

УДК 633.11+631.572:547.992:66.094.941

ГІДРОЛІЗНИЙ ЛІГНІН – ВИСОКОКАЛОРІЙНЕ ПАЛИВО ТА ЛЕГКОДОСТУПНА ВІДНОВЛЮВАЛЬНА СИРОВИНА ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ І БРИКЕТІВ

Ободович О.М.¹, д.т.н., Степанова О.Є.², к.т.н., Резакова Т.А.³, к.т.н., Чернявський К.Є.⁴, к.т.н., Парченко В.М.⁵

¹професор, завідувач відділу Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7213-3118>, e-mail: tdsittf@ukr.net

²с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7179-7251>, e-mail: super-olesya2807@ukr.net

³пр.н.с., с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, Київ, 03057, Україна, e-mail: rezakova_itf@ukr.net

⁴с.н.с. Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: tdsittf@ukr.net

⁵гол. механік Інституту технічної теплофізики НАН України, вул. Марії Капніст 2а, м. Київ, 03057, Україна, e-mail: xbo1959@gmail.com

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.7>

В статті наведено існуючі технології та обладнання для гідролізу лігноцелюлозовмісної сировини для отримання лігніну, геміцелюлози, целюлози. Запропоновано використання роторно-пульсаційних апаратів для більш рівномірного перемішування лігноцелюлозовмісної сировини з розчином і виключення мішалки з редукторами для перемішування, що зменшує вартість при виробництві біоетанолу. Суміщення процесу автогідролізу за допомогою РПА і хімічної (лужної) обробки твердої сировини в розчині істотно впливає на швидкість протікання процесу поділу целюлози та лігніну з меншими витратами енергії.

The article presents existing technologies and equipment for the hydrolysis of lignocellulosic raw materials to obtain lignin, hemicellulose, and cellulose. The use of rotary-pulsation apparatus for more uniform mixing of lignocellulosic raw materials with the solution and the elimination of a mixer with gearboxes for mixing are proposed, which reduces the cost of bioethanol production. The combination of the autohydrolysis process using RPA and chemical (alkaline) treatment of solid raw materials in the solution significantly affects the speed of the cellulose and lignin separation process with lower energy consumption.

Бібл. 15, табл. 1, рис. 8.

Ключові слова: альтернативні енергоносії, гідроліз, лігноцелюлозна сировина, роторно-пульсаційний апарат, паливні брикети, паливні гранули, інтенсифікація тепломасообмінних процесів, енергозберігаючі теплотехнології.

НАН – Національна академія наук;

ТЕН – трубчастий електронагрівник.

РПА – роторно-пульсаційний апарат;

Вступ. В даний час актуальність питання виробництва альтернативних енергоносіїв постійно зростає. Для цього є ряд причин:

1. Традиційні енергоносії – газ, вугілля, нафта – з кожним роком стає добувати все важче, і це веде до постійного підвищення їх вартості. Особливої актуальності для України, як відомо, має питання вартості імпортованого газу.

2. Запаси традиційних енергоносіїв швидко виснажуються, що робить виробництво альтернативних енергоносіїв вельми перспективним напрямком бізнесу.

3. Виробництво альтернативних джерел енергії стимулюється Урядами всіх розвинених країн, у тому числі України.

Новим законом “Про сприяння виробництву та використанню біологічних видів палива” підприємства-виробники біопалива, в т.ч. паливних гранул і брикетів, звільнені до січня 2020 р. від оподаткування прибутку [1]. Є, також, ряд економічних, екологічних і соціальних передумов, що сприяють розширенню ринку біопалива взагалі, і паливних гранул і брикетів зокрема. Але багато бізнесменів, що направили свої зусилля і капітали в цей перспективний сегмент економіки, зіткнулися з несподіваними проблемами.

Основна конкуренція в цій галузі лежить не в сфері збуту – з ним якраз проблем немає, причому, в основному, вся продукція відвантажується на експорт в країни Євросоюзу, а в сфері забезпечення сировиною. Справа

в тому, що багато підприємств, які встановили обладнання брикетування або грануляції біомаси, в даний час працюють не в повну потужність, а часто взагалі простоюють через відсутність сировини. Це пов'язано насамперед з сезонністю наявності деяких видів сировини (лушпиння соняшника, соломи, відходів круп'яних культур, відходів переробки кукурудзи, інших видів сільгоспсировини), некоректним вибором місця установки устаткування (наприклад, віддаленість від потенційних джерел сировини), великими логістичними витратами на доставку сировини, що має, як правило, дуже малу насипну вагу (до прикладу, насипна вага лушпиння соняшника – 100 кг/м³) [2].

У такій ситуації лігнін є гарною альтернативою сільськогосподарським відходам як сировини (рис. 1), так як його запаси є в досить великій кількості незалежно від сезону переробки, лігнін добре піддається гранулюванню і брикетуванню в силу своїх відмінних зв'язуючих властивостей, має досить велику насипну вагу (до 700 кг/м³), що робить рентабельним його перевезення на значні відстані навіть не в гранульованому вигляді, має гарну теплотворну здатність, сумірною з вугіллям, при набагато меншій зольності, і ціна сировини-лігніну порівняно невисока.

