

Т.А. ПОПОВИЧ

Херсонський державний університет
ORCID: 0000-0001-7449-9949

Г.В. МІЩЕНКО

Херсонський національний технічний університет
ORCID: 0000-0002-0336-1026

С.П. БЕСЧАСНИЙ

Херсонський державний університет
ORCID: 0000-0002-7423-4112

АНТИМІКРОБНІ ВЛАСТИВОСТІ ЛІГНІНУ ЯК ПРИРОДНОГО БІОЦИДУ ДЛЯ ЗАХИСТУ ТЕКСТИЛЮ

Антибактеріальна функціоналізація є однією з важливих галузей досліджень в текстильній промисловості, але такі біополімери, як лігнін і пектин, що мають гарну біосумісність, антиоксидантні та антимікробні властивості, на вітчизняному ринку застосовуються в основному в будівельній та харчовій промисловості. Було досліджено антимікробну активність натрій лігносульфонату, яблучного пектину та їх суміші до бактерій грам-позитивних (*Staphylococcus aureus*) і грам-негативних штамів (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*). З'ясовано, що лігнін в порівнянні з пектином проявляє більшу антибактеріальну активність і найбільш ефективний проти бактерій *Staphylococcus aureus*. Посилення в 2-4 рази антибактеріального ефекту по відношенню до всіх мікроорганізмів спостерігалось при сумісному застосуванні лігніну і пектину, як синергетичної суміші. Дана робота може бути корисна при створенні антимікробних композицій для захисту текстильних матеріалів.

Ключові слова: антимікробні агенти, антимікробний текстиль, лігнін, пектин.

Т.А. ПОПОВИЧ

Kherson State University
ORCID: 0000-0001-7449-9949

A. V. MISHCHENKO

Kherson National Technical University
ORCID: 0000-0002-0336-1026

S.P. BESCHASNYI

Kherson State University
ORCID: 0000-0002-7423-4112

ANTIMICROBIAL PROPERTIES OF LIGNINE AS A NATURAL BIOCIDES FOR TEXTILE PROTECTION

The functionalization of antibacterial drugs is one of the important areas of research in the textile industry. It uses traditional antimicrobial agents of synthetic or natural origin, and generates new biopolymers with useful properties. Some of them, such as lignin and pectin, have good biocompatibility, antioxidant and antimicrobial properties, but the domestic market uses them mainly in the construction and food industries, respectively.

The antimicrobial activity of sodium lignosulfonate, apple pectin and their mixture against gram-positive bacteria (*Staphylococcus aureus*) and gram-negative strains (*Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*) was studied. Experimental results have shown that lignin exhibits slightly higher antibacterial activity compared to pectin and is more effective against *Staphylococcus aureus* in terms of minimal bactericidal and minimal inhibitory concentrations. Determination of cytotoxicity of sodium lignosulfonate by MTT showed the non-toxicity of this biocide for human cells.

It was found that the antimicrobial behavior of lignosulfonates, pectins and their mixtures differs in relation to gram-positive and gram-negative strains of bacteria. It appeared that the most vulnerable to bactericides are gram-positive strains of *Staphylococcus aureus* due to the possible absence of double-membrane wall cells.

In addition, the simultaneous use of lignin and pectin as a synergistic mixture showed an increase in antibacterial action against all microorganisms by 2-4 times.

The antimicrobial effect of the studied biocides was compared to the traditional antimicrobial drug silver nitrate, which is widely used in various industries, including textile production. It was found that lignin and pectin in amounts of 1-5 mg/cm³ have the same antimicrobial effect for gram-positive strains and 10-20 mg/cm³ - for gram-negative bacteria, as a solution of AgNO₃ with a concentration of 0.2 mg/cm³. Higher concentrations of lignin and pectin can be offset by significantly lower prices compared to argentum salts, as well as greater environmental and medical safety for human health. In addition, lignin is potentially available in large quantities as a by-product from the pulp industry and lignocellulosic bioprocessing plants.

This piece of work may be useful in future when creating antimicrobial compositions for textiles.

Keywords: antimicrobials, antimicrobial textiles, lignin, pectin.

Постановка проблеми

В сучасному світі процес глобалізації спричинив стрімке розповсюдження різних видів мікроорганізмів і виникнення багатьох епідемій і пандемій, таких як холера, віспа, жовта лихоманка, іспанський грип і коронавірус. Присутність патогенних мікроорганізмів на поверхні текстильного матеріалу (табл. 1) може привести до серйозних проблем зі здоров'ям і навколишнім середовищем [1].

Оскільки одяг знаходиться в безпосередньому контакті з тілом людини, то розробка антимікробної текстильної продукції вкрай необхідна і актуальна. Саме тому, в період останніх декількох десятиліть, антибактеріальна функціоналізація є однією з важливих галузей досліджень у текстильній промисловості [2].

Мікроорганізми виявлені на текстилі

Можливе походження	Мікроорганізми	Можливе походження	Мікроорганізми
Екзогенне	Acinetobacter	Людське	Candida
	Brevundimonas		Citrobacter
	Micrococcus		Corynebacterium
	Pseudomonas		Propionbacterium
	Enterococcus		Staphylococcus

Різні антимікробні текстильні матеріали розробляються з використанням безлічі активних хімічних сполук, серед яких синтетичні протимікробні агенти, такі як триклозан, метали та їх солі, феноли, сполуки четвертичного амонію і металорганічні сполуки посідають значне місце [3-5]. Хоча синтетичні протимікробні препарати ефективно пригнічують ріст бактерій, більшість з них токсичні, можуть шкідливо діяти на здоров'я людини і є забруднювачами оточуючого середовища [6].

Іншим напрямом в забезпеченні на текстилі антимікробного ефекту є створення нанообробної тканини шляхом, наприклад, додавання вуглецевих нанотрубок і наночастинок цинку до волокна в процесі прядіння з розплаву, внесення наночастинок полімолочної кислоти з прополісом в прядильний розчин, що обумовлює антимікробну активність проти *S. aureus*, *S. epidermidis*, *Proteus mirabilis* і *E. coli*, створення на поверхні тканини захисного антимікробного шару з наночастинок Ag, Zn, Cu, їх солей або оксидів Ti, Fe [7-9]. І хоча дані матеріали мають величезний потенціал для широкого кола застосувань, їх несприятливий вплив на живі клітини викликає серйозні побоювання після їх використання в сфері обслуговування людей і в споживчому сегменті. Це пов'язано із занадто малими розмірами наночастинок, які можуть легко проникати через стінки живих клітин та чинити шкідливий вплив на здоров'я людини і на навколишнє середовище. Поряд з важливістю таких різноманітних текстильних наноматеріалів і можливостями їх застосування, все ж існує інформаційна діра між інноваційним прогресом в нанотехнологіях і нанобезпекою.

Сучасні дослідження доводять, що в якості екологічних протимікробних агентів безпечних для здоров'я людини, можуть бути застосовані натуральні продукти рослинного походження з активними протимікробними інгредієнтами, що містяться в екстрактах деяких рослин (чайне дерево, алое вера, гвоздикове масло, шкіра гранату, куркума, евкаліптова олія) [9, 10] та природні біополімери, такі як, хітозан, хітин, пектин, лігнін тощо [11-13]. Останні серед зазначених, поряд з антимікробним ефектом проявляють також антиоксидантні, хелатуєтворючі властивості і мають також певні переваги над іншими біоцидами, а саме, поновлювальне походження, біосумісність, низьку собівартість тощо.

Екологічна і економічна привабливість біополімерів на світовому ринку зумовлює прогнозоване збільшення їх використання до кінця 2021 року майже на 17% в порівнянні з прогнозованим періодом 2017-2021 років. Західна Європа займає найбільший сегмент цього ринку, складаючи 41,5% від світового, в той час, як інші регіони також швидко збільшують свою частку в даному секторі. Більш того, відносно низька вартість біополімерів та відновлювальна природа роблять цей клас матеріалів особливо привабливим для таких дороговартісних галузей виробництва, як харчова, біомедична, фармацевтична.

Аналіз наукових публікацій показує, що, наприклад, такий біополімер, як лігнін, в основному знайшов використання, як наповнювач і добавка в будівельній галузі, диспергатор в нафтопереробній, компонент в полімерних композиційних матеріалах [6, 14]. Щодо застосування лігніну для розробки на текстилі антимікробного захисту, то на сьогоднішній день в Україні відсутні дані дослідження, і в цій якості він згадується лише в закордонних публікаціях практично завжди в комплексі з наночастинами металів (наносрібло) або зі сполуками металів [15-17]. Інший біополімер, як продукт переробки сільськогосподарської продукції – пектин зі своїми унікальними антиоксидантними, радіопротекторними і антимікробними властивостями знайшов застосування в харчовій, косметичній та фармацевтичній промисловості, в основному, як загусник та компонент плівок для харчових продуктів [18]. Таким чином, у вітчизняних наукових публікаціях на сьогоднішній день відсутні дослідження щодо можливості застосування таких екологічних біоцидів, як лігнін і пектин, для антимікробної обробки текстильних матеріалів.

