УДК 674.07:624.011.1 https://doi.org/10.31548/forest2021.04.005

ВСТАНОВЛЕННЯ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ ВПЛИВУ ПОЛІМЕРНОЇ ОБОЛОНКИ НА БІОРУЙНУВАННЯ ДЕРЕВИНИ

***Ю. В. ЦАПКО**, доктор технічних наук, професор*
http://orcid.org/0000-0003-0625-0783, e-mail: juriyts@ukr.net
***О. Ю. ГОРБАЧОВА**, кандидат технічних наук*
http://orcid.org/0000-0002-7533-5628, e-mail: gorbachova.sasha@ukr.net
***С. М. МАЗУРЧУК**, кандидат технічних наук*
http://orcid.org/0000-0002-6008-9591, e-mail: mazurchuk.s.m@ukr.net
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Проведено аналіз процесу біологічного руйнування деревини. Встановлено, що нехтування екологічно безпечними засобами біозахисту призводить до руйнування конструкцій із деревини під дією мікроорганізмів. Дослідження умов захисту деревини допомагає створити нові типи захисних матеріалів, які сприяють зниженню водопоглинання, а також зменшенню кількості речовин, які є середовищем для розвитку дереворуйнівних грибів. У зв'язку з цим розроблено розрахунково-експериментальний метод визначення частки зруйнованого матеріалу під дією мікроорганізмів із застосуванням антисептика. Аналіз результатів показує, що максимальна втрата маси в разі біоруйнування необроблених зразків деревини склала від 7,6 % до 16 %, а втрата маси зразків термічно модифікованої деревини не перевищила 3 %, в оброблених антисептиком-гідрофобізатором – була менше ніж 2 %. Визначено, що захист у разі оброблення термічно модифікованої деревини масловоском і лазур'ю збільшується порівняно з необробленими у понад 4 рази за показником біоруйнування, а оброблення нетермомодифікованої – у понад 8 разів. Слід зазначити, що наявність масловоску та лазурі призводить до закупорки поверхні деревини, що перешкоджає проникненню вологи і мікроорганізмів. Тому інтенсивність розвитку дереворуйнівного гриба на поверхні різних зразків різниться. Вочевидь такий механізм впливу захисного покриття є тим фактором регулювання процесу, завдяки якому зберігається цілісність об'єкту. На основі експериментальних даних і шляхом моделювання рівнянь виведено динаміку популяції мікроорганізмів в об'ємі матеріалу та функції підвищення чисельності загиблих організмів. Зокрема, на поверхні зразка було створено полімерну оболонку, що значно знизила проникнення мікроорганізмів до деревини, а втрата маси деревини при біодеструкції не перевищила 2,5 %. Додаткове нанесення захисних речовин на поверхню посилює рівень захисту деревини сосни необробленої на 72 %, термомодифікованої за 190 °С – на 25 %, за 220 °С – на 37 %. Схожі результати для деревини граба – 60 %, 37 % і 28 %, для дуба – 50 %, 37 % і 37 % відповідно.

***Ключові слова:** деревина, ефективність термічної модифікації, антисептики, захисні покриття, біоруйнування, стійкість деревини.*

Актуальність та аналіз останніх досліджень. У будівництві не зупиняється пошук високоефективних засобів захисту деревини від руйнування,

оскільки експлуатація на відкритому повітрі робить її вразливою до умов середовища, призводить до значного зниження її природної довговічності і з часом руйнування.

Термічна модифікація деревини викликає хімічні зміни, які суттєво впливають на фізичні, механічні та біологічні властивості деревини (Tsapko et al., 2021). Отже, важливо вивчити ці зміни для кращого використання продуктів. Зокрема, Kubovský et al. (2020) проводили теплову модифікацію деревини за технологією Thermowood за температур 160°C, 180°C і 210 °C. Автори стверджують, що геміцелюлози менш термічно стійкі, ніж целюлоза. Ланцюги полісахаридів розщеплюються на коротші, що призводить до зменшення ступеня полімеризації та збільшення полідисперсності. За найвищої температури оброблення (210°C) також відбуваються реакції зшивання. За більш низьких температур переважають реакції деградації лігніну, вищі температури спричиняють переважно реакції конденсації та збільшення молекулярної маси. Хімічні зміни в основних компонентах термічно модифікованої деревини в основному впливають на її механічні властивості, що слід враховувати при проєктуванні різноманітних дерев'яних конструкцій.