Якщо розглядати лігнін з фізико-хімічної точки зору, то в первісному вигляді ця речовина являє собою складну стружкоподібну масу, вологість якої доходить до сімдесяти відсотків. По суті, лігнін – це унікальний комплекс речовин, який складається з полісахаридів, особливої групи речовин, що відносяться до так званого лігногумінового комплексу, моносахарів, різних мінеральних і органічних кислот самої різної насиченості, а також певної частини золи. Гідролізний лігнін являє собою стружкоподібну масу з вологістю приблизно 55-70 %. За своїм складом це комплекс речовин, в який входять власне лігнін рослинної клітини, частина полісахаридів, група речовин лігногумінового комплексу, невідмиті після гідролізу моноцукри,

мінеральні та органічні кислоти, зольні та інші речовини. Вміст у лігніну власне лігніну коливається в межах 40-88 %, полісахаридів від 13 до 45 %, смолистих і речовин лігногумінового комплексу від 5 до 19 % і зольних елементів від 0,5 до 10 %. Зола гідролізного лігніну в основному наносна. Гідролізний лігнін характеризується великим обсягом пор, що наближається до пористості деревного вугілля, високою реакційною здатністю в порівнянні з традиційними вуглецевими відновниками і вдвічі більшим в порівнянні з деревиною вмістом твердого вуглецю, що досягає 30 %, тобто майже половини вуглецю деревного вугілля.

Гідролізний лігнін відрізняє здатність переходити в в'язкопластичний стан при накладенні тиску 100 МПа. Ця обставина обумовила один з перспективних напрямків використання гідролізного лігніну у вигляді брикетованого матеріалу. Встановлено, що лігнобрикети є висококалорійним малодимним побутовим паливом, якісними відновниками в чорній і кольоровій металургії, і замінюють кокс, напівкокс і деревне вугілля, а також можуть служити для виробництва вугілля типу деревного і вуглецевих сорбентів. Дослідні та дослідно-промислові роботи ряду організацій показали, що брикетований гідролізний лігнін може бути цінною сировиною для металургійної, енергетичної та хімічної галузей промисловості, а також високосортним комунально-побутовим паливом.

До впровадження можуть бути рекомендовані технологічні розробки, що дозволяють отримувати наступну брикетовану лігнопродукцію [2]:

- лігнобрикети для заміни традиційних вуглецевих металургійних відновників і кускової шихти у виробництві кристалічного кремнію та феросплавів;
- малодимні паливні лігнобрикети;
- брикетований лігніну вугілля замість деревного у хімічній промисловості;
- вуглецеві сорбенти з лігнобрикетів для очищення промстоків та сорбції важких і благородних металів;

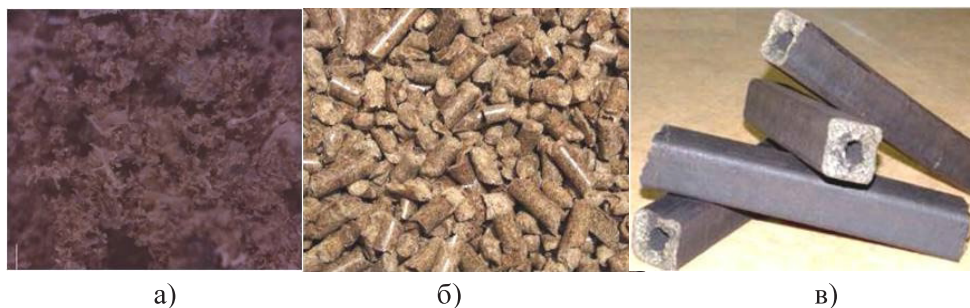


Рис. 1. Зовнішній вигляд лігніну та різної продукції з нього: лігнін (а), пелета з лігніну (б), брикет з лігніну (в)

Fig. 1. Appearance of lignin and various products made from it: lignin (a), lignin pellet (b), lignin briquette (c)

- енергетичні брикети з суміші з відсіву вуглезбагачення.

Паливні брикети з лігніну являють собою високоякісне паливо з теплотою згоряння до 5500 ккал/кг і низьким вмістом золи. При спалюванні брикети лігніну горять безбарвним полум'ям, не виділяючи кіптяви димового факела. Щільність лігніну дорівнює 1,25-1,4 г/см³, а коефіцієнт заломлення – 1,6.

Метою роботи є вивчення та аналіз існуючих технологій і обладнання для виробництва гідролізного лігніну, розробка нового тепломасообмінного обладнання для інтенсифікації способів приготування лігніну, розгляд перспектив подальшого використання лігніну в різних галузях промисловості.

Застосування біомаси в якості основного матеріалу для отримання палива та хімічних елементів протягом тривалого часу є предметом великих досліджень. Як можлива сировина при цьому розглядаються целюлоза і лігнін, які є основними компонентами лігноцелюлозовмісної біомаси. Для отримання прийнятних продуктів, що піддаються обробці, полімерні ланцюги лігноцелюлози необхідно розривати на молекули менших розмірів [3].