У цій статті наведено результати дослідження з визначення можливості використання даних біополімерів для надання антимікробних властивостей текстилю з перспективою створення екологічно чистих продуктів медичного текстилю.

Аналіз останніх джерел

Число наукових публікацій за темою лігнін за останні 5 років зросло на 42%. На початок 2021 р. їх у наукометричній базі Web of Science налічується близько 16 000, більшість з яких зосереджені на крафт-лігніні та лігносульфонатах, як найбільших за кількістю промислового виробництва та найбільш комерціалізованих відповідно. Стосовно лігніну, як антибактеріального засобу, то дані дослідження висвітлюються в публікаціях лише останніх кількох років в таких напрямках, як тканинна інженерія, біомедицина, доставка ліків, фармацевтичний лігнін [19]. Переважна більшість закордонних запатентованих технологій стосується антибактеріальних властивостей лігноцелюлозних матеріалів, наприклад, деревно-полімерних композитних матеріалів та способів їх одержання [16]. Інформаційний пошук стосовно застосування лігніну, як антимікробного агенту, проведений на базі Спеціальної інформаційної системи

Україні (вересень 2021 р.) не виявив інформації за заявленою темою. В даній базі налічується лише два зареєстровані патенти на корисну модель, в яких зустрічається лігнін, але тільки як сировина для одержання сорбентів [20, 21].

Питання створення антимікробного текстилю в нашій країні на сьогоднішній час вирішується декількома шляхами, серед яких, найбільш поширений – це застосування наночастинок металів або їх солей, як окремо, так і в комплексі з іншими антимікробними фармацевтичними або рослинними препаратами [22-30]. Питання стосовно досліджень антимікробних властивостей лігніну для надання текстилю антимікробного ефекту залишається відкритим у вітчизняній науковій спільноті. Даний біополімер викликає зацікавленість як екологічно безпечний для людини біоцид з перспективою застосування його в текстильній галузі.

Лігнін є другим за поширеністю біополімером після целюлози і найбільш поширеним ароматичним біополімером у природі. Біосинтез лігніну повністю не досліджений, але встановлено, що його попередником, як і ряду інших ароматичних сполук в рослинах, є шкімова кислота, яка приймає участь в наступних основних стадіях біосинтезу: шкімова → кислота → феніланін → корична кислота → ферулонова кислота → коніферіловий спирт → лігнін. Лігнін належить до родини полімерів з розгалуженими макромолекулами фенілпропанового типу із різноманітними функціональними групами – карбонільними, гідроксильними (зокрема фенольними), а також метоксильними (рис. 1).

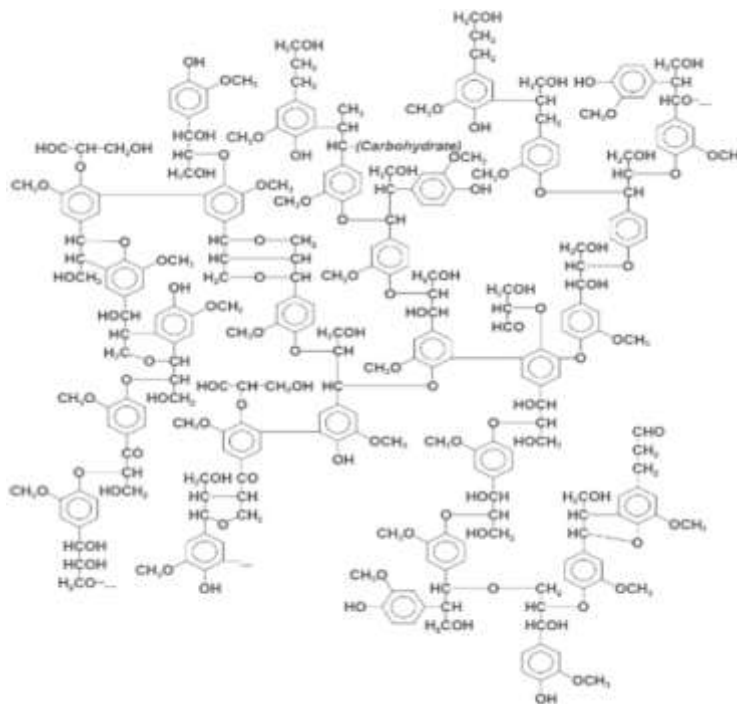


Рис. 1. Структурна формула макромолекули лігніну

Фенольні компоненти лігніну та гідроксильні групи в ароматичному кільці відповідають за його токсичність до мікроорганізмів, а зростання їх кількості посилює антимікробний ефект. Було також виявлено, що кількість та розташування подвійних зв'язків в бічному ланцюзі відіграють важливу роль в антибактеріальній активності сполуки [31].

Лігнін потенційно доступний у великих кількостях як побічний продукт целюлозно-паперової промисловості і лігноцелюлозних біопереробних заводів. Вміст лігніну в лігноцелюлозній біомасі коливається в межах 15 – 40 % залежно від виду рослин (листяних порід, м'яких порід дерев або однорічних), умов росту та їх віку. Так, найбільша кількість лігніну в деревині хвойних (до 35%) і листяних (20 – 21 %) порід. Він міститься також у волокнистих відходах переробки рослинної їжі, цукрового очерету, кокосової шкаралупи, лущиння насіння сої, рису, вівса, волокнах льону і коноплі тощо.

Лігнін з рослинної сировини може бути виділений двома способами: обробкою гідролізуючими агентами або розчиненням самого лігніну. В процесі виробництва технічних лігнінів у 2-3 рази зменшується їх молекулярна маса і зростає хімічна активність. Серед виділених лігнінів розрізняють препарати нерозчинних і розчинних лігнінів. Нерозчинні лігніни зберігають сітчасту структуру, а розчинні, що являють собою фрагменти сітки, мають структуру з високим ступенем розгалуженості і неоднорідні за молекулярною масою. Щоб розширити область застосування різних типів технічного лігніну, були зроблені інтенсивні зусилля для його використання в якості клею, сорбенту, вуглецевого волокна, смоли, емульгуючого засобу для виробництва асфальтів, диспергуючого агенту для цементу, бетонних сумішей, диспергатору для текстильних барвників, носія біологічно активного агенту і добавки до корму для тварин [6, 32, 33]. Розчинні лігніни, тобто лігносульфонати, практично не токсичні і не викликають подразнення, не володіють мутагенними або генотоксичними властивостями, що збільшує можливість їх практичного

застосування. Через це найбільший світовий ринок лігніну, в основному, займається його виробництвом за допомогою лігносульфонатного процесу. Ключовими країнами – виробниками продуктів на основі лігносульфонатів є США, Західна Європа, Китай, Центральна та Східна Європа, а також провідні компанії – Borregaard Lignotech, Changzhou Shanfeng Chemical Industry Co. Ltd., компанія LCC в Азії тощо [32, 34, 36].

Фактори, що впливають на антимікробні властивості лігніну.

Лігнін, як природна поліфенольна молекула, володіє сильною антиоксидантною та антимікробною активністю, але її інгібуюча здатність залежить від ряду факторів: *хімічної будови макромолекул; походження рослини; способу екстракції; подальшої обробки*. В свою чергу інгібуючий ефект для мікроорганізмів варіює залежно від двох показників: *типу лігніну і виду мікробних штамів*.

Встановлено, що лігнін різного походження проявляє індивідуальний антибактеріальний ефект. Наприклад, лігнін із хвойної деревини, акації, кукурудзи та стебла бавовни володіє антимікробною активністю проти грампозитивного штаму *Staphylococcus aureus*, а лігнін тополі, акації, цукрової тростини, кукурудзи та бамбука інгібує мікроби штамів *Escherichia coli*; лігнін евкالیпта та ялини має антимікробну властивість проти *A. niger*, *E. coli*, *S. aureus*, *Pr. microbilis*, *Pr. oulgaris*, *P. Aeruginosa*, а обрізки деревини яблуні володіють антимікробними властивостями проти *A. niger* та *Saceh cerevisiae* [34, 35, 37]. Тому відповідно до типу лігніну і мікробних штамів застосування лігніну можливо, як агенту для доставки ліків, харчового антиоксиданту, натурального антибактеріального агенту, протимікробної добавки у харчовій, текстильній та хімічній промисловості [6].

Іншим важливим фактором впливу на антимікробні властивості лігніну є його *форма* – макромолекули і наночастинки. Останні володіють більшим антибактеріальним ефектом, що пов'язано зі значною площею поверхні частинок та більшою адсорбцією активного Оксигену в структурі поліфенолу, а малий розмір наночастинок лігніну надає можливість проникати всередину бактеріальних клітин і утворювати монофенольні структури [38]. На сьогоднішній день лігнін як антимікробний агент використовується, як в формі полімерної макромолекулярної речовини, так і в формі наночастинок в комплексі з іншими речовинами [6].

