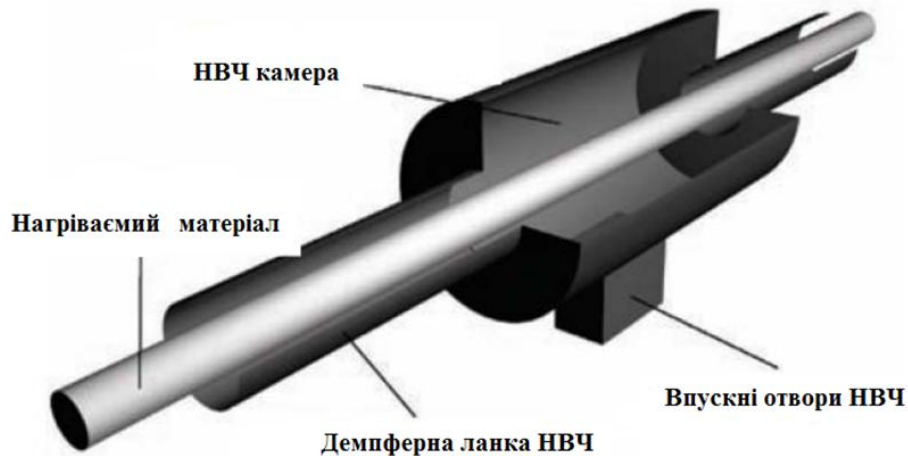


Рис. 4. Проточна конструкція НВЧ пристрою

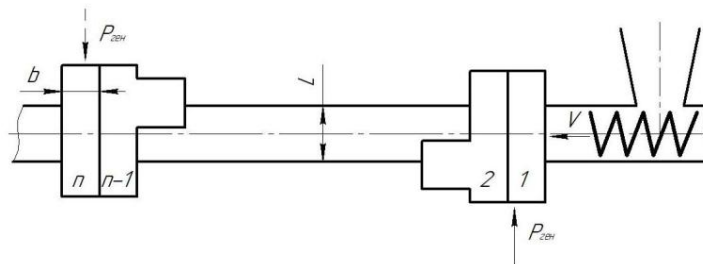


Рис. 5. Схема пристрою НВЧ сушіння з шнековим транспортером

Постійне згасання в залежності від температури визначається за формулою:

$$\alpha(t) := \alpha_c + \frac{\pi^2 \cdot m_1 \cdot \text{tg} \delta(t) \cdot \varepsilon'(t)}{2 \cdot a \cdot l \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a} \right)^2}}, \quad (5)$$

де α_c – стала згасання для сухого матеріалу; m_1 – погонна маса рідини; a – ширина стінки хвилеводу; l – ширина діелектрика; ρ_v – об'ємна густина води; λ – довжина хвилі; $\varepsilon'(t)$ та $\text{tg} \delta(t)$ – відносна діелектрична проникність та тангенс кута діелектричних втрат води.

Обговорення

Розрахункова програма, заснована на викладеній вище методиці, дозволяє враховувати залежності діелектричних параметрів ($\varepsilon'(t)$ та $tg\delta(t)$) від температури, а також залежності коефіцієнта тепловіддачі випаровуванням від теплофізичних параметрів повітря, його температури та швидкості руху.

Алгоритм розрахунку включає наступні етапи. Після введення вихідних даних знаходиться поле температур у першій секції. За знайденим полем температур розраховується вологість матеріалу. Якщо вологість більша за задану, то до початкової довжини камери (першої хвилеводної секції) додається ще одна хвилеводна секція, і розрахунок повторюється. Так відбувається доти, поки вологість матеріалу не досягне заданого значення.

Висновки

1. Актуальність та доцільність використання залишків деревини після лісових пожеж та вторинного поліетиленерефталату для виробництва дерево-полімерних композитних матеріалів підтверджується значними екологічними та економічними перевагами. Це дозволяє не лише зменшити обсяги відходів, а й покращити властивості матеріалів, такі як термо- та водостійкість.