Мова при цьому йде про способи кислотнокаталізуючого гідролізу целюлозовмісної біомаси:

1. Імпрегнування біомаси розведеною кислотою, сушінні і гідролізі при підведенні водяної пари (US 2003/199049) [4].

2. Імпрегнування целюлозовмісного матеріалу розведеною кислотою, сушіння цього матеріалу та гідролізі. Матеріал можна між стадіями попереднього та основного гідролізу розбивати на волокна (US 2009/0176286) [5], що відповідно до US 2010/0126501 переробляють у квазірозплавлених гетерополікислотах. Співвідношення між волокнистим матеріалом і гетерополікислотою перевищує еквімолярне та складає від 1:1 до 1:4, а реакцію проводять при температурах до 120 °С. Субстрат піддається гідролізу після суспендування целюлозних волокон у псевдорозплавлених гетерополікислотах [6].

3. Спосіб обробки деревної маси розведеною кислотою в розчині, при цьому деревину піддають попередній обробці впливом на неї механічних сил з метою руйнування структури деревини та подальшого спресування субстрату в млині із зубчастими дисками для зниження вмісту води в матеріалі та полегшення абсорбції розведеної кислоти всередину розкритої деревної структури. Гідроліз проводять при цьому шляхом введення волокон у контакт з паром при температурі 160 °С (US 2005/0065336) [7].

4. Спосіб, що полягає в абсорбції органічного розчинника субстратом при використанні розчинника в масовій кількості від 20 до 200 мас. % у перерахуванні на масу субстрату, розміщення імпрегнованого таким шляхом субстрату в барабан, що обертається, і підведенні парів хлористоводневої кислоти для розкладання субстрату. Одержувані в такий спосіб продукти не розчиняються в органічних розчинниках та у воді (US 2010/0200182) [8].

5. Спосіб обробки пшеничної соломи у вигляді її суспензії в 40 мас. % розчині хлористоводневої кислоти в ротаційному випарнику, при цьому в суспензію вводять газоподібний хлористий водень, концентрація якого залишається тим самим в області насичення. При такій обробці пшеничної соломи вона солюбілізується в концентрованому розчині хлористого водню, і при цьому для деполімеризації лігноцелюлозного субстрату не використовуються ніякі механічні сили (US 2013/0239955) [9].

Використання лігноцелюлози як сировини для отримання біопалива відоме також з галузі виробництва біоетанолу. Так, зокрема, можна виділити наступні способи отримання біопалива.

Об'єднаний біотехнічний спосіб отримання біопалива та/або вихідного матеріалу для отримання біопалива з використанням для цього мікроорганізмів, що продукують ферменти. При цьому після культивування мікроорганізмів у подальшому використовують надосадову рідину або збагачену протеїнами фракцію, що містить каталітично активний фермент або каталітично активні ферменти (US 9434962) [10].

Спосіб обробки лігноцелюлозного матеріалу, що передбачає виконання наступних стадій: подрібнення лігноцелюлозного субстрату, змішування отриманих частинок з водою та диспергування суміші в колоїдному млині з отриманням суспензії, гомогенізація суспензії під високим тиском для отримання частинок з діаметром в межах від 10 до 40 мкм, а також буферизація суспензії ацетатом натрію та буферним розчином оцтової кислоти і потім додавання ферментів целюлаза- та ксиланаза-глюкозидази з подальшим проведенням ензимолізу протягом 36-72 год. (US 8828187) [11].

Однак відомі способи переробки біомаси, включаючи отримання лігніну з лігноцелюлозної біомаси, не оптимальні з точки зору простоти їх здійснення та отриманого виходу продукту і тому вимагають їх удосконалення. Здебільшого такі способи пов'язані з високими витратами на їх апаратне оформлення і створення необхідних умов для їх проведення.

Одним зі шляхів підвищення ефективності комплексної переробки лігноцелюлозної сировини є впровадження інноваційного енергозберігаючого обладнання, що дозволяє підвищити ступінь перетворення сировини в основні і побічні продукти. Прикладом обладнання, що істотно інтенсифікує тепло- та масообмін в рідких багатокомпонентних середовищах є роторно-пульсаційні апарати (РПА), що являються ефективними пристроями в технологіях, пов'язаних з перемішуванням, гомогенізацією, диспергуванням, нагріванням, екстрагуванням тощо [12-14].

Роторно-пульсаційний апарат поєднує принципи роботи колоїдних млинів, дезінтеграторів, насосів, змішувачів. Він відрізняється простотою конструкції та невеликими розмірами. У роторно-пульсаційному апараті є два зубчасті коаксіально розташовані ротороциліндри і статор. При швидкому обертанні одного з циліндрів виникають складні гідродинамічні умови, характерні для багатьох типів масообмінних приладів. Це пов'язано з тим, що при роботі апарату виникають пульсації швидкостей потоку, турбулізація рідини, особливо у пристінних ділянках апарата.