Оскільки лігнін зазнає значні структурні зміни в результаті хімічної та фізичної обробки, *методи одержання лігніну* також мають вплив на антимікробну активність лігніну. Так дослідження антимікробних властивостей лігніну вилученого за допомогою *крафт-процесу* показали, що для полімерного лігніну покритого частинками срібла зона інгібування становила 10, 12 і 80% для *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli*, *Aspergillus niger* відповідно. Антимікробна дія лігніну з кукурудзяних качанів екстрагованого за допомогою *органорозчинного процесу* була ефективною для досліджуваних мікробів групи *Escherichia coli* та *Listeria monocytogenes*. Нановолокна натрій *лігносульфонатів* показали протимікробну активність для *Staphylococcus aureus* на 99,9%, в той час як для *Escherichia coli* інгібуюча дія не спостерігалась. Пригнічуючий вплив на 63% для *Escherichia coli* проявили наночастинки *лігносульфонату* у випадку, коли вони використовувалися як зовнішній шар хітозану і на 95 % була загальмованість, коли лігносульфонати використовували як внутрішній шар хітозану. Натрій *лігносульфонат* покритий наночастинками ZnO показав сильнішу антибактеріальну активність проти *Bacillus subtilis*, ніж проти *Escherichia coli* [39]. Крім того, антибактеріальні властивості лігніну тісно пов'язані з дозою (концентрацією) цієї речовини для кожного окремого субстрату.

Оскільки лігнін зазнає значні структурні зміни в результаті хімічної та фізичної обробки, всі технічні лігніни унікальні з точки зору хімічної структури, молекулярної маси, полідисперсності і профілю домішок. Відповідно до цього, для оцінки інгібуючої здатності лігніну важливо враховувати тип лігніну, тобто його хімічну будову і спосіб одержання, а також вид мікробних штамів.

Тому в даній роботі необхідно було дослідити можливість антимікробних властивостей водорозчинного лігносульфонату з встановленням оптимальних робочих концентрацій та можливість посилення протимікробної дії за рахунок добавки – пектину, як продукту агропромислового комплексу.

Метою роботи є: попереднє дослідження на предмет можливостей надання текстилю антимікробних властивостей за допомогою лігніну і пектину шляхом встановлення оптимальних робочих концентрацій даних речовин та їх оптимальних сумісних співвідношень, які володіють антимікробним ефектом.

Виклад основного матеріалу

Матеріали та методи дослідження.

1. *Антимікробна речовина №1.* В якості антимікробної речовини використовували натрій лігносульфонат із вітчизняної сировини (торгова марка «Рубефіл ВФК»), який за фізико-хімічними показниками відповідає зарубіжному аналогу Reax 83A (фірма Vestwaco Co, США). Дана речовина володіє цінними властивостями (доступність, дешевизна, низька токсичність) і в теперішній час викликає практичний інтерес. Так в роботі [40] вивчено вплив співвідношення полімерних фракцій в натрій лігносульфонатах і ступеню сульфування лігніну на його стабілізуючу спроможність і розроблено універсальний ПАР на основі сульфатного лігніну (торгова марка «Рубефіл ВФК»).

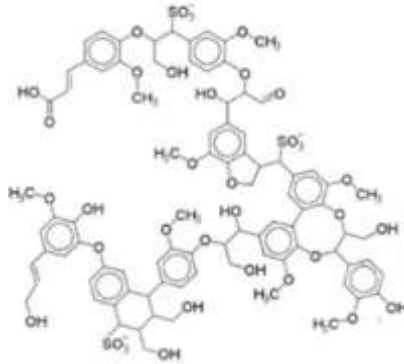


Рис. 2. Структурна формула макромолекули лігносульфонату

2. *Антимікробна речовина №2*. Другою речовиною, яка за дослідженнями [41, 42] спричиняє інгібуючу дію на мікроорганізми групи *Staphylococcus aureus*, *Escherichia coli* використовували пектин яблучний SWEJ-1 TM Pektowin.

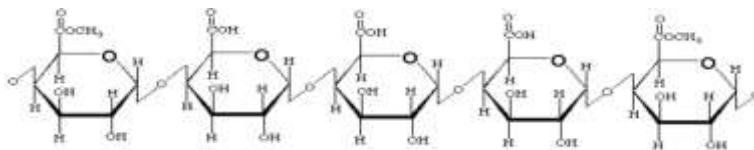


Рис. 3. Структурна формула макромолекули пектину

3. *Тестові організми*. Мікроорганізми, які використовували в цьому дослідженні, належать до групи патогенних видів, які зазвичай асоційовані зі шкірним покривом і слизовою оболонкою, здатними викликати опортуністичні інфекції: грампозитивні прокаріоти *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538P) та грамнегативні штами *Escherichia coli* (ATCC 25922) і *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 9027).

4. *Цитотоксичність* визначали за допомогою МТТ тесту на культурі клітин людини НСТ116 (ATCC® CCL-247™) [43].

5. *Антимікробні властивості* лігніну і пектину визначали диско-дифузійним методом (метод дифузії в ангар із застосуванням паперових дисків) та методом розведення у рідкому поживному середовищі [44]. Статистичну обробку результатів експерименту проводили з використанням критерію Стьюдента ($p \leq 0,05$).

Результати та їх обговорення.

При визначенні тестових робочих концентрацій лігніну і пектину враховували фактор, який впливає на антимікробні властивості речовини, а саме – форму лігніну і пектину – макромолекули чи наночастинки. В роботі використовували полімерні сполуки лігніну і пектину, тому тестові концентрації цих речовин та їх суміші складали 1 – 30 мг/см³ і були вищими в порівнянні з концентрацією наночастинок лігніну (0,25 – 0,5 мг/см³), які зазвичай використовують для антимікробного ефекту [6, 38].

Цитотоксичний результат.

Повідомлялось, що лігнін, в тому числі і лігносульфонати, нетоксичні для людини [45], а кальцій лігносульфонат з $Mg = 40000-65000$, за оцінками ВООЗ, належить до харчової добавки з встановленим добовим споживанням 20 мг/кг маси тіла на добу [46]. Однак, технічні форми лігніну унікальні з точки зору хімічної структури, молекулярної маси, полідисперсності, профілю домішок і відповідно своїх властивостей. Тому цитотоксичність натрій лігносульфонату, який застосовували в подальших дослідженнях, визначали опосередковано за допомогою МТТ тесту наступним чином: культуру клітин людини НСТ116 (ATCC® CCL-247™) культивували у поживному середовищі DMEM (НПП ПанЕко) з додаванням 10 % телячої ембріональної сироватки (HyClone®, Thermo Scientific), 2мМ L-глутаміну (НПП ПанЕко), 1 % гентаміцину (ФК «Дарниця») у якості антибіотику. Клітини засіювали до 96-лункового планшета в кількості $1 \cdot 10^4$ клітин/200 мкл та культивували при 37°C в атмосфері CO₂ (5 %). Після 24 годин інкубування до культур клітин було додано досліджувані сполуки у концентраціях (1-30 мг/см³) для подальшого культивування в тих же умовах протягом 48 годин. Для кожної концентрації дослідження були проведені у трьох повторях. Цитотоксичність визначали за допомогою МТТ-тесту. Після інкубування до кожної лунки було додано по 20 мкл МТТ (броміду 3-(4,5-диметилтиазол-2-ил)-2,5-дифенілтетразолю) (5 мг/см³) (Sigma-Aldrich) та додатково інкубували протягом 2-х годин. За допомогою планшетного аналізатора визначали оптичну щільність при 520 нм. Результати тесту показали відсутність цитотоксичності лігносульфонату до клітин людини.

Антибактеріальний результат.

В диско-дифузійному методі для дослідження антибактеріальних властивостей речовин кожену з чашок Петрі з м'ясо-пептонним агаром (МПА) засіювали штами бактерій методом газону. Суспензію мікроорганізмів у 0,9% NaCl рівномірно наносили на поверхню МПА та розміщували для «підсушування» у

термостат за температури 37 °С. Попередньо готували паперові диски діаметром 5 мм з фільтрувального паперу та просочували їх досліджуваним розчином. Після цього на підсушені посіви на МПА поміщали підготовлені диски з подальшим культивуванням у термостаті. Через 24 години вимірювали затримку росту бактерій навколо дисків.

За оцінку антимікробної активності досліджуваних зразків був взятий ступінь пригнічення росту мікроорганізмів: зона інгібування до 10 мм – відсутня біоактивність; 11-15 мм – слабка активність; 15-25 мм – виражена активність; > 25 мм – висока антимікробна активність [47].

Дифузійним методом встановлено, що біоактивність розчинів лігніну і пектину відрізняється між собою і залежить від природи антимікробного препарату, його концентрації та виду прокаріотів (табл. 2).