Термічна модифікація деревини є перспективною альтернативою хімічним та біоцидним процесам модифікації, що підвищує біологічну міцність та стабільність розмірів деревини. Основною метою дослідження, як повідомляли Candelier et al. (2020), було визначення біологічної стійкості деревини ясена, обробленої термічною модифікацією, та оцінка протигрибкової і протитермітної активності екстрактивних сполук із термічно обробленої деревини ясена, залежно від інтенсивності процесу модифікації (2 години за 170°C, 200°C, 215°C, 228 °C). Необроблені та термічно оброблені зразки деревини екстрагували водою або ацетоном. Потім екстракти використовували для визначення ефективності інгібування проти грибів білої гнилі (Trametes versicolor) та бурої гнилі (Rhodonia placenta). Встановлено, що ступінь протигрибкової активності цих екстрактів залежить від розчинника, який використовують під час процесу екстракції, і змінюється залежно від інтенсивності термічного оброблення. Екстракти були більш ефективними проти бурої гнилі, ніж грибів білої гнилі. Однак антитермітна активність екстрактів деревини термічно обробленого ясена не була справді значною. Крім того, утворюються нові хімічні елементи в результаті термічного розкладання деревних полімерів (лігніну та геміцелюлози), зокрема аліфатичні кислоти, моносахариди та інші продукти, отримані в результаті їх реакції зневоднення. Найпоширенішим елементом був сирінгальдегід зі сполук, отриманих із лігніну, що може пояснити протигрибкову дію термічно оброблених екстрактів деревини ясена.

Найпоширенішими дефектами структурних елементів є біологічні пошкодження опорних зон покриття та конструкцій балки перекриття, а застосування просочення полімерною сумішшю в зонах руйнування дає змогу відновити фізико-механічні властивості деревини та зберегти вигляд архітектурної споруди в цілому. У роботі Gribanov et al. (2020) представлені результати рентгенівської томографії реконструйованих зразків зруйнованої деревини, а також наведено техніку випробування зразків на дроблення та зріз уздовж волокон. Виявлено, що збільшення міцності реконструйованих зразків деревини під час дроблення вздовж волокон становило 77 % порів-

няно зі зразками зруйнованої деревини та 83 % при сколюванні.

Стійкість термічно модифікованої деревини до атмосферних впливів є дещо кращою порівняно з необробленою деревиною, але з часом відбувається вивітрювання поверхні і постає необхідність додаткового оброблення. Для цього Miklečić et al. (2010) рекомендують проводити проникальне оброблення, яке можуть забезпечити покриття на основі масла.

Для захисту термічно модифікованої деревини слід враховувати зміну деяких її властивостей. Akyildiz & Kesik (2014) виявили, що термічно модифікована деревина має більш гідрофобну поверхню, мало поглинає воду, але все-таки потребує застосування еластичних покриттів, зокрема на основі масла.

Особливості структури деревини як матеріалу сприяють змінам у глобальному масштабі в будівництві. Wang et al. (2018) зауважують, що численні багатоповерхові будинки з масиву перебувають у стадії планування, розроблення або вже побудовані. Ефективність їх будівництва змінить уявлення архітекторів та інженерів про дерево як матеріал. Хоча всі матеріали можуть руйнуватися при змочуванні, потенціал біодеградації деревини в дерев'яній будівлі потребує особливого вивчення. Визначення та усунення умов, які можуть призвести до цієї деградації, матиме вирішальне значення для забезпечення належних характеристик деревини в таких конструкціях. У цій статті розглянуто та протиставлено потенційні джерела біодеградації, які існують для традиційного дерев'яного будівництва, з тими, що використовуються у масовому будівництві, та визначено методи обмеження ризику деградації.

Teacă et al. (2019) зазначають, що одним з ефективних способів запобігти деградації деревини є нанесення захисних шарів покриття шляхом хімічної модифікації поверхні. Останні тенденції в цій галузі передбачають використання натуральних продуктів на біологічній основі – екстрактивних речовин, олій, воску, смол, біополімерів, агентів біологічного контролю, для яких основний критерій класифікації представлений типом захисту. Але залишилися невирішеними питання, пов'язані зі стійкістю цих покриттів до атмосферних коливань при застосуванні в зовнішніх умовах.

Pavlič et al. (2021) вивчали сумісність різних покриттів із термічно модифікованою деревиною сосни шотландської. Покриття, нанесені на термічно модифіковану деревину, демонстрували кращі показники, зокрема нижчий рівноважний вміст вологи, нижчу водопроникність, підвищену стабільність розмірів, кращу стійкість до ультрафіолетового випромінювання та стійкість до грибів синяви порівняно з немодифікованою деревиною. Також було встановлено краще проникнення покриття у модифіковану деревину та краще змочування термічно модифікованої деревини захисними покриттями. Крім того, лакофарбові матеріали на основі масла демонстрували кращі результати після одного року зовнішнього вивітрювання порівняно з водними покриттями.