Для різних масообмінних процесів, в т.ч. і екстракції різних видів лігноцелюлозовмісної рослинної сировини, яка знаходиться у зваженому стані в потоці рідини, що рухається, можна застосувати пристрій, в основі яко-

го лежить використання принципу трубки Вентурі з багаторазовими чергуваннями звужень і розширень. Якщо через таку трубку з певною швидкістю проганяти рідину, що містить тверду фазу, то в елементах з меншим перерізом швидкість проходження потоку збільшиться, виникне перепад тиску. Унаслідок в рідині виникають зони її розриву – каверни, тобто утворюється кавітація. Кавітуюча рідина, проходячи крізь фланці, потрапляє в зону з підвищеним тиском (швидкість течії зменшується).

В Інституті технічної теплофізики НАН України розроблена дослідно-промислова установка, яка призначена для проведення попередньої підготовки лігноцелюлозної сировини до гідролізу (рис. 2).

Дослідно-промислова установка складається з приймальної ємності з сорочкою (1) та рециркуляційним насосом, ємності для сировини (січки соломи) (2), вібродозатора (3) (рис. 3), роторно-пульсаційного апарата (4) (рис. 4), сальникового вузла, консолі з підшипниковим вузлом, муфти, електродвигуна (5), системи водопостачання, регульованої та запірної арматури, приладів контролю, системи електроживлення та контролю. Приймальна ємність корисним об'ємом 200 л призначена для зберігання робочого середовища протягом обробки. Кришку ємності оснащено манометром та запобіжним клапаном на 3,0 бар. Ємність оснащено теплообмінною сорочкою об'ємом 27 л для підтримання необхідної температури процесу протягом обробки. Сорочку оснащено проточним водонагрівачем об'ємом 5 л з циркуляційним насосом з відкритим контуром продуктивністю 8 л/хв. з контролером регулювання температури підігріву теплоносія від 0 до 95 °С (рис. 5). Потужність ТЕНу складає 2 кВт.



Рис. 2. Зовнішній вигляд дослідно-промислової установки: 1 – приймальний бункер; 2 – ємності для сировини; 3 – вібродозатор; 4 – РПА; 5 – електродвигун
Fig. 2. Appearance of the pilot plant:
1 – receiving hopper; 2 – raw material tanks; 3 – vibrating feeder; 4 – RPA; 5 – electric motor



Рис. 3. Ємність для сировини з вібродозатором
Fig. 3. Raw material container with vibrating feeder

Ємність через вхідний патрубок сполучається з РПА. Ємність для сировини об'ємом 50 л призначена для зберігання твердої сировини.

Обертальний рух від валу електродвигуна через муфту передається валу РПА, який розташований на консолі з підшипниковим вузлом. Сальниковий вузол призначений для забезпечення герметичності РПА під час роботи (рис. 6).

Блок керування є окремим стаціонарним блоком, з якого відбувається дистанційне керування установкою. Блок оснащений вхідним автоматом, частотним перетворювачем ОВЕН ПВЧ-3, амперметром, лічильником електроенергії, розеткою 380 В 50 Гц, розеткою 380 В, 0...200 Гц, двома розетками 220 В 50 Гц.

Дослідно-промислова установка працює наступним чином. Приймальний бункер та РПА заповнюються лужним розчином. Січку соломи після етапу

механічного подрібнення завантажують в ємність для сировини. Запускають двигун та насос проточного водонагрівача. Після досягнення заданої температури розчину відкривають шар-кран на вхідному патрубку та запускають вібродозатор. Після цього водна суспензія січки соломи циркулює по замкненому контуру протягом встановленого часу обробки. Протягом обробки відбувається відділення лігніну та геміцелюлоз від лігноцелюлозного комплексу. Отриману суспензію подають на стадію розділення целюлози та щелоку.

На рис. 7 представлено результати досліджень делігніфікації соломи пшеничної в установці.

Обробка проводилась за наступних умов: вміст твердої речовини в лужній суспензії соломи пшеничної – 10 % мас.; температура обробки – 90 °С; концентрація лугу (NaOH) – 4 %; швидкість обертання ротора – 47,75 об/с; дисперсність січки соломи пшеничної в межах 100...400 мкм, тривалість обробки – 1 год.

Визначено вміст залишкового лігніну в зразках твердої фази після розділення на фільтрі отриманої в ході обробки лужної суспензії соломи пшеничної. Видно що, вміст лігніну в зразках зменшився протягом години з 17,1 % до 2,31 % від загального складу соломи. Тобто, після години обробки в розчин перейшло 86,5 % лігніну. Варто зазначити, що за перші 20 хв. обробки в розчин перейшло близько 80 % лігніну від його початкового вмісту.