Таблиця 2

Біоактивність і значення зон інгібування росту (мм) досліджуваних зразків

Антимікробна речовина	Біоактивність	Концентрація антимікробної речовини, мг/см ³					
		1	2	5	10	20	30
Лігнін	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538P)						
	Відсутня	–	–	–	–	9,8±0,8	6,7±0,6
	Слабка акт.	–	–	13,8±0,8	11,7±0,7	–	–
	Виражена акт.	17,7±1,0	15,1±0,8	–	–	–	–
	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922)						
	Відсутня	10,7±1,1	7,3±0,8	–	–	–	–
	Слабка акт.	–	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 9027)						
	Відсутня	10,4±1,0	6,4±0,6	–	–	–	–
	Слабка акт.	–	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
Пектин	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538P)						
	Відсутня	–	–	10,8±0,9	8,6±0,9	6,6±0,8	4,8±0,6
	Слабка акт.	14,3±1,1	12,6±0,8	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922)						
	Відсутня	9,2±1,0	7,0±0,8	–	–	–	–
	Слабка акт.	–	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 9027)						
	Відсутня	9,8±1,1	6,4±0,9	–	–	–	–
	Слабка акт.	–	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
Лігнін + Пектин	<i>Staphylococcus aureus</i> (ATCC 6538P)						
	Відсутня	–	–	8,5±0,6	6,8±0,6	5,6±0,5	4,8±0,5
	Слабка акт.	–	11,3±0,9	–	–	–	–
	Виражена акт.	18,5±1,1	–	–	–	–	–
	<i>Escherichia coli</i> (ATCC 25922)						
	Відсутня	–	6,3±0,9	–	–	–	–
	Слабка акт.	11,2±0,8	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–
	<i>Pseudomonas aeruginosa</i> (ATCC 9027)						
	Відсутня	–	6,8±0,7	–	–	–	–
	Слабка акт.	12,6±1,1	–	–	–	–	–
	Виражена акт.	–	–	–	–	–	–

Як свідчать дані таблиці 2, спостерігається зростання антимікробного ефекту досліджуваних речовин для грампозитивних штамів, що можливо пояснюється наявністю перешкоди з додаткового бар'єру подвійної мембрани у грамнегативних прокаріотів [38], а на більш виражену антимікробну активність лігніну впливають фенольні радикали в структурі даного біополімеру. Загальною закономірністю в дослідженні виявилось зростання інгібуючої здатності розчинів при сумісній присутності лігніну і пектину в якості синергетичної пари, але чітко прослідковується зниження біоактивності хімічних речовин при зростанні їх концентрацій у розчині. Так послаблення активності досліджуваних речовин по відношенню до грампозитивних штамів мікроорганізмів мають розчини лігніну і пектину та їх суміші вже починаючи з концентрацій вище 5-10 мг/см³. Для грамнегативних прокаріотів межі інгібуючої концентрації біоцидів звужуються до більш розбавленого розчину з вмістом компонентів 1-2 мг/см³, що може бути пояснено сповільненням процесу дифузії високомолекулярних біополімерних речовин при зростанні їх концентрацій

у розчині. Даний факт узгоджується з літературними даними стосовно дифузійних методів оцінки антибактеріальних властивостей речовин, які в деяких випадках є непридатними для аналізу складних за складом композицій і відрізняються за молекулярною масою препаратів. В окремих дослідженнях диско-дифузійний метод підходить тільки в якості попереднього скрінінгового тесту перед кількісними визначеннями методами розведень [48].

Тому на наступному етапі роботи антимікробні властивості лігніну і пектину досліджувалися методом серійних розведень. Контролем слугували пробірки, одна з яких містила м'ясо-пептонний бульон (МПБ) без додавання досліджуваного препарату та мікроорганізмів (так званий, контроль стерильності середовища), інша – з мікроорганізмами (позитивний контроль). Активність досліджуваних речовин досліджували із використанням зазначених вище тест культур: *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538P), *Escherichia coli* (ATCC 25922) і *Pseudomonas aeruginosa* (ATCC 9027). Готували суспензію з оптичною щільністю 0,5 за McFarland ($1,5 \cdot 10^6$ КУО/см³) та по 0,5 см³ інокулюма вносили до кожної пробірки із МПБ та відповідною концентрацією досліджуваних сполук. Посіви інкубували протягом доби за температури 37⁰С. По завершенні часу інкубування досліджували наявність чи відсутність росту відповідних бактеріальних штамів шляхом приготування мазків суспензії з пробірок з подальшим фарбуванням та дослідженням за допомогою імерсійної системи мікроскопу Micromed XS-5520. Досліди проводили в 3-х повторях із кожною концентрацією препарату і кожною культурою мікроорганізмів із метою отримання достовірних результатів. Антимікробну активність досліджуваних сполук розраховували за показниками мінімальної бактерицидної концентрації (МБК) та мінімальної інгібуючої концентрації (МІК) (табл. 3).

Як свідчать дані таблиці 3, антимікробна активність лігніну і пектину відрізняється для різних видів мікроорганізмів. Так, найменші значення мінімальної бактерицидної концентрації досліджуваних речовин, яка викликає загибель мікроорганізмів через 24 год., спостерігаються для грампозитивного штаму *Staphylococcus aureus* (4,00-7,66 мг/см³), а для групи грамнегативних бактерій *Escherichia coli* та *Pseudomonas aeruginosa* МБК лігніну та пектину зростає відповідно в 3 рази (16,66-23,33 мг/см³). Така різниця в мінімальній бактерицидній концентрації для різних видів мікроорганізмів може бути пояснена відсутністю другої клітинної стінки у грампозитивних бактерій [38].

Таблиця 3

Антимікробна активність лігніну, пектину та їх суміші

Мікроорганізми	Антимікробна речовина		
	лігнін	пектин	лігнін + пектин
МБК, мг/см ³			
<i>Staphylococcus aureus</i>	4,00±2,48	7,66±1,36	1,33±0,65
<i>Escherichia coli</i>	16,66±2,41	23,33±3,41	8,33±1,54
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	16,66±2,41	13,33±2,41	8,33±1,54
МІК, мг/см ³			
<i>Staphylococcus aureus</i>	0,67±0,19	1,33±0,65	1,33±0,65
<i>Escherichia coli</i>	1,33±0,35	1,33±0,35	1,33±0,65
<i>Pseudomonas aeruginosa</i>	1,67±0,23	1,67±0,23	1,67±0,23

Також в роботі встановлено, що антимікробну активність біополімерів для бактерій *Escherichia coli* та *Pseudomonas aeruginosa* можна підсилити сумісною присутністю «лігнін+пектин», що вказує на біосумісність даних полімерів, а це є одним із важливих критеріїв оцінки можливостей будь яких препаратів, що застосовуються в біомедичній галузі. З'ясовано, що антимікробний ефект суміші «лігнін+пектин» для всіх видів бактерій посилюється практично в 2 рази і проявляється за концентрації суміші «лігнін+пектин» 1 мг/см³ для *Staphylococcus aureus* і за концентрації 10 мг/см³ для *Escherichia coli* і *Pseudomonas aeruginosa*. Даний ефект може бути пов'язаний із синергетичною дією одночасно двох антимікробних препаратів.

Механізм даної дії не з'ясований, але можна зробити наступні припущення. Як відомо, антибактеріальний ефект лігніну пов'язують з фенольними фрагментами біополімеру, а також хімічними групами в положенні α , β у бічного ланцюга та ортометокси групи 4-гідроксилфенілу [31]. Зокрема, подвійний зв'язок у положенні $C\alpha = C\beta$ бічного ланцюга та метильні групи в γ -положенні є позитивним фактором інгібуючого ефекту. За такої будови макромолекули лігніну взаємодіють з мембранами бактеріальних клітин, викликають виснаження і підвищення проникності клітинних стінок, дестабілізацію шару пептидоглікану з подальшим витіком внутрішньоклітинного вмісту, що призводить до лізису бактеріальних клітин.

В свою чергу, наявність в молекулах лігніну Оксигену в групах –ОН, =СО, –СООН у бічному ланцюгу може знижувати інгібуючі властивості біоциду [31]. Можна припустити, що синергетичний ефект підсилення антимікробної активності лігніну в присутності пектину, пов'язаний по-перше, з додатковим блокуванням пектином інгібуючих груп у лігніні, а по друге, у можливості більш міцного закріплення лігносульфонату на поверхні бактерій за рахунок адсорбції молекул пектину, що містить велику кількість активних карбоксильних груп. Так як для розчину пектину рН=4,35, то ланцюжки пектину повністю аніонні, тому між макромолекулами пектину діють сили електростатичного відштовхування, що дає змогу

проникати між ними лігніну, як сполуки з ароматичною структурою, високим ступенем поперечних зв'язків і досить значною реакційною здатністю завдяки своїм функціональним групам.

Кількісний аналіз антибактеріальної активності біоцидів за мінімальною інгібуючою концентрацією (МІК), необхідною для затримання росту мікробів після відповідного процесу інкубації показав, що дана концентрація для грампозитивних – *Staphylococcus aureus* та грамнегативних бактерій групи *Escherichia coli* і *Pseudomonas aeruginosa* менша в порівнянні з МБК в 1,5 - 2 рази відповідно.