Масла забезпечують найкращий захист виробів із деревини, але їх застосування обмежується їх тривалою полімеризацією, крім того, вони гарантують захист не більше ніж 3 роки. Arminger et al. (2020) досліджували поведінку лляної та тунгової олії, зокрема тунгова олія надавала гідрофобність усім зразкам деревини після нанесення, навіть без сушіння. Для лляної олії потрібно більше часу для сушіння, і вона була більш сприйнят-

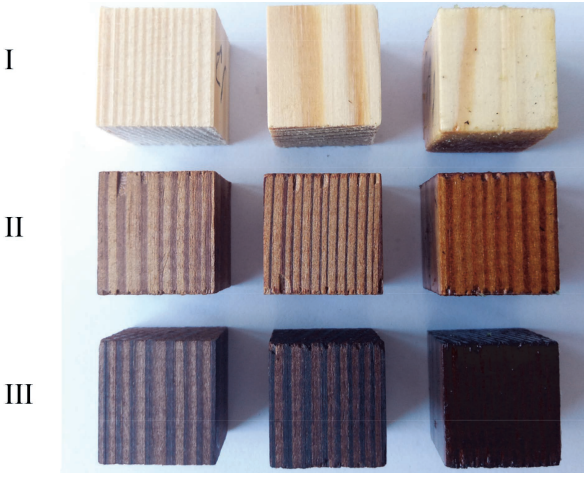


Рис. 1. Модельний зразок деревини сосни: I – немодифікована; термічно модифікована: II – за температури 190ºС протягом 10 годин; III – за температури 220 ºС протягом 10 годин

ливою до впливу термічно модифікованої деревини.

Отже, з літературних джерел встановлено, що при експлуатації деревини відбувається поступова деградація її складових, що потребує ефективного захисту екологічно безпечними речовинами. Мізерність даних для пояснення і опису процесу біозахисту деревини, нехтування застосуванням органічних речовин для утворення еластичних покриттів призводить до неефективного застосування засобів захисту. Це свідчить про доцільність проведення дослідження із визначення ефективності захисту виробів із деревини захисними покриттями, що сприятиме зростанню терміну застосування будівельних конструкцій в умовах навколишнього середовища.

Мета дослідження. Метою цієї роботи є виявлення закономірностей біодеструкції деревини у разі впливу на захисне покриття мікробіологічних чинників.

Матеріали та методи дослідження.

Визначення процесу біологічної деструкції деревини. Дослідження проводили на зразках деревини сосни, дуба як конструкційної та граба як їх альтернативи з метою розширення напрямів використання. Загалом використали 9 груп (по 10 шт.) зразків кожної породи, розміром 20 × 20 × 20 мм. 1, 2, 3 групи – необроблена деревина без та з додатковим захистом поверхні антисептиком-гідрофобізатором, 4–9 групи – термомодифікована за температури 190°С та 220°С протягом 10 годин без та з додатковим обробленням. Як антисептик-гідрофобізатор обрали два типи матеріалів – масловіск OIL WAX Bionic House та лазур Colortex Kompozit. Захисні речовини наносили методом занурення з повторним обробленням після висихання першого шару через 24 години. При цьому середня кількість нанесеного покриття відповідала близько 170 г/м^2 (рис. 1).

Визначення біологічної деструкції деревини проводили за робочою методикою, суть якої полягала в експериментальному визначенні втрати маси захищеної деревини при впливі ґрунтової мікрофлори (ґрунтових руйнівників) за певних повітряно-вологісних

умов і упродовж визначеного часу. Деревину вважають біостійкою, якщо середній показник втрати маси зразків становить не більше ніж 5 %.

Частку зруйнованої деревини розраховували за формулою:

$$X_e = \frac{m_1 - m_2}{m_2}, \qquad (1)$$

де m_1 – маса зразка до випробування, г; m_2 – маса зразка після випробування, г.

Моделювання параметрів проникнення мікроорганізмів у деревину та її руйнування. Приймаємо, що частка об'єму деревини, яка бере участь у біохімічному обмінному процесі й залежить від розміру популяції мікроорганізмів, може бути визначена із системи диференціальних рівнянь:

$$\left.\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= (\alpha - \beta \cdot R) \cdot N \\ \frac{dR}{dt} &= \gamma \cdot N \\ \frac{dX}{dt} &= k \cdot (a - X) \cdot N \end{aligned}\right\}, \qquad (2)$$

де N – чисельність (розмір) популяції активних (живих) мікроорганізмів в об'ємі деревини V ($м^3$); t – час дії мікроорганізмів на деревину, діб; X – частка об'єму деревини, що бере участь у біохімічному обмінному процесі; R – функція зниження чисельності (біозахисних речовин), значення якої дорівнюють частці мікроорганізмів, що припинили життєдіяльність у результаті несприятливих умов: нагромадження продуктів розпаду ферментативної діяльності; виділення отруйних речовин у ході обмінних процесів; підвищення ізолювальної здатності; α – гранично максимальна питома швидкість росту мікроорганізмів; β – питома швидкість зменшення чисельності мікроорганізмів; γ – коефіцієнт зменшення популяції; k – коефіцієнт проникності мікроорганізмів у матеріал; a – загальна частка органічної речовини.