У запропонованій дослідно-промисловій установці є низка переваг:

- завдяки використанню РПА немає необхідності в приймальній ємності (реакторі) створювати високий тиск і температуру, що дозволяє спростити і полегшити конструкцію приймальної ємності (економія витрат на матеріали) і використовувати її як приймальну ємність, так і як реактор для гідролізу лігноцелюлозовмісної сировини, а також виключити додаткову ємність;



Рис. 4. Зовнішній вигляд роторно-пульсаційного апарата (РПА)

Fig. 4. Appearance of the rotary-pulsation apparatus (RPA)



Рис. 5. Проточний водонагрівач з контролером регулювання температури

Fig. 5. Instantaneous water heater with temperature control controller



Рис. 6. Зовнішній вигляд РПА, підшипникового та сальникового вузлів

Fig. 6. Appearance of the RPA, bearing and gland assemblies

- завдяки використанню процесу автогідролізу за допомогою РПА немає необхідності нагрівання всього об'єму суміші до високої температури ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}$), у зв'язку з чим відбувається велика економія витрат енергії;

- використання РПА на відміну від більшості технологічних процесів, що використовуються на гідролізних підприємствах, дає можливість більш рівномірного перемішування лігноцелюлозовмісної сировини з розчином і виключити мішалки з редукторами для перемішування, що зменшує вартість при виробництві біоетанолу;

- використана схема подачі твердої сировини за допомогою електромагнітного вібродозатора, що забезпечує її рівномірний розподіл у всьому об'ємі розчину та запобігає спливанню соломи на поверхню;

- суміщення процесу автогідролізу за допомогою РПА та хімічної (лужної) обробки твердої сировини в розчині істотно впливає на швидкість протікання процесу поділу целюлози та лігніну з меншими витратами енергії;

- запропонована дослідно-промислова установка призначена для проведення попередньої підготовки лігноцелюлозовної сировини до гідролізу є універсальною та може застосовуватись у різних технологічних процесах.

Отриманий таким чином гідролізний лігнін має теплотворну здатність, яка для абсолютно сухого лігніну становить 5500-6500 ккал/кг для продукту з 18-25 % вологістю, 4400-4800 ккал/кг для лігніну з 65 % вологістю, 1500-1650 ккал/кг для лігніну з вологістю більше 65 %. За фізико-хімічною характеристикою лігнін являє собою трифазну полідисперсну систему з розмірами частинок від декількох міліметрів до мікронів і менше. Дослідження лігніну, отриманих на різних заводах, показали, що склад їх характеризується в середньому наступним змістом фракцій: розміром більше 250 мкм – 54...80 %, розміром менше 250 мкм – 17...46 %, і розміром менше 1 мкм – 0,2...4,3 %. За структурою частинка гідролізного лігніну не є щільним тілом, а являє собою розвинену систему мікро- і макропор, величина його внутрішньої поверхні визначається вологістю (для вологого лігніну вона становить 760-790 $\text{m}^2/\text{г}$, а для сухого всього 6 $\text{m}^2/\text{г}$).

Як показали багаторічні дослідження і промислові випробування, проведені цілим рядом науково-дослідних, навчальних та промислових підприємств, з гідролізного лігніну можна отримувати цінні види промислової продукції. Для енергетики з вихідного гідролізного лігніну можна виготовляти брикетоване комунально-побутове та камінне паливо, а з суміші

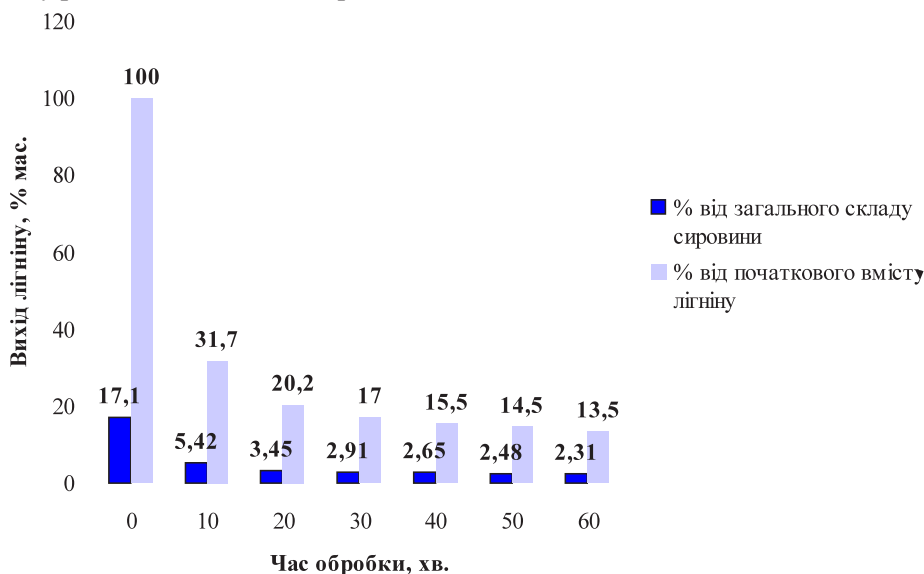


Рис. 7. Залежність виходу лігніну від тривалості обробки в дослідно-промисловій установці за наступних умов: вміст твердої речовини в лужній суспензії соломи пшеничної – 10 % мас.; температура обробки – $90\text{ }^{\circ}\text{C}$; концентрація лугу (NaOH) – 4 %; швидкість обертання ротора – 47,75 об/с; дисперсність січки соломи пшеничної в межах 100...400 мкм

Fig. 7. Dependence of lignin yield on the duration of processing in a pilot plant under the following conditions: solids content in alkaline suspension of wheat straw – 10 wt. %; processing temperature – $90\text{ }^{\circ}\text{C}$; alkali concentration (NaOH) – 4 %; rotor rotation speed – 47.75 rev/s; wheat straw chip dispersion within 100...400 μm

лігніну з відсіву вуглезбагачення – брикетоване енергетичне паливо.