Антимікробну дію досліджуваних біоцидів в роботі було порівняно з традиційним антимікробним препаратом аргентум нітратом, який широко застосовується в різних галузях промисловості, в тому числі і в текстильному виробництві, і з'ясовано, що лігнін і пектин в концентраціях 1-5 мг/см³ володіють таким же антимікробним ефектом для грампозитивних штамів і 10-20 мг/см³ – для грамнегативних бактерій, як і розчин AgNO₃ з концентрацією 0,2 мг/см³. Більш висока концентрація лігніну і пектину може бути компенсована їх значно нижчими цінами в порівнянні із солями Аргентуму, а також більшою екологічною і медичною безпекою для здоров'я людини. Крім того, лігнін є потенційно доступним у великих кількостях як побічний продукт целюлозної промисловості та лігноцелюлозних біопереробних заводів.

Таким чином, всі досліджувані речовини зберігали високу антимікробну активність, що є підставою для їх подальшого всебічного вивчення і використання.

Висновки

1. На основі аналізу останніх досліджень і публікацій, а також досліджень, виконаних авторами статті, визначено, що лігнін, завдяки своїм унікальним властивостям, може бути надзвичайно привабливою сполукою не тільки для фармацевтичних препаратів та біомедичних програм, а також як екологічний біоцид для створення антимікробного текстилю. Методом МТТ тесту показано нетоксичність натрій лігносульфонату як біоциду до клітин людини.

2. Проведено порівняльну оцінку протимікробної ефективності лігніну і пектину та показано, що лігнін володіє сильнішими антимікробними властивостями проти грампозитивних (*Staphylococcus aureus*) та грамнегативних (*Escherichia coli* і *Pseudomonas aeruginosa*) штамів бактерій через наявність в складі макромолекул великої кількості поліфенольних груп.

3. Встановлено, що антимікробна поведінка лігносульфонату, пектину та їх суміші різна по відношенню до грампозитивних та грамнегативних штамів бактерій, серед яких найбільш вразливі до дії бактерицидів є грампозитивні штами *Staphylococcus aureus* через можливу відсутність в будові їх клітин подвійної мембранної стінки.

4. Посилення антимікробного ефекту досліджуваних препаратів відбувається шляхом сумісної присутності в розчині двох речовин – лігніну і пектину, комбінація яких діє як синергетична група, що зменшує мінімальну бактерицидну концентрацію біоцидів для грамнегативних і грампозитивних бактерій в середньому в 2 і 4 рази відповідно.

5. Досліджувані речовини лігносульфонат і пектин можуть бути використані в якості антимікробних агентів при створенні антимікробних композицій для текстильних матеріалів. Тому подальші дослідження могли б висвітлити потенціал даних біополімерів та стимулювати розробки антимікробного текстилю, потреба в якому в Україні в останній час значно зросла.

Література

1. Bockmühl D. P. Laundry and textile hygiene in healthcare and beyond / D. P. Bockmühl, J. Schages, L. Rehberg // *Microbial Cell*. – 2019. – V. 6 (7). – P. 299–306. – URL : [10.15698/mic2019.07.682](https://doi.org/10.15698/mic2019.07.682)
2. Кричевский Г. Е. Прошлое, настоящее и будущее мирового текстиля. Революционное и эволюционное развитие / Г. Е. Кричевский // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых «Сегодня и завтра медицинского, технического и защитного текстиля. Роль традиционных и высоких технологий» («Медтекстиль – 2012»), г. Москва, 8-9 октября 2012 г. – Иваново : ОАО «Издательство «Иваново», 2012 – С. 5.
3. Babu K. M. Bioactive antimicrobial agents for finishing of textiles for health care products / K. M. Babu, K. V. Ravindra // *The Journal of The Textile Institute*. – 2015. – V. 106 (7). – P. 706–717. – URL : <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.936670>
4. Orhan M. Triclosan applications for biocidal functionalization of polyester and cotton surfaces / M. Orhan // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. – 2020. – V. 15. – P. 1–11. – URL : <https://doi.org/10.1177/1558925020940104>
5. Jones I. A. Biocide use in the antimicrobial era: a review / I. A. Jones, L. T. Joshi // *Molecules*. – 2021. – 26 (8). – 2276. – URL : <https://doi.org/10.3390/molecules26082276>
6. Lobo F. M. An overview of the antimicrobial properties of lignocellulosic materials / F. M. Lobo, A. R. Franco, E. M. Fernandes, R. L. Reis // *Molecules*. – 2021. – 26 (6). – 1749. – URL : <https://doi.org/10.3390/molecules26061749>
7. Кильдеева Н. Р. Электроформирование ультратонких волокон из аминоксодержащих полимеров для медицины и защиты окружающей среды / Н. Р. Кильдеева, Г. А. Вихорева // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых «Сегодня и завтра медицинского, технического и защитного текстиля. Роль традиционных и высоких технологий»

- («Медтекстиль – 2012»), г. Москва, 8-9 октября 2012 г. – Иваново : ОАО «Издательство «Иваново», 2012. – С. 19-20.
8. Баранова О. Н. Целюлозные полотна, модифицированные гидрозолеом серебра с применением растительных дубителей / О. Н. Баранова, Л. И. Золина // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых «Сегодня и завтра медицинского, технического и защитного текстиля. Роль традиционных и высоких технологий» («Медтекстиль – 2012»), г. Москва, 8-9 октября 2012 г. – Иваново : ОАО «Издательство «Иваново», 2012 – С. 29.
9. Глущенко Н. Н. Биологическая активность нетканного льняного полотна с наночастицами меди / Н. Н. Глущенко, А. А. Рахметова, И. П. Ольховская, О. А. Богословская, В. Н. Галашина, Н. С. Дымникова // Тезисы докладов Международной научно-практической конференции и школы молодых ученых «Сегодня и завтра медицинского, технического и защитного текстиля. Роль традиционных и высоких технологий» («Медтекстиль – 2012»), г. Москва, 8-9 октября 2012 г. – Иваново : ОАО «Издательство «Иваново», 2012 – С. 32-33.
10. Jacob J. Use of Ginger Nanofibers for the Preparation of Cellulose Nanocomposites and Their Antimicrobial Activities / J. Jacob, J. T. Haponiuk, S. Thomas, G. Peter, S. Gopi // *Fibers*. – 2018. – V. 6 (4). – 79. – URL : <https://doi.org/10.3390/fib6040079>
11. Morena A. G. Hybrid Tellurium-Lignin Nanoparticles with Enhanced Antibacterial Properties / A. G. Morena., A. Bassegoda, J. Hoyoy, T. Tzanov // *ACS Applied Materials and Interfaces*. – 2021. – V. 13 (13). – P. 14885–14893. – URL : <https://doi.org/10.1021/acsmi.0c22301>
12. Sunthornvarabhas J. Antimicrobial Tendency of Bagasse Lignin Extracts by Raman Peak Intensity / J. Sunthornvarabhas, P. Rungthaworn, U. Sukatta // *Sugar Tech*. – 2020. – V. 22. – P. 697–705. – URL : <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00778-x>
13. Sunthornvarabhas J. Antimicrobial kinetic activities of lignin from sugarcane bagasse for textile product / J. Sunthornvarabhas, S. Liengprayoon, T. Suwonsichon // *Industrial Crops and Products*. – 2017. – V. 109 (15). – P. 857–861. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.059>
14. Galkin M. From stabilization strategies to tailor-made lignin macromolecules and oligomers for materials / M. Galkin // *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*. – 2021. – V. 28. – 100438. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100438>
15. Pletzer D. Rapid microwave-based method for the preparation of antimicrobial lignin-capped silver nanoparticles active against multidrug-resistant bacteria / D. Pletzer, J. Asnis, Y. N. Slavin, R. W. Hancock, H. Bach, K. Saatchi // *International Journal of Pharmaceutics*. – 2021. – V. 596. – P. 120–129. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120299>
16. Aadil K. R. Green synthesis of silver nanoparticles using acacia lignin, their cytotoxicity, catalytic, metal ion sensing capability and antibacterial activity / K. R. Aadil, N. Pandey, S. I. Mussatto, H. Jha // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2019. – V. 7 (5). – 103296. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103296>
17. Juikar S. J. Microbial Production of Nanolignin from Cotton Stalks and Its Application onto Cotton and Linen Fabrics for Multifunctional Properties / S. J. Juikar, V. Nandanatham // *Waste and Biomass Valorization* volume. – 2020. – V. 11. – P. 6073–6083. – URL : <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00867-8>
18. Салеба Л. В. Пектин: структура, властивості, біологічні функції / Л. В. Салеба // *Вісник ХНТУ*. – 2018. – № 2 (65). – С. 143–149.
19. Domínguez-Robles J. Lignin for pharmaceutical and biomedical applications – Could this become a reality? / J. Domínguez-Robles, A. Cárcamo-Martínez, S. A. Stewart, R.F. Donnelly, E. Larrañeta, M. Borrega // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. – 2020. – V. 18. – 100320. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100320>
20. Пат. № 103645 UA МПК B01J20/00 C01B31/08. Спосіб одержання вуглецевого адсорбенту із лігніно-целюлозної сировини / Сич Н. В. ; заявник та власник Інститут сорбції та проблем ендокринології НАН України. – u201505969 ; заявл. 17.06.2015 ; опубл. 25.12.2015, Бюл. № 24/2015.
21. Пат. № 78908 UA МПК B01J20/22. Технологія виробництва сорбенту на основі лігніну / Ерофеев В. А. ; заявник та власник Севастопольський національний університет ядерної енергетики та промисловості. – u201209109 ; заявл. 24.07.2012 ; опубл. 10.04.2013, бюл. № 7/2013.
22. Пат. № 135646 UA МПК A61L2/16 D06M13/00. Спосіб отримання текстильних матеріалів з антимікробними властивостями / Мартиросян І. А., Пахолук О. В. ; заявник та власник Одеська національна академія харчових технологій. – u201901165 ; заявл. 05.02.2019 ; опубл. 10.07.2019, Бюл. № 13/2019.
23. Пат. № 123992 UA МПК D06M11/13 D06M11/65. Текстильні матеріали, які мають антимікробні властивості / Свами Рогіні ; заявник та власник LIVINGUARD AG. – a201709419 ; заявл. 29.02.2016 ; опубл. 07.07.2021, Бюл. № 27/2021.
24. Пат. № 91619 UA МПК D06M11/00 D06M23/08. Інтелектуальний бактерицидний текстиль / Волков О. І. ; заявник та власник Київський національний університет технологій та дизайну. – a200814057 ; заявл. 05.12.2008 ; опубл. 10.08.2010, Бюл. № 15/2010.
25. Пат. № 51203 UA МПК D06M11/00 D06M13/00. Спосіб надання антимікробних властивостей та стійкості до мікробіологічного руйнування текстильним матеріалам, що містять вовну / Неділько В. В. ; заявник та власник Херсонський державний технічний університет. – u2009132654 ; заявл. 21.12.2009 ; опубл. 12.07.2010, Бюл. № 13/2010.