Спочатку вирішуємо незалежну систему двох перших рівнянь системи (1) і отримуємо для популяції мікроорганізмів (Tsapko, 2013):

$$N = \frac{N_m}{\mathrm{ch}^2\left[\left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \cdot \frac{\Delta}{2}\right]}, \qquad (3)$$

де N_m – максимальна кількість мікроорганізмів у деревині, %; t_m – час утворення максимальної кількості мікроорганізмів у деревині, діб; Δ – параметр проникнення мікроорганізмів;
а також рішення для функції зниження чисельності активних організмів у вигляді:

$$R = \frac{1}{2}\left\{1 - \mathrm{th}\left[\frac{1}{2}\left(1 - \frac{t}{t_m}\right) \cdot \Delta\right]\right\}. \qquad (4)$$

На основі експериментальних даних (Tsapko, 2013) та шляхом моделювання рівнянь (3) і (4) виведено динаміку популяції мікроорганізмів в об'ємі матеріалу та функції підвищення чисельності загиблих організмів.

Як видно з рис. 2, у початковий момент часу популяція активних мікроорганізмів у матеріалі є низькою: $N(0) = N_0$, але згодом збільшується, і ця функція обов'язково має точку глобального максимуму (максимального з можливої кількості мікроорганізмів) у певний час $t = t_m$, у якій $N(t_m) = N_m$. Згодом кількість поживних речовин зменшується і популяція мікроорганізмів відмирає.

Ці результати дають уявлення про розмноження мікробактерій у матеріалі та їх відмирання і відповідно показують зміни метаболічних процесів життєдіяльності мікроорганізмів. Захисні речовини в матеріалі підвищують анабіоз мікробактерій і уможливлюють управління процесом протидії біоруйнуванню.

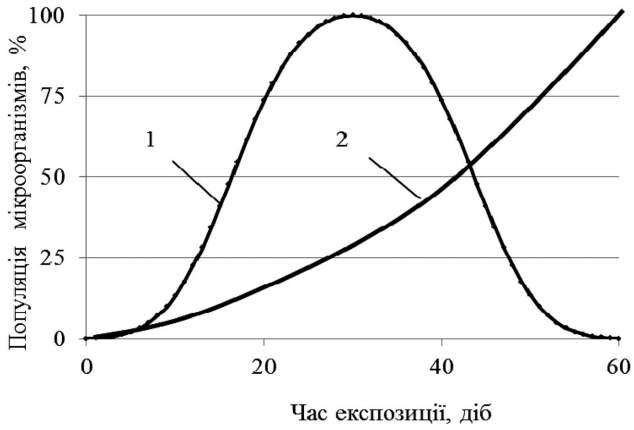


Рис. 2. Динаміка популяції мікроорганізмів в об'ємі матеріалу: *1* – поширення мікроорганізмів, *2* – підвищення чисельності загиблих організмів

Після інтегрування третього рівняння системи (2), враховуючи, що частка зруйнованого матеріалу не може перевищувати 1 або приймати негативні значення, і після підстановки в його праву частину замість N виразу (3), отримуємо рівняння:

$$X = 1 - e^{-2kN_m \frac{t_m}{\Delta}\left\{\operatorname{th}\frac{\Delta}{2} - \operatorname{th}\left[\left(1-\frac{t}{t_m}\right)\cdot\frac{\Delta}{2}\right]\right\}}. \quad (5)$$

На рис. 3 наведено розрахунок частки матеріалу, яка руйнується під дією мікроорганізмів.

Процес біологічного руйнування деревини має інкубаційний період – проміжок часу, після якого починається інтенсивне руйнування. В наших дослідженнях допускаємо, що тривалість цього періоду збігається з проміжком часу t_m, за якого популяція мікроорганізмів досягне критичного розміру. Крім того, постає необхідність знайти значення параметра біоруйнівного процесу Δ, коефіцієнта проникності k та встановити максимальну кількість мікроорганізмів у деревині N_m.

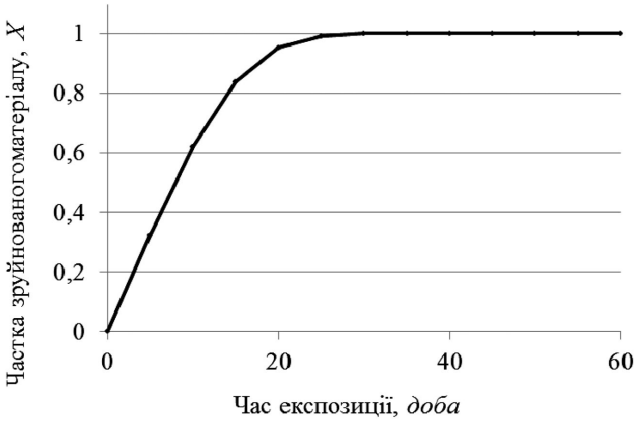
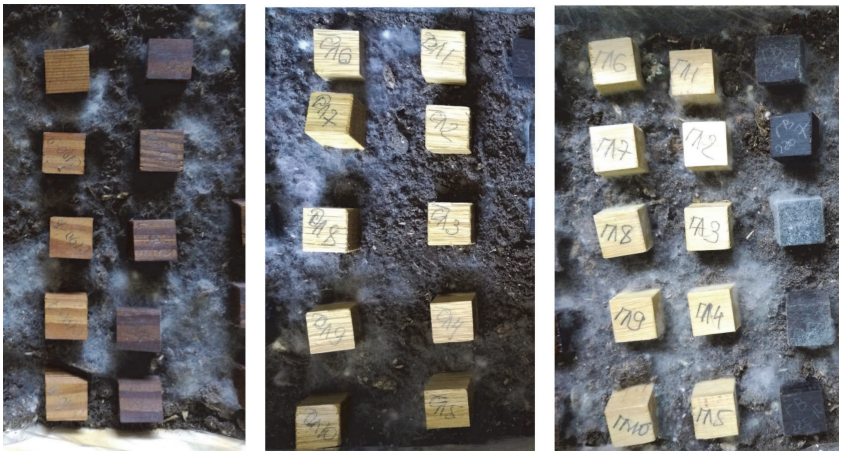