Процес горіння лігніну в технологічних топках без прямої віддачі теплоти має суттєві відмінності порівняно з топками парових котлів. У них відсутня промінесприймаюча поверхня, і тому, щоб уникнути шлакування золи, потрібно ретельно розраховувати аеродинамічні режими процесу. Температура ядра факела через відсутність прямої тепловіддачі виявляється більш високою і концентрується в меншому обсязі, ніж в топках парових котлів. Для спалювання лігніну найбільш доцільно використовувати смолоскипову топку системи Шершньова, що забезпечує досить високу ефективність для палив з високим ступенем дисперсності.

Лігнін може бути ефективно використаний в якості палива для спалювання в теплогенераторі сушильного комплексу для сушіння тирси або іншої біомаси в лініях з виробництва паливної гранули пелети і паливних брикетів. Ретельно підготовлене пиловидне паливо по швидкості вигорання та повноті згоряння наближається до рідкого палива. Повне згоряння в факелі забезпечується при меншому коефіцієнті надлишку повітря, а отже, з більш високою температурою. При веденні топкового процесу з малим надлишком повітря забезпечуються вибухобезпечні умови роботи сушильного комплексу, що позитивно відрізняє сушку з прямим використанням топкових газів від способу сушіння нагрітим повітрям.

Таким чином, лігнін є прекрасним, висококалорійним паливом і легкодоступною поновлюваною сировиною для виробництва паливних гранул і брикетів.

Компанія “Прайм-біо” ввела в експлуатацію першу чергу комплексу з виробництва паливних гранул з лігніну в жовтні 2020 року. Наразі в Запоріжжі експлуатується єдине в Україні унікальне виробництво альтернативного палива з лігніну виробничою потужністю 30000 т/рік. Виробничий майданчик розташований на земельній ділянці площею 1,7 Га, на якому розташоване

виробниче приміщення площею 1500 м². Виробництво складається з наступних ділянок: ділянка просіювання – зосереджено обладнання, що дає можливість відокремлювати шкідливі домішки, які мають розмір понад 10 мм; ділянка тепло генерації – розташований теплогенератор потужністю 7 МВт, що забезпечує виробництво тепловим агентом для сушіння вологої сировини; ділянка сушіння – розташовано 2 сушильні лінії продуктивністю 2,5 т/год. сухого продукту; ділянка газоочищення – розташований рукавний фільтр, що забезпечує очищення димових газів; ділянка грануляції – встановлений комплекс обладнання з грануляції лігніну, продуктивністю 4 т/год.; ділянка видачі, на якій розташований силос готової продукції ємністю 1100 м³ та автомобільні ваги [15].

З лігноцелюлозної сировини отримано продукти на основі лігніну, такі як паливні гранули з лігніну, лігнін гідролізний дегідратований, лігнін гідролізний (рис. 8).

Характеристики зазначених продуктів представлені в таблиці 1 [15].

Висновки. Вивчено та проаналізовано існуючі технології та обладнання для гідролізу лігноцелюлозовмісної сировини для отримання лігніну, геміцелюлози, целюлози. Розглянуто їх переваги та недоліки. Запропоновано нове тепломасообмінне обладнання, а саме роторно-пульсаційні апарати, які є ефективними пристроями в різних технологіях для проведення процесів диспергування, перемішування, нагрівання, розчинення та екстрагування. Це обладнання дозволяє інтенсифікувати технологію отримання гідролізного лігніну. Для ефективного використання лігноцелюлозовмісної продукції запропоновано перспективи переробки лігніну в брикетовану лігнопродукцію і використання її в якості біоенергетичного палива для промислових підприємств, котельень, комунально-господарської сфери: малодимні паливні лігнобрикети, брикетоване лігновугілля замість деревного, паливні гранули з лігніну, енергетичні брикети з суміші з відсіву вуглезбагачення.

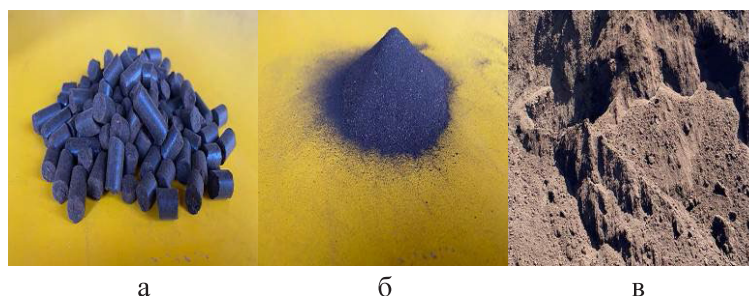


Рис. 8. Продукти на основі лігніну: паливні гранули з лігніну (а), лігнін гідролізний дегідратований (б), лігнін гідролізний (в)

Fig. 8. Lignin-based products: lignin fuel pellets (a), hydrolyzed dehydrated lignin (b), hydrolyzed lignin (c)