2. Експериментальні дослідження вказують на доцільність додавання алюмохромфосфату для досягнення необхідної водостійкості та міцності матеріалу при вогневому впливі. Математичні моделі, що були отримані в ході досліджень, відображають взаємозв'язок між керованими факторами (питомою тривалістю пресування та частиною добавки антипірену) та експлуатаційними властивостями композиту, такими як міцність і водостійкість. Це дає можливість точніше прогнозувати результати виробництва та покращити процес виготовлення матеріалу. Зниження горючості композиту завдяки додаванню антипіренів до складу сполучного дає змогу підвищити безпеку матеріалів, що використовують у будівництві. Розроблені рекомендації дозволяють отримати композити з бажаними фізико-механічними властивостями, зокрема вогнестійкістю, що є важливим для безпеки будівельних матеріалів.

3. Використання залишків деревини після лісових пожеж та поліетиленерефталату для виробництва будівельних матеріалів відкриває нові можливості для переробки сировини, що відповідає екологічним вимогам сучасного будівництва.

Список використаних джерел

1. Suska A. A. Ways to utilize wood remains after forest fires caused by war / A. A. Suska, V. I. Diakonov, O. S. Skrypnyk, O. V. Dyakonov, O. O. Borovenskyi // Science and technology: challenges, prospects and innovations. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2024. Pp. 234-236. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf> (date of access: 27.04.2025).

2. Suska A. A. Production of energy-efficient solid biofuel from wood waste after forest fires caused by war / A. A. Suska, V. I. Diakonov, O. S. Skrypnyk, O. O. Borovenskyi // Science and technology: challenges, prospects and innovations. Proceedings of the 4th International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Osaka, Japan. 2024. P. 30-32. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf> (date of access: 27.04.2025).

3. Utilization of Fire-Impacted Timber: A Summary of a Survey of Mill Procurement Personnel and a Review of the Literature. Harberts Isaac C. et al. University Digital Conservancy: Home. URL: <https://conservancy.umn.edu/items/678443d7-2cc1-4eb6-a2b3-eca97b993e45> (date of access: 24.11.2024).

4. Василюк О., Коломицев Г. К., Пархоменко В. Ліси у вогнях війни. Втрачено понад 1000 квадратних кілометрів – Ukraine War Environmental Consequences Work Group. Ukraine War Environmental Consequences Work Group – Seeking solutions through information sharing about the environmental impacts of the war. UWEC Work Group. URL: <https://uwecworkgroup.info/uk/flames-of-war-how-ukraine-lost-over-1000-square-kilometers-of-forest/> (дата звернення: 24.11.2024).

5. G.A.O. Tiago, A. Mariquito, S. Martins-Dias, et al. The problem of polyethylene waste – Recent attempts for its mitigation. Science of the Total Environment. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164629>

6. Pavlo Lyutyu, Pavlo Bekhta and Galyna Ortynska. Lightweight Flat Pressed Wood Plastic Composites: Possibility of Manufacture and Properties. Drvna Industrija. 2018. 69 (1). P. 55-62.

7. Physicomechanical Properties of Sustainable Wood Plastic Composites of Tropical Sawdust and Thermoplastic Waste for Possible Utilization in the Wood Industry [Electronic resource] / Jude I. Duruaku [et al.] // Journal of Sustainable Bioenergy Systems. 2023. Vol. 13, no. 04. P. 149–171. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2023.134009> (date of access: 27.04.2025).

8. Pavlo Bekhta, Antonio Pizzi, Iryna Kusniak, Nataliya Bekhta, Orest Chernetskyi and Arif Nuryawan. A Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. Materials. 2022, 15(14), 4942. doi:10.3390/ma15144942

9. Daniel Friedrich. Thermoforming of wood-plastic composites: a compolytics approach translating combined polymer and policy analyses into industrial design principles. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2023. 124: 3533–3551. doi:10.1007/s00170-022-10760-9

10. Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical Properties / S. G. Nukala et al. Journal of Composites Science. 2022. Vol. 6, no. 7. P. 194. URL: <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>

11. A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects / Manickam Ramesh [et al.] // Polymers. – 2022. – Vol. 14, no. 3. – P. 589. – Mode of access: <https://doi.org/10.3390/polym14030589>

12. Суска А.А., Д'яконов В.І., Дьяконов О.В. Пиріжок В.С. Створення композиційного матеріалу для домобудування та меблевих виробів/ Science and innovation of modern world. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. London, United Kingdom. 2023. Pp. 285-292.