Рис. 3. Частка матеріалу, яка руйнується під дією мікроорганізмів

а *б*

Рис. 4. Визначення стійкості деревини до біошкідників:
а – культури грибів Герицію шиповатого (Hericium erinaccus);
б – дослідні зразки деревини у лабораторних умовах



а *б*

Рис. 5. Поява міцелію на поверхні ґрунту у ящиках зі зразками деревини на першому тижні дослідження: *а* – сосна; *б* – дуб; *в* – граб

Результати дослідження та їх обговорення. Експериментальні зразки витримували протягом двох календарних місяців у лабораторних умовах на кафедрі технологій та дизайну виробів із деревини НУБіП України. У ґрунт підсадили культуру дереворуйнівного гриба Герицію шиповатого (Hericium erinaccus) (рис. 4). Цей вид гриба має однакову силу впливу як на хвойні, так і на листяні породи деревини. Також контролювали та підтримували параметри середовища на необхідному рівні: температура середовища 25 ± 2°C та вологість ґрунту 75–80 %.

Упродовж випробування проводили спостереження за розвитком грибних уражень на поверхні зразків. Через шість діб в усіх ящиках виявлено білий пухнастий міцелій гриба на поверхні ґрунту (рис. 5).

а *б*

Рис. 6. Вигляд зразків деревини сосни на шосту добу експозиції у ящику із ґрунтом: *а* – необроблена; *б* – поверхню оброблено масловоском

Рис. 7. Зміна зовнішнього вигляду зразків деревини граба після тижня витримки у ящику із ґрунтом

Частково міцелій дереворуйнівного гриба поширювався на поверхні зразків усіх досліджуваних порід деревини із додатковим обробленням лазур'ю. На зразках деревини сосни необробленої та обробленої масловоском можна спостерігати ватоподібний міцелій зеленого кольору (рис. 6).

На восьму добу схожий міцелій з'явився на зразках термомодифікованої за 190°С і 220°С деревини сосни із обробленням масловоском. На зразках необробленої деревини граба спостерігали появу коричних плям (рис. 7). З часом кількість ушкоджених зразків та площа ураження збільшувалися.

На зразках деревини дуба модифікованого за температури 220°С із поверхнею, обробленою масловоском, пухнастий міцелій зеленого кольору почав з'являтися на 16-ту добу, проте за зовнішнім виглядом він відрізнявся від того, що виявили на сосні. У цей час на деревині граба, термомодифікованій за 190°С без поверхневого оброблення, виявлено порошкоподібний міцелій сірого кольору. На деревині граба без термомодифікування із поверхнею, обробленою лазур'ю, виявлено пухнастий міцелій сіро-зеленого кольору.

На цьому етапі необроблена деревина дуба почала зафарбовуватися у жовтий колір (рис. 8).

На 20-ту добу деревина сосни покрилася брудно-зеленим міцелієм на більшій площі зразків. Деревина граба, термомодифікованого за 190°С та з додатковим оброблення масловоском, почала покриватися нальотом сірого кольору. Ще через чотири доби на торцях

Рис. 8. Вигляд необробленої деревини дуба через два тижні досліджень

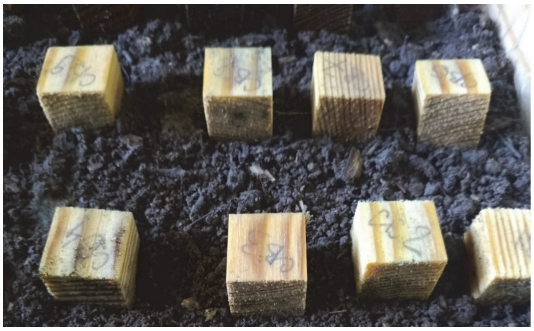


Рис. 9. Поява чорних плям на зразках деревини сосни, обробленої масло-воском, на 24-ту добу

зразків деревини сосни з поверхневим обробленням масловоском почали з'являтися плями чорного кольору (рис. 9).

Зразки деревини дуба, термомодифікованого за 190°С і обробленого лазур'ю, в цей час були вкриті частково зеленим порошкоподібним міцелієм.