26. Пат. № 10203 UA МПК D06M11/00 D06M13/00. Спосіб надання антимікробних властивостей целюлозним текстильним матеріалам / Сумська О. П. ; заявник та власник Херсонський державний технічний університет. – u200502098 ; заявл. 09.03.2005 ; опубл. 15.11.2005, Бюл. № 11/2005.
27. Пат. № 26328 UA МПК D06M13/00 D06P3/58. Спосіб антимікотичної обробки текстильних виробів / Косінов М. В. ; заявник та власник Косінов Микола Васильович. – u200705969 ; заявл. 29.05.2007 ; опубл. 10.09.2007, Бюл. № 14/2007.
28. Пат. № 117185 UA МПК A61K33/38 B82Y5/00. Спосіб отримання текстильних матеріалів з антимікробними властивостями / Скиба М.І., Півоваров О.А. ; заявник та власник Державний вищий навчальний заклад "Український державний хіміко-технологічний університет". – u201610643 ; заявл. 24.10.2016 ; опубл. 26.06.2017, Бюл. № 12/2017
29. Пат. № 74853 UA МПК A61L15/12. Композиція для надання медичним текстильним матеріалам антимікробних властивостей з пролонгованою дією / Назарчук О. А. ; заявник та власник Вінницький національний медичний університет ім. М.І. Пирогова. – u201205692 ; заявл. 10.05.2012 ; опубл. 12.11.2012, Бюл. № 21/2012.
30. Пат. № 68230 UA МПК D06M11/00 D06M13/00. Спосіб надання антимікробних властивостей вовновмісним текстильним матеріалам спеціального призначення / Неділько В. В. ; заявник та власник Херсонський державний технічний університет. – u201107740 ; заявл. 20.06.2011 ; опубл. 26.03.2012, Бюл. № 6/2012.
31. Tao J. Lignin – An underutilized, renewable and valuable material for food industry / J. Tao, S. Li, F. Ye, Y. Zhou, L. Lei., G. Zhao // *Food science and nutrition*. – 2020. – V. 60 (12). – P. 2011–2033. – URL : <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1625025>
32. Gargulak J. D. Commercial Use of Lignin-Based Materials / J. D. Gargulak, S. E. Lebo // *ACS Symposium Series*. – 1999. – V. 742 (15). – P. 304–320. – URL : [10.1021/bk-2000-0742.ch015](https://doi.org/10.1021/bk-2000-0742.ch015)
33. Ten E. Functionalized Polymers from Lignocellulosic Biomass: State of the Art / E. Ten, W. Vermeris // *Polymers*. – 2013. – V. 5 (2). – P. 600–642. – URL : <https://doi.org/10.3390/polym5020600>
34. Ndaba B. Influence of extraction methods on antimicrobial activities of lignin-based materials: A review / B. Ndaba, A. Roopnarain, M. O. Daramola, R. Adeleke // *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. – 2020. – V. 18. – 100342. – URL : [10.1016/j.scp.2020.100342](https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100342)
35. Li T. The current and emerging sources of technical lignins and their applications / T. Li, S. Takkellapati // *Biofuels Bioproducts Biorefining*. – 2018. – V. 12 (5). – P. 756–787. – URL : <https://doi.org/10.1002/bbb.1913>
36. García A. Antioxidant and biocide behaviour of lignin fractions from apple tree pruning residues / A. García, G. Spigno, J. Labidi // *Industrial Crops and Products*. – 2017. – V. 104. – P. 242–252. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.063>
37. Aadil K. R. Green synthesis of silver nanoparticles using acacia lignin, their cytotoxicity, catalytic, metal ion sensing capability and antibacterial activity / K. R. Aadil, N. Pandey, S. I. Mussatto, H. Jha // *Journal of Environmental Chemical Engineering*. – 2019. – V. 7 (5). – 103296. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103296>
38. Lizundia E. Synergic effect of nanolignin and metal oxide nanoparticles into poly(l-lactide) bionanocomposites: material properties, antioxidant activity, and antibacterial performance / E. Lizundia, I. Armentano, F. Luzi, F. Bertoglio, E. Restivo, L. Visai, L. Torre // *Applied Bio Materials*. – 2020. – V. 3 (8). – P. 5263–5274. – URL : <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00637>
39. Figueiredo P. Properties and chemical modifications of lignin: Towards lignin-based nanomaterials for biomedical applications / P. Figueiredo, K. Lintinen, J.T. Hirvonen, M.A. Kostianen, H.A. Santosa // *Progress in Materials Science*. – 2018. – V. 93. – P. 233–269. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.001>
40. Поліщук С.О. Фізико-хімічне обґрунтування технологій кольорування текстильних матеріалів новими випускними формами органічних барвників : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня док. тех. наук : спец. 05.19.03 «Технологія текстильних матеріалів» / Степан Олександрович Поліщук ; Херсонський державний технічний університет. – Херсон, 1999. – 35 с.
41. Mellinas C. Recent Trends in the Use of Pectin from Agro-Waste Residues as a Natural-Based Biopolymer for Food Packaging Applications / C. Mellinas, M. Ramos, A. Jiménez, M. C. Garrigós // *Materials*. – 2020. – V. 13 (3). – 673. – URL : <https://doi.org/10.3390/ma13030673>
42. Kuma M. Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging / M. Kumar, M. Tomar, V. Saurabh, T. Mahajan, S. Punia, M. D. M. Contreras, S. G. Rudra, C. Kaur, J. F. Kennedy // *Trends in Food Science & Technology*. – 2020. – V. 105. – 223–237. – URL : <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>
43. Mather J. P. Introduction to cell and tissue culture / J. P. Mather, P. E. Roberts // *Theory and technique*. – New York : Plenum Press, 1998. – P. 175–194.
44. Визначення чутливості мікроорганізмів до антибактеріальних препаратів [Електронний ресурс] : методичні вказівки : Наказ 05.04.2007 № 167 / МОЗ України. – Режим доступу : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0167282-07#Text>
45. Freitas F. M. Green synthesis of lignin nano- and microNational-particles: Physicochemical characterization, bioactive properties and cytotoxicity assessment / F.M. Freitas, M.A. Cerqueira, C. Gonçalves, S.

Azinheiro, A. Garrido-Maestu, A.A. Vicente, L.M. Pastrana, J.A. Teixeira, M. Michelin // National library of Medicine. – 2020. – V. 15(163). – P. 1798–1809. – URL : 10.1016/j.ijbiomac.2020.09.110.