13. Огрів Л.Ю., Ястрібінская А.В., Шаповалов І.В., Манушкіна Е. В. Композиційні матеріали з поліпшеними експлуатаційними характеристиками і підвищеною біостійкістю. Будівельні матеріали та вироби. 2003. №9. С. 24-26.

14. Юрченко В.В., Тимофеева Л.А., Плугін А.А. Методика експериментальних досліджень з розроблення складу і технології композиційного матеріалу із термопластичних полімерів і відходів деревини. Збірник наукових праць УкрДАЗТ, 2013, Вип. 138. С. 65-70.

15. Пат. 104089 Україна, МПК С10L Пат. 5/44. Паливний брикет / Дьяконов О.В., Д'яконов В.І., Полянський О.С., Хворост М.В., Білим П.А. – №201506879; заявл. 10.07.2015; опубл. 12.01.2016, Бюл. № 1. 2 с.

16. Пат. 132620 Україна, МПК В27L 11/00. Гнучка технологічна лінія виготовлення паливних брикетів із рослинних відходів з адаптером температури /

Дьяконов О.В., Д'яконов В.І., Полянський О.С., Грязнова С.А., Домбровська А.В. №201807056; заявл. 23.06.2018; опубл. 11.03.2019, Бюл. № 5. 9 с.

17. Вплив породи деревини і товщини термопластичної плівки вторинного поліетилену низької густини на фізичні властивості фанери / О.М. Чернецький та ін. Scientific Bulletin of UNFU. 2022. Т. 32, № 3. С. 73–78. URL: <https://doi.org/10.36930/40320312>.

References

1. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Skrypnyk, O. S., Dyakonov, O. V., & Borovenskiy, O. O. (2024). Ways to utilize wood remains after forest fires caused by war. *У Science and technology: challenges, prospects and innovations* (с. 234–236). CPN Publishing Group. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf>
2. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Skrypnyk, O. S., & Borovenskiy, O. O. (2024). Production of energy-efficient solid biofuel from wood waste after forest fires caused by war. *У Science and technology: challenges, prospects and innovations* (с. 30–32). CPN Publishing Group. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2024/11/science-and-technology-challenges-prospects-and-innovations-28-30.11.24.pdf>
3. Utilization of Fire-Impacted Timber: A Summary of a Survey of Mill Procurement Personnel and a Review of the Literature. (б. д.). University Digital Conservancy :: Home. <https://conservancy.umn.edu/items/678443d7-2cc1-4eb6-a2b3-eca97b993e45>
4. Flames of war: How Ukraine lost over 1,000 square kilometers of forest – Ukraine War Environmental Consequences Work Group. (б. д.). Ukraine War Environmental Consequences Work Group – Seeking solutions through information sharing about the environmental impacts of the war. UWEC Work Group. <https://uwecworkgroup.info/flames-of-war-how-ukraine-lost-over-1000-square-kilometers-of-forest/>
5. Tiago, G.A.O., Mariquito, A., Martins-Dias, S., et al. (2023). The problem of polyethylene waste – Recent attempts for its mitigation. *Science of the Total Environment*. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.164629>
6. Pavlo Lyutyu, Pavlo Bekhta & Galyna Ortynska. Lightweight Flat Pressed Wood Plastic Composites: Possibility of Manufacture and Properties. *Drvna Industrija*. 2018. 69 (1). Pp. 55-62.
7. Duruaku, J. I., Okoye, P. A. C., Onuegbu, T. U., Onwukeme, V. I., Okoye, N. H., & Nwadiogbu, J. O. (2023). Physicomechanical Properties of Sustainable Wood Plastic Composites of Tropical Sawdust and Thermoplastic Waste for Possible Utilization in the Wood Industry. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 13(04), 149–171. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2023.134009>
8. Pavlo Bekhta, Antonio Pizzi, Iryna Kusniak, Nataliya Bekhta, Orest Chernetskyi & Arif Nuryawan. (2022). A Comparative Study of Several Properties of Plywood Bonded with Virgin and Recycled LDPE Films. *Materials*, 15(14), 4942. doi:10.3390/ma15144942
9. Daniel Friedrich. (2023). Thermoforming of wood-plastic composites: a compolytics-approach translating combined polymer and policy analyses into industrial design principles. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 124. 3533–3551. doi:10.1007/s00170-022-10760-9
10. Nukala, S. G., Kong, I., Kakarla, A. B., Kong, W., & Kong, W. (2022). Development of Wood Polymer Composites from Recycled Wood and Plastic Waste: Thermal and Mechanical Properties. *Journal of Composites Science*, 6(7), 194. <https://doi.org/10.3390/jcs6070194>