Дослідні зразки продовжували витримувати в умовах, сприятливих для розвитку дереворуйнівних грибів. Через тиждень зафіксовано появу на необробленій деревині сосни зеленого і червоного забарвлення. Зразки дуба необробленого активно набирали вологу в цей період і забарвлювалися у жовтий колір. Також на торцях подекуди було видно ватоподібний міцелій зеленого кольору. Схоже явище було на зразках деревини дуба, модифікованого за температури 220°С. Деревина граба залишалася без помітних змін.

На 38-му добу експозиції у лабораторних ящиках деревина сосни активно набрала вологу із ґрунту і набула жовтого забарвлення. Така сама ситуація була зі зразками деревини дуба, обробленої масловоском, на деяких поверхнях помітне червоне забарвлення. З'явився білий міцелій на торцях зразків деревини дуба, термомодифікованого за 190°С і обробленого лазур'ю. Дуже мала частка міцелію жовтого кольору помітна на зразках необробленої деревини граба (рис. 10).

Ще через 10 діб досліду зразки сосни, обробленої масловоском, набрали вологу і пожовтіли. На зразках сосни, термомодифікованої за 220°С, було помітно білий міцелій на значній поверх-

Рис. 10. Зовнішній вигляд зразків необробленого граба на 38-му добу експозиції у агресивних умовах

Рис. 11. Зовнішній вигляд зразків деревини граба, обробленої масловоском

ні. Торцева поверхня деревини сосни, модифікованої за 220°C із додатковим нанесення лазурі, вкрилася міцелієм світло-зеленого кольору. Зовнішній вигляд граба, обробленого масловоском, також змінився: на торцевих поверхнях помітний міцелій жовтого кольору, а на верхній частині (протилежній від місця контакту з ґрунтом) – сітчаста павутина гіф (рис. 11).

На зразках необробленого граба в деяких місцях плями коричневого кольору змінилися на чорні. Через два місяці витримки зразків у агресивних умовах помітне було потемніння нижньої частини, що безпосередньо контактувала з ґрунтом.

Після завершення експериментального дослідження зразки очистили від ґрунту, зважили після висушування і визначили вплив покриття масловоску та лазурі на стійкість деревини до біоруйнування (табл. 1).

Як бачимо, термічне модифікування збільшує стійкість деревини до впливу біологічних шкідників. Зокрема, втрата маси у термомодифікованих зразків за 190°C під час експозиції у зараженому ґрунті зменшилася у 5 разів для деревини сосни; у 3,5 разу – для граба і 3 рази для дуба. Вплив температури 220°C сприяє зменшенню показника у 5,6, 4,5 і 3,1 разу відповідно. Додаткове нанесення захисних речовин на поверхню посилює рівень захисту деревини сосни необробленої на 72 %, термомодифікованої за 190°C – на 25 %, за 220°C – на 37 %. Схожі результати для деревини граба – 60 %, 37 % і 28 %, для дуба – 50 %, 37 % і 37 % відповідно.

1. Результати дослідження впливу масловоску та лазурі на стійкість деревини до біоруйнування

Об'єкт випробування	Маса зразка, г		Втрата маси деревини, %	Частка зруйнованої деревини
	до випробувань	після випробувань		
1	2	3	4	5
Сосна необроблена	4,9	4,1	16,330000	0,195122
Сосна необроблена+масловіск	4,33	4,12	4,850000	0,053528
Сосна необроблена+лазур	4,7	4,5	4,250000	0,044444
Сосна т. м.* за 190°С	4,86	4,7	3,290000	0,034043
Сосна т. м. за 190°С+масловіск	5,65	5,51	2,480000	0,025408
Сосна т. м. за 190°С+лазур	4,46	4,36	2,240000	0,022936
Сосна т. м. за 220°С	4,49	4,36	2,890000	0,029817
Сосна т. м. за 220°С+масловіск	5,45	5,35	1,830000	0,018692
Сосна т. м. за 220°С+лазур	3,87	3,8	1,810000	0,018421
Граб необроблений	6,89	6,32	8,272859	0,090190
Граб необроблений+масловіск	7,24	6,99	3,453039	0,035765
Граб необроблений+лазур	6,99	6,77	3,147353	0,032496
Граб т. м. за 190°С	6,7	6,54	2,38806	0,024465
Граб т. м. за 190°С+масловіск	7,31	7,2	1,504788	0,015278
Граб т. м. за 190°С+лазур	7,13	7,03	1,402525	0,014225
Граб т. м. за 220°С	6,48	6,36	1,851852	0,018868
Граб т. м. за 220°С+масловіск	6,9	6,81	1,304348	0,013216
Граб т. м. за 220°С+лазур	6,8	6,71	1,323529	0,013413
Дуб необроблений	5,44	4,98	8,455882	0,092369
Дуб необроблений +масловіск	4,98	4,76	4,417671	0,046218
Дуб необроблений +лазур	4,75	4,55	4,210526	0,043956
Дуб т. м. за 190°С	4,14	4,02	2,898551	0,029851
Дуб т. м. за 190°С+масловіск	5,29	5,19	1,890359	0,019268
Дуб т. м. за 190°С+лазур	5,14	5,05	1,750973	0,017822
Дуб т. м. за 220°С	4,43	4,31	2,708804	0,027842
Дуб т. м. за 220°С+масловіск	4,3	4,22	1,860465	0,018957
Дуб т. м. за 220°С+лазур	4,29	4,22	1,631702	0,016588

* Т. м. – термічно модифікована.