46. Tao J. Lignin—An underutilized, renewable and valuable material for food industry / J. Tao, S. Li, F. Ye, Y. Zhou, L. Lei, G. Zhao // Food Science and Nutrition. – 2020. – V. 60 (12). – P. 2011–2033. – URL : <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1625025>

47. Герасько Е. В. Бицидные свойства наноразмерных частиц серебра / Е. В. Герасько, С. А. Чуловская, В. И. Парфенюк // Вестник КГУ им. Н.А. Некрасова. – 2011. – № 3. – С. 22–25.

48. Антоновская Л. И. Выбор методов, условий испытаний и параметров оценки антибактериальных свойств бицидных препаратов / Л. И. Антоновская, Н. А. Белясова // Химия, технология органических веществ и биотехнология. Труды БГТУ. – 2011. – № 4. – С. 178–181.

References

1. Bockmühl D. P. Laundry and textile hygiene in healthcare and beyond / D. P. Bockmühl, J. Schages, L. Rehberg // Microbial Cell. – 2019. – V. 6 (7). – R. 299-306. URL: 10.15698/mic2019.07.682

2. Krichevskij G. E. Proshloe, nastoyashee i budushee mirovogo tekstilya. Revolyushionnoe i evolyucionnoe razvitie / G. E. Krichevskij // Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii i shkoly molodyh uchenyh «Segodnya i zavtra medicinskogo, tehniceskogo i zashitnogo tekstilya. Rol tradicionnyh i vysokih tehnologij («Medtekstil – 2012»), g. Moskva, 8-9 oktyabrya 2012 g. – Ivanovo : OAO «Izdatelstvo «Ivanovo», 2012. – S. 5.

3. Babu K. M. Bioactive antimicrobial agents for finishing of textiles for health care products / K. M. Babu, K. B. Ravindra // The Journal of The Textile Institute. – 2015. – V. 106 (7). – P. 706-717. URL: <https://doi.org/10.1080/00405000.2014.936670>

4. Orhan M. Triclosan applications for biocidal functionalization of polyester and cotton surfaces / M. Orhan // Journal of Engineered Fibers and Fabrics. – 2020. V. 15. – P. 1-11. URL: <https://doi.org/10.1177/1558925020940104>

5. Jones I. A. Biocide use in the antimicrobial era: a review / I.A. Jones, L. T. Joshi // Molecules. – 2021. – 26 (8) – 2276. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26082276>

6. Lobo F. M. An overview of the antimicrobial properties of lignocellulosic materials / F. M. Lobo, A. R. Franco, E. M. Fernandes, R. L. Reis // Molecules. – 2021. – 26 (6). – 1749. URL: <https://doi.org/10.3390/molecules26061749>

7. Kildeeva N. R. Elektroformirovanie ultratonkih volokon iz aminosoderzhashih polimerov dlya medicyny i zashity okruzhayushej sredy / N. R. Kildeeva, G. A. Vihoreva // Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii i shkoly molodyh uchenyh «Segodnya i zavtra medicinskogo, tehniceskogo i zashitnogo tekstilya. Rol tradicionnyh i vysokih tehnologij («Medtekstil – 2012»), g. Moskva, 8-9 oktyabrya 2012 g. – Ivanovo : OAO «Izdatelstvo «Ivanovo», 2012. – S. 19-20.

8. Baranova O. N. Celyuloznye polotna, modifirovannye gidrozolom srebra s primeneniem rastitelnyh dubitelej / O. N. Baranova, L. I. Zolina // Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii i shkoly molodyh uchenyh «Segodnya i zavtra medicinskogo, tehniceskogo i zashitnogo tekstilya. Rol tradicionnyh i vysokih tehnologij («Medtekstil – 2012»), g. Moskva, 8-9 oktyabrya 2012 g. – Ivanovo : OAO «Izdatelstvo «Ivanovo», 2012. – S. 29.

9. Glushenko N. N. Biologicheskaya aktivnost netkannogo lnyanogo polotna s nanochasticami medi / N. N. Glushenko, A. A. Rahmetova, I. P. Olhovskaya, O. A. Bogoslovskaya, V. N. Galashina, N. S. Dymnikova // Tezisy dokladov Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoy konferencii i shkoly molodyh uchenyh «Segodnya i zavtra medicinskogo, tehniceskogo i zashitnogo tekstilya. Rol tradicionnyh i vysokih tehnologij («Medtekstil – 2012»), g. Moskva, 8-9 oktyabrya 2012 g. – Ivanovo : OAO «Izdatelstvo «Ivanovo», 2012. – S. 32-33.

10. Jacob J. Use of Ginger Nanofibers for the Preparation of Cellulose Nanocomposites and Their Antimicrobial Activities / J. Jacob, J. T. Haponiuk, S. Thomas, G. Peter, S. Gopi // Fibers. – 2018. – V. 6 (4). – 79. URL: <https://doi.org/10.3390/fib6040079>

11. Morena A. G. Hybrid Tellurium-Lignin Nanoparticles with Enhanced Antibacterial Properties / A. G. Morena, A. Bassegoda, J. Hoyo, T. Tzanov // ACS Applied Materials and Interfaces. – 2021. – V. 13 (13). – P. 14885-14893. URL: <https://doi.org/10.1021/acsami.0c22301>

12. Sunthornvarabhas J. Antimicrobial Tendency of Bagasse Lignin Extracts by Raman Peak Intensity / J. Sunthornvarabhas, P. Rungthaworn, U. Sukatta // Sugar Tech. – 2020. – V. 22. – P 697-705. URL: <https://doi.org/10.1007/s12355-019-00778-x>

13. Sunthornvarabhas J. Antimicrobial kinetic activities of lignin from sugarcane bagasse for textile product / J. Sunthornvarabhas, S. Liengprayoon, T. Suwonsichon // Industrial Crops and Products. – 2017. – V. 109 (15). – P. 857-861. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.09.059>

14. Galkin M. From stabilization strategies to tailor-made lignin macromolecules and oligomers for materials / M. Galkin // Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry. – 2021. – V. 28. – 100438. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cogsc.2020.100438>

15. Pletzer D. Rapid microwave-based method for the preparation of antimicrobial lignin-capped silver nanoparticles active against multidrug-resistant bacteria / D. Pletzer, J. Asnis, Y. N. Slavin, R. W. Hancock, H. Bach, K. Saatchi // International Journal of Pharmaceutics. – 2021. – V. 596. – R. 120-129. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2021.120299>

16. Aadil K. R. Green synthesis of silver nanoparticles using acacia lignin, their cytotoxicity, catalytic, metal ion sensing capability and antibacterial activity / K. R. Aadil, N. Pandey, S. I. Mussatto, H. Jha // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2019. – V. 7 (5). – 103296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103296>

17. Juikar S. J. Microbial Production of Nanolignin from Cotton Stalks and Its Application onto Cotton and Linen Fabrics for Multifunctional Properties / S. J. Juikar, V. Nandanatham // Waste and Biomass Valorization volume. – 2020. – V. 11. – P. 6073-6083. URL: <https://doi.org/10.1007/s12649-019-00867-8>

18. Salieba L. V. Pektyn: struktura, vlastyvoli, biolohichni funktsii / L. V. Salieba // Visnyk KhNTU. – 2018. – № 2 (65). – S. 143-149.

19. Domínguez-Robles J. Lignin for pharmaceutical and biomedical applications – Could this become a reality? / J. Domínguez-Robles, A. Cárcamo-Martínez, S. A. Stewart, R.F. Donnelly, E. Larrañeta, M. Borrega // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2020. – V. 18. – 100320. URL: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100320>

20. Pat. № 103645 UA MPK B01J20/00 C01B31/08 Sposib oderzhannia vuhletsevoho adsorbentu iz lihnino-tseliuloznoi syrovyny / Sych N. V.; zaiavnyk ta vlasnyk Instytut sorbtzii ta problem endokrynolohii NAN Ukrainy. – u201505969; zaiavl. 17.06.2015; opubl. 25.12.2015, Biul. № 24/2015.

21. Pat. № 78908 UA MPK B01J20/22 Tekhnolohiia vyrobnytstva sorbentu na osnovi lihninu / Erofeiev V. A.; zaiavnyk ta vlasnyk Sevastopolskyi natsionalnyi universytet yadernoi enerhetyky ta promyslovosti. – u201209109; zaiavl. 24.07.2012; opubl. 10.04.2013, biul. № 7/2013.

22. Pat. № 135646 UA MPK A61L2/16 D06M13/00. Sposib otrymannia tekstylnykh materialiv z antymikrobnymy vlastyvolstiyamy / Martyrosian I. A., Pakholiuk O. V.; zaiavnyk ta vlasnyk Odeska natsionalna akademiia kharchovykh tekhnolohii. – u201901165; zaiavl. 05.02.2019; opubl. 10.07.2019, Biul. № 13/2019.

23. Pat. № 123992 UA MPK D06M11/13 D06M11/65. Tekstylni materialy, yaki maiut antymikrobnii vlastyvoli / Svami Rohini; zaiavnyk ta vlasnyk LIVINGUARD AG. – a201709419; zaiavl. 29.02.2016; opubl. 07.07.2021, Biul. № 27/2021.