Табл. 1. Характеристики продуктів на основі лігніну

Table 1. Characteristics of lignin-based products

Найменування показника	Паливні гранули з лігніну	Лігнін гідролізний дегідратований	Лігнін гідролізний
Форма	паливні гранули	порошок	сирий лігнін
Загальна волога, %	до 15	до 15	до 55
Зольність, %	до 18	до 18	до 20
Масова частка загальної сірки, %	до 0,65	до 0,65	-
Вихід литких речовин, %	не менше 45	не більше 65	-
Нижча теплота згоряння, ккал/кг	не менше 3800	не менше 3800	-
Вища теплота згоряння, ккал/кг	не менше 6000	не менше 6000	-
Розмір, мм	гранули діаметром 8	частинки до 10	-
Довжина, мм	до 50	-	-

ЛІТЕРАТУРА:

1. Про внесення змін до деяких законів України щодо сприяння виробництву та використанню біологічних видів палива: Закон України від 21.05.2009 р. № 1391-VI. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.president.gov.ua/documents/1391-vi-9079m> (дата звернення: 10.03.2025).

2. Гідролізний лігнін. “Ukrbio”. [Електронний ресурс]. URL: <https://bio.ukr.bio/ua/articles/2611/> (дата звернення: 11.03.2025).

3. *Method for breaking down lignocellulosic biomass*: patent US 2016/0024227 A1: C08B1/00, C08B1/003. № 14/774818; declared 26.04.201; published 28.06.2016. 16 p.

4. *Ethanol production with dilute acid hydrolysis using partially dried lignocellulosics*: patent US 2016/0024227 A1: C12P7/10. № 10/344091; declared 06.03.2014; published 29.06.2018. 6 p.

5. *Process for fractionating lignocellulosic biomass into liquid and solid products*: patent US 2009/0176286 A1: C12P7/56, C12P7/10, C07G1/00, C07H1/08. № 12/093630; declared 15.11.2006; published 09.07.2009. 7 p.

6. *Plant-fiber-material transformation method*: patent US 2010/0126501 A1: C13K1/02. № 12/597176; declared 25.04.2008; published 27.05.2010. 10 p.

7. *Method for separating xylose from lignocelluloses rich in xylan, in particular wood*: patent US 2005/0065336 A1: C07H1/00. № 10/496853; declared 27.11.2002; published 24.03.2005. 5 p.

8. *Process for refining and producing cellulose, lignin and xylose from bio material*: patent US 2010/0200182 A1: D21C11/00. № 12/530421; declared 06.03.2008; published 12.08.2010. 4 p.

9. *Method for the acid-catalyzed depolymerization of cellulose*: patent US 2013/0239955 A1: C13K13/00. № 13/989439; declared 22.11.2011; published 19.09.2013. 3 p.

10. *Integrated process for producing biofuels*: patent US 9434962 B2: C12P7/64, C12P7/16, C12N9/42, C12N9/24, C12P7/10. № 13/333195; declared 21.12.2011; published 06.09.2016. 36 p.

11. *Method for processing lignocellulose material*: patent US 8828187 B2: C13K13/00. № 13/445894; declared 12.04.2012; published 09.09.2014. 8 p.

12. Ободович О.М., Сидоренко В.В., Булій Ю.В., Азаров С.П. Пілотне тепломасообмінне обладнання для комплексної переробки рослинних відходів в біопаливо і побічні продукти. Теплофізика та теплоенергетика. 2022. Т. 44, № 4. С. 81-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2022.10>.

13. Larysa A. Sablii, Oleksandr M. Obodovych, Vitalii V. Sydorenko, Tamila V. Sheyko. Study of wheat straw delignification in a rotary-pulsation apparatus. Acta Periodica Technologica. 2020. Vol. 51. P. 103-110. <https://doi.org/10.2298/APT2051103S>.

14. Ободович О.М., Сидоренко В.В., Переяславцева О.О., Чернявський К.Є., Хоменко В.О. Делігніфікація пшеничної соломи в технології отримання біоетанолу методом дискретно-імпульсного введення енергії Матеріали 15th International scientific and practical conference “Science, innovations and education: problems and prospects” (September 21-23, 2022). CPN Publishing Group, Tokyo, Japan. 2022. P. 53-59. <https://sci-conf.com.ua/xv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-21-23-09-2022-tokio-yaponiya-arhiv/>.

15. *Ваші паливні гранули*. “Прайм-біо”. [Електронний ресурс]. URL: <https://www.prime-bio.com/> (дата звернення: 12.03.2025).

HYDROLYZED LIGNIN – A HIGH-CALORIE FUEL AND EASILY AVAILABLE RENEWABLE RAW MATERIAL FOR THE PRODUCTION OF FUEL PELLETS AND BRIQUETTES

Obodovych O.M.¹, Stepanova O.E.², Rezakova T.A.³, Chernyavskiy K.Ye.⁴, Parchenko V.M.⁵

¹*Dr. Sci. (Engin.), Professor, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0001-7213-3118, e-mail: tdsittf@ukr.net*

²*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, orcid.org/0000-0002-7179-7251, e-mail: super-olesya2807@ukr.net*

³*PhD (Engin.), Senior Research Scientist, Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: rezakova_ittf@ukr.net*

⁴*PhD (Engin.), Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: tdsittf@ukr.net*

⁵*Institute of Engineering Thermophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, 2a, Marii Kapnist Str., Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: xbo1959@gmail.com*

<https://doi.org/10.31472/tpe.2.2025.7>

The article presents existing technologies and equipment for the hydrolysis of lignocellulosic raw materials to obtain lignin, hemicellulose, cellulose. Currently, the relevance of the issue of the production of alternative energy sources is constantly growing, because every year traditional energy sources – gas, coal, oil – become more and more difficult to extract, and this leads to a constant increase in their cost. Also, reserves of traditional energy sources are rapidly depleted, which makes the production of alternative energy sources a very promising business direction.