Враховуючи наведені результати з визначення частки зруйнованої деревини, наприклад сосни, за допомогою трифакторного симплекс-центрального методу планування експерименту в математичному середовищі Statistica 12, проведено статистичне оброблення результатів.

Як фактори варіювання були обрані: температура термічної модифікації, °С (фактор X_1); кількість покриття, г/м^2 (фактор X_2), зміни яких наведено в табл. 2.

Як вихідний параметр (функції відгуку) було обрано частку зруйнованого матеріалу, значення якого фіксували на зразках, що зазнавали впливу мікробактерій. Матрицю планування експерименту та її математичну реалізацію наведена в табл. 3.

У результаті моделювання отримано рівняння регресії та побудовано тернарні поверхні змін вихідного параметру залежно від змін факторів варіювання (рис. 12).

2. Фактори варіювання

Фактори	Код	Рівні варіювання			Інтервал варіювання
		-1	0	+1	
Температура термічної модифікації, °С	X_1	100	190	220	30
Кількість покриття, г/м^2	X_2	160	170	180	10

3. Матриця експерименту та її реалізація

№ з/п	Фактори, вигляд		Матриця планування		Функція відгуку	
	X_1	X_2	температура термічної модифікації, °С	кількість покриття, г/м^2	Y факт.	Y розрах.
1	1	1	220	180	0,029	0,03
2	1	-1	220	160	0,034	0,04
3	-1	1	100	180	0,2	0,20
4	-1	-1	100	160	0,16	0,16
5	1	0	220	170	0,031	0,03
6	-1	0	100	170	0,18	0,18
7	0	1	190	180	0,042	0,05
8	0	-1	190	160	0,048	0,04
9	0	0	190	170	0,044	0,04
10	0	0	190	170	0,043	0,04
11	0	0	190	170	0,045	0,04

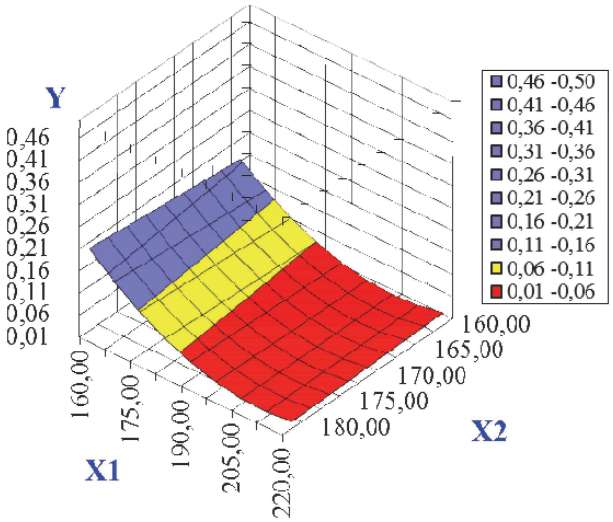


Рис. 12. Тернарні поверхні змін вихідного параметра залежно від змін факторів варіювання масловоску

Рівняння регресії:

$$Y_{розрах} = 0{,}044 - 0{,}074X_1 + 0{,}005X_2 + 0{,}061X_{11} + 0{,}0001X_{22} - 0{,}011X_1X_2.$$

Аналогічно отримуємо для деревини граба і дубу:

$$Y_{розрах} = 0{,}036 - 0{,}051X_1 + 0{,}006X_2 + 0{,}035X_{11} - 0{,}0001X_{22} + 0{,}003X_1X_2,$$

$$Y_{розрах} = 0{,}042 - 0{,}081X_1 - 0{,}002X_2 + 0{,}066X_{11} - 0{,}0004X_{22} - 0{,}006X_1X_2.$$

На основі проведеного комп'ютерного моделювання визначено найкраще значення температури модифікування та кількості захисного покриття, що забезпечує виконання поставленого завдання, а саме найменше значення частки зруйнованого матеріалу.

Висновки і перспективи. Виявлено позитивний вплив створення на поверхні деревини плівки захисного покриття на підвищення стійкості до дії біологічних руйнівників. Аналіз результатів показує, що максимальна втрата маси в разі біоруйнування необроблених зразків деревини становила від 7,6 % до 16 %, а втрата маси зразків термічно модифікованої деревини не перевищила 3 %, оброблені масловоском та лазур'ю – менше ніж 2 %. Розкрито уявлення про розмноження мікробактерій у матеріалі та їх відмирання, що відповідно показують зміни метаболічних процесів життєдіяльності мікроорганізмів.

Встановлено, що застосування поверхонь, оброблених масловоском та лазур'ю, зменшує процес біодеструкції в понад 8 разів для необроблених зразків. Таке покриття значною мірою підвищує термін експлуатації деревини. Результати досліджень також дають змогу цілеспрямовано вирішувати подальші завдання щодо створення нових засобів і способів захисту деревини відповідно до умов експлуатації деревини на різних об'єктах.