11. Ramesh, M., Rajeshkumar, L., Sasikala, G., Balaji, D., Saravanakumar, A., Bhuvaneshwari, V., & Bhoopathi, R. (2022). A Critical Review on Wood-Based Polymer Composites: Processing, Properties, and Prospects. *Polymers*, 14(3), 589. <https://doi.org/10.3390/polym14030589>

12. Suska, A. A., Diakonov, V. I., Diakonov, O. V., Pyrizhok, V. S. (2023). Stvorennia kompozytsiinoho materialu dlia domobuduvannia ta meblevykh vyrobiv [Creation of composite material for home construction and furniture products]. *Science and innovation of modern world. Proceedings of the 7th International scientific and practical conference. London, United Kingdom.* 285-292.

13. Ohriv, L. Iu., Yastribinskaia, A. B., Shapovalov, I. V., Manushkina, E. V. (2003). Kompozytsiini materialy z polipshenyi ekspluatatsiinyi kharakterystykamy i pidvyshchenoiu biostikistiu {Composite materials with improved operational characteristics and increased biostability}. *Budivelni materialy ta vyrobny [Building materials and products]. No 9.* 24-26.

14. Yurchenko, V. V., Tymofeieva, L. A., Pluhin, A. A. (2013). Metodyka eksperymentalnykh doslidzhen z rozroblennia skladu i tekhnologii kompozytsiinoho materialu iz termoplastychnykh polimeriv i vidkhodiv derevyny [Methods of experimental research on the development of composition and technology of composite material from thermoplastic polymers and wood waste]. *Zbirnyk naukovykh prats UkrDAZT. Vyp. 138.* S. 65-70.

15. Ievlanov, M., Serdiuk, N., Feshchenko, A., Pivnenko, L., Dyakonov, V. (2020) Improving the mathematical model of change in the body state of an employee. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 1(10-103). 32–42.

16. Patent 104089 Ukraina, MPK S10L Pat. 5/44. Palyvnyi bryket [Fuel briquette]. Diakonov, O. V., Diakonov, V. I., Polianskyi, O. S., Khvorost, M. V., Bilym, P. A. – №201506879; zaiavl. 10.07.2015; opubl. 12.01.2016, Biul. 1. 2 s.

17. Patent 132620 Ukraina, MPK V27L 11/00. Hnuchka tekhnolohichna liniia vyhotovlennia palyvnykh bryketiv iz roslynnykh vidkhodiv z adapterom temperatury [Flexible technological line for the production of fuel briquettes from vegetable waste with a temperature adapter]. Diakonov, O. V., Diakonov, V. I., Polianskyi, O. S., Hriaznova, S. A., Dombrovska, A. V. №201807056; zaiavl. 23.06.2018; opubl. 11.03.2019, Biul. 5. 9 s.

18. Chernetskyi, O. M., Kusniak, I. I., Bekhta, N. S., & Kopanskuy, M. M. (2022). The influence of wood species and thickness of thermoplastic film of secondary low density polyethylene on physical properties of plywood. *Scientific Bulletin of UNFU*, 32(3), 73–78. <https://doi.org/10.36930/40320312>.