24. Pat. № 91619 UA MPK D06M11/00 D06M23/08 Intelektualnyi bakterytsydnyi tekstyl / Volkov O. I.; zaiavnyk ta vlasnyk Kyivskyi natsionalnyi universytet tekhnolohii ta dyzainu. – a200814057; zaiavl. 05.12.2008; opubl. 10.08.2010, Biul. № 15/2010.

25. Pat. № 51203 UA MPK D06M11/00 D06M13/00 Sposib nadannia antymikrobynykh vlastyvoesti ta stikosti do mikrobiolohichnoho ruinuвання tekstylnym materialam, shcho mistiat vovnu / Nedilko V. V.; zaiavnyk ta vlasnyk Khersonskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet. – u2009132654 zaiavl. 21.12.2009; opubl. 12.07.2010, Biul. № 13/2010.
26. Pat. № 10203 UA MPK D06M11/00 D06M13/00 Sposib nadannia antymikrobynykh vlastyvoesti tselulozным tekstylnym materialam / Sumka O. P.; zaiavnyk ta vlasnyk Khersonskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet. – u200502098; zaiavl. 09.03.2005; opubl. 15.11.2005, Biul. № 11/2005.
27. Pat. № 26328 UA MPK D06M13/00 D06P3/58 Sposib antymikotychnoi obrobky tekstylnykh vyrobiv / Kosinov M. V.; zaiavnyk ta vlasnyk Kosinov Mykola Vasylovych. – u200705969; zaiavl. 29.05.2007; opubl. 10.09.2007, Biul. № 14/2007.
28. Pat. № 117185 UA MPK A61K33/38 B82Y5/00 Sposib otrymannia tekstylnykh materialiv z antymikrobnymy vlastyvoestamy / Skyba M.I., Pivovarov O.A.; zaiavnyk ta vlasnyk Derzhavnyi vyshchy navchalnyi zaklad "Ukrainskyi derzhavnyi khimiko-tehnolohichnyi universytet". – u201610643; zaiavl. 24.10.2016; opubl. 26.06.2017, Biul. № 12/2017
29. Pat. № 74853 UA MPK A61L15/12 Kompozytsiia dlia nadannia medychnym tekstylnym materialam antymikrobynykh vlastyvoesti z prolonhovanoiui diieiu / Nazarchuk O. A.; zaiavnyk ta vlasnyk Vinnytskyi natsionalnyi medychnyi universytet im. M.I.Pyrohova. – u201205692; zaiavl. 10.05.2012; opubl. 12.11.2012, Biul. № 21/2012.
30. Pat. № 68230 UA MPK D06M11/00 D06M13/00 Sposib nadannia antymikrobynykh vlastyvoesti vovnovmisnym tekstylnym materialam spetsialnogo pryznachennia / Nedilko V. V.; zaiavnyk ta vlasnyk Khersonskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet. – u201107740; zaiavl. 20.06.2011; opubl. 26.03.2012, Biul. № 6/2012.
31. Tao J. Lignin – An underutilized, renewable and valuable material for food industry / J. Tao, S. Li, F. Ye, Y. Zhou, L. Lei., G. Zhao // Food science and nutrition. – 2020. – V. 60 (12). – P. 2011-2033. URL: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1625025>
32. Gargulak J. D. Commercial Use of Lignin-Based Materials / J. D. Gargulak, S. E. Lebo // ACS Symposium Series. – 1999. – V. 742 (15). – R. 304-320. URL: [10.1021/bk-2000-0742.ch015](https://doi.org/10.1021/bk-2000-0742.ch015)
33. Ten E. Functionalized Polymers from Lignocellulosic Biomass: State of the Art / E. Ten, W. Vermerris // Polymers. – 2013. – V. 5 (2). – P. 600-642. URL: <https://doi.org/10.3390/polym5020600>
34. Ndaba B. Influence of extraction methods on antimicrobial activities of lignin-based materials: A review / B. Ndaba, A. Roopnarain, M. O. Daramola, R. Adeleke // Sustainable Chemistry and Pharmacy. – 2020. – V. 18. – 100342. URL: [10.1016/j.scp.2020.100342](https://doi.org/10.1016/j.scp.2020.100342)
35. Li T. The current and emerging sources of technical lignins and their applications / T. Li, S. Takkellapati // Biofuels Bioproducts Biorefining. – 2018. – V. 12 (5). – P. 756-787. URL: <https://doi.org/10.1002/bbb.1913>
36. Garcia A. Antioxidant and biocide behaviour of lignin fractions from apple tree pruning residues / A. Garcia, G. Spigno, J. Labidi // Industrial Crops and Products. – 2017. – V. 104. – P. 242-252. URL: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2017.04.063>
37. Aadil K. R. Green synthesis of silver nanoparticles using acacia lignin, their cytotoxicity, catalytic, metal ion sensing capability and antibacterial activity / K. R. Aadil, N. Pandey, S. I. Mussatto, H. Jha // Journal of Environmental Chemical Engineering. – 2019. – V. 7 (5). – 103296. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2019.103296>
38. Lizundia E. Synergic effect of nanolignin and metal oxide nanoparticles into poly(l-lactide) bionanocomposites: material properties, antioxidant activity, and antibacterial performance / E. Lizundia, I. Armentano, F. Luzi, F. Bertoglio, E. Restivo, L. Visai, L. Torre // Applied Bio Materials. – 2020. – V. 3 (8). – R. 5263-5274. URL: <https://doi.org/10.1021/acsabm.0c00637>
39. Figueiredo P. Properties and chemical modifications of lignin: Towards lignin-based nanomaterials for biomedical applications / P. Figueiredo, K. Lintinen, J.T. Hirvonen, M.A. Kostianen, H.A. Santosa // Progress in Materials Science. – 2018. – V. 93. – P. 233-269. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.12.001>
40. Polishchuk S.O. Fyzyko-khimichne obhruntuvannia tekhnolohii koloruvannia tekstylnykh materialiv novymy vypusknyymi formamy orhanichnykh barvnykiv : avtoref. dys. na zdobuttia nauk. stupenia dok. tekhn. nauk : spets. 05.19.03 «Tekhnolohiia tekstylnykh materialiv» / Stepan Oleksandrovych Polishchuk; Khersonskiy derzhavnyi tekhnichnyi universytet. – Kherson, 1999. – 35 s.
41. Mellinas S. Recent Trends in the Use of Pectin from Agro-Waste Residues as a Natural-Based Biopolymer for Food Packaging Applications / C. Mellinas, M. Ramos, A. Jiménez, M. C. Garrigós // Materials. – 2020. – V. 13 (3). – 673. URL: <https://doi.org/10.3390/ma13030673>
42. Kuma, M. Emerging trends in pectin extraction and its anti-microbial functionalization using natural bioactives for application in food packaging / M. Kumar, M. Tomar, V. Saurabh, T. Mahajan, S. Punia, M. D. M. Contreras, S. G. Rudra, C. Kaur, J. F. Kennedy // Trends in Food Science & Technology. – 2020. – V. 105. – 223-237. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.009>
43. Mather J. P. Introduction to cell and tissue culture / J. P. Mather, P. E. Roberts // Theory and technique. – New York : Plenum Press, 1998. – R. 175-194.
44. Vyznachennia chutlyvosti mikroorhanizmiv do antybakterialnykh preparativ [Elektronnyi resurs] : metodychni vkazivky : MOZ Ukrainy, Nakaz 05.04.2007 № 167. Rezhym dostupu: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0167282-07#Text>
45. Freitas F. M. Green synthesis of lignin nano- and microNational-particles: Physicochemical characterization, bioactive properties and cytotoxicity assessment / F.M. Freitas, M.A. Cerqueira, C. Gonçalves, S. Azinheiro, A. Garrido-Maestu, A.A. Vicente, L.M. Pastrana, J.A. Teixeira, M. Michelin // National library of Medicine. – 2020. – V. 15(163). – P. 1798-1809. URL: [10.1016/j.ijbiomac.2020.09.110](https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.09.110)
46. Tao J. Lignin—An underutilized, renewable and valuable material for food industry / J. Tao, S. Li, F. Ye, Y. Zhou, L. Lei, G. Zhao // Food Science and Nutrition. – 2020. – V. 60 (12). – R. 2011-2033. URL: <https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1625025>
47. Gerasko E. V. Biocidnye svoystva nanorazmernykh chastic serebra / E. V. Gerasko, S. A. Chulovskaya, V. I. Parfenyuk // Vestnik KGU im. N.A. Nekrasova. – 2011. – № 3. – S. 22-25.
48. Antonovskaya L. I. Vybor metodov, uslovij ispytaniy i parametrov ochenki antibakterialnykh svoystv biocidnykh preparatov / L. I. Antonovskaya, N. A. Belyasova // Himiya, tehnologiya organicheskikh veshstv i biotekhnologiya. Trudy BGTU. – 2011. – № 4. – S. 178-181.