Список літератури

Akyildiz, M. H., & Kesik, H. I. (2014). Effect of heat treatment on the adhesion strength of water based wood varnishes. In L. Nunes, D. Jones, H. Callum, et al. (Eds.), *Proceedings of the Seventh European Conference on Wood Modification*. Lisbon, Portugal, March 2014.

Arminger, B., Jaxel, J., Bacher, M., Gindl-Altmutter, W., & Hansmann, C. (2020). On the drying behavior of natural oils used for solid wood finishing. *Progress in Organic Coatings*, *148*. https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105831

Candelier, K., Thévenon, M.-F., Collet, R., Gérardin, P., & Dumarçay, S. (2020). Anti-fungal and anti-termite activity of extractives compounds from thermally modified ash woods. *Maderas: Ciencia y Tecnologia*, *22* (2), 223–240. http://doi.org/10.4067/S0718-221X2020005000209

Gribanov, A., Glebova, T., & Roschina, S. (2020). Restoration of Destructive Wood in Supporting Zones of Wooden Beams. *Lecture Notes in Civil Engineering*, *70*, 157–166.

Kubovský, I., Kačíková, D., & Kačík, F. (2020). Structural changes of oak wood main components caused by thermal modification. *Polymers*, *12* (2), 485. https://doi.org/10.3390/polym12020485

Miklečić, J., Jirouˇs-Rajković, V., Pervan, S., & Grujić, S. (2010). Oils usage in finishing of thermally modified wood in outdoor applications. In D. Radovan (Ed.), *Conference: Wood is Good-Transfer of Knowledge in Practice as a Way Out of the Crisis*. University of Zagreb, Faculty of Forestry, Zagreb, Croatia.

Pavlič, M., Petrič, M., & Zigon, J. (2021). Interactions of Coating and Wood Flooring Surface System Properties. *Coatings*, *11* (1), 91. https://doi.org/10.3390/coatings11010091

Teacă, C.-A., Roşu, D., Mustaţă, F., Roşca, I., & Varganici, C.-D. (2019). Natural bio-based products for wood coating and protection against degradation: A review. *BioResources*, *14* (2), 4873–4901.

Tsapko, Yu. V. (2013). Study of modified wood resistance to microbiological destruction. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, *6/10* (66), 52–55.

Tsapko, Yu., Horbachova, O., Mazurchuk, S., & Bondarenko, O. (2021). Study of resistance of thermomodified wood to the influence of natural conditions. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, *1164*, 012080. https://doi:10.1088/1757-899X/1164/1/012080

Wang, J. Y., Stirling, R., Morris, P. I., Barnes, H. M., & Morrell, J. (2018). Durability of mass timber structures: A review of the biological risks. *Wood and Fiber Science*, *50*, 110–127.

Tsapko Yu. V., Horbachova O. Yu., Mazurchuk S. M.

ESTABLISHMENT OF THE REGULARITIES OF THE POLYMER COVER INFLUENCE ON THE WOOD BIO DESTRUCTION

The process of wood biological destruction is analyzed. It was found that the neglect of environmentally friendly means of bioprotection, leads to the destruction of wooden structures under the action of microorganisms. It is established that the study of wood protection conditions leads to the creation of new types of protective materials that reduce water absorption, as well as reduce the amount of substances that are the environment for the development of wood-destroying fungi. In this regard, a computational and experimental method for determining the proportion of destroyed material under the action of microorganisms using an antiseptic has been developed. The analysis of the results shows that the maximum weight loss in the case of biodegradation of untreated wood samples ranged from 7,6 to 16 %, and the weight loss of thermally modified wood samples did not exceed 3 %, antiseptic-hydrophobicizer – was less than 2 %. It was found that the protection when treated with thermally modified wood with oil-wax and azure exceeds (compared to untreated) more than 4 times in terms of biodegradation, and treatment with antiseptic-water repellent for untreated oil-wax and azure – more than 8 times. It should be noted that the presence of oil-wax and azure leads to blockage of the wood surface from the penetration of moisture or microorganisms. Therefore, the intensity of wood-destroying fungus development on the surface of various samples are differed. Obviously, such a mechanism of the protective coating influence is the factor regulating the process, which preserves the integrity of the object. On the experimental data basis and by modeling the equations, the microorganisms population dynamics in the volume of material and the function of increasing the number of dead organisms are derived. Thus, a polymer shell was created on the surface of the sample, which significantly reduced the penetration of microorganisms into the wood, and the weight loss of wood during biodegradation did not exceed 2,5 %. Additional application of protective substances on the surface increases the protection level of untreated pine wood by 72 %, thermomodified at 190 °C – 25 %, at 220 °C – by 37 %. Similar results for hornbeam wood – 60; 37 and 28 %, for oak – 50; 37 and 37 % respectively.

Keywords: *wood, efficiency of thermal modification, antiseptics, protective coatings, biodegradation, wood stability.*

Отримано: 2021-10-22