The purpose of the work is to study and analyze existing technologies and equipment for the production of hydrolytic lignin, develop new heat and mass exchange equipment to intensify methods of preparing lignin, consider the prospects for the further use of lignin in various industries.

The use of biomass as the main material for obtaining fuel and chemical elements has long been the subject of extensive research. As possible raw materials, cellulose and lignin are considered, which are the main components of lignocellulosic biomass.

Known methods of biomass processing, including obtaining lignin from lignocellulosic biomass, are not optimal in terms of simplicity of their implementation and the obtained product yield and therefore require their improvement. For the most part, such methods are associated with high costs for their hardware design and the creation of the necessary conditions for their implementation.

One of the ways to increase the efficiency of complex processing of lignocellulosic raw materials is the introduction of innovative energy-saving equipment, which allows increasing the degree of conversion of raw materials into main and by-products. An example of equipment that significantly intensifies heat and mass transfer in liquid multicomponent media is rotary-pulsation apparatus, which are effective devices in technologies related to mixing, homogenization, dispersion, heating, extraction, etc. The proposed use of rotary-pulsation apparatus allows for more uniform mixing of lignocellulosic raw materials with the solution and the elimination of a mixer with gearboxes for mixing, which reduces the cost of bioethanol production. The combination of the autohydrolysis process using RPA and chemical (alkaline) treatment of solid raw materials in the solution significantly affects the speed of the cellulose and lignin separation process with lower energy consumption. The proposed pilot plant is designed for preliminary preparation of lignocellulosic raw materials for hydrolysis. It is universal and can be used in various technological processes.

References 15, tables 1, figures 8.

Key words: alternative energy sources, hydrolysis, lignocellulosic raw materials, rotary-pulsation apparatus, fuel briquettes, fuel granules, intensification of heat and mass exchange processes, energy-saving heat technologies.

1. *Pro vnesennya zmin do deyakykh zakoniv Ukrayiny shchodo spryannya vyrobnytstvu ta vykorystannyu biolohichnykh vydiv palyva: Zakon Ukrayiny vid 21.05.2009 r. № 1391-VI* [On Amendments to Certain Laws of Ukraine on Promoting the Production and Use of Biofuels: Law of Ukraine No. 1391-VI of May 21, 2009]. (Electronic resource). Retrieved from <https://www.president.gov.ua/documents/1391-vi-9079m> (date of access: 10.03.2025). (in Ukr.)

2. *Hidroliznyy lihnin. “Ukrbio”* [Hydrolyzed lignin. “Ukrbio”]. (Electronic resource). Retrieved from <https://bio.ukr.bio/ua/articles/2611/> (date of access: 11.03.2025). (in Ukr.)

3. *Method for breaking down lignocellulosic biomass:* patent US 2016/0024227 A1: C08B1/00, C08B1/003. № 14/774818; declared 26.04.201; published 28.06.2016. 16 p.

4. *Ethanol production* with dilute acid hydrolysis using partially dried lignocellulosics: patent US 2016/0024227 A1: C12P7/10. № 10/344091; declared 06.03.2014; published 29.06.2018. 6 p.
5. *Process for fractionating* lignocellulosic biomass into liquid and solid products: patent US 2009/0176286 A1: C12P7/56, C12P7/10, C07G1/00, C07H1/08. № 12/093630; declared 15.11.2006; published 09.07.2009. 7 p.
6. *Plant-fiber-material* transformation method: patent US 2010/0126501 A1: C13K1/02. № 12/597176; declared 25.04.2008; published 27.05.2010. 10 p.
7. *Method for separating* xylose from lignocelluloses rich in xylan, in particular wood: patent US 2005/0065336 A1: C07H1/00. № 10/496853; declared 27.11.2002; published 24.03.2005. 5 p.
8. *Process for refining* and producing cellulose, lignin and xylose from bio material: patent US 2010/0200182 A1: D21C11/00. № 12/530421; declared 06.03.2008; published 12.08.2010. 4 p.
9. *Method for the* acid-catalyzed depolymerization of cellulose: patent US 2013/0239955 A1: C13K13/00. № 13/989439; declared 22.11.2011; published 19.09.2013. 3 p.
10. *Integrated process* for producing biofuels: patent US 9434962 B2: C12P7/64, C12P7/16, C12N9/42, C12N9/24, C12P7/10. № 13/333195; declared 21.12.2011; published 06.09.2016. 36 p.
11. *Method for processing* lignocellulose material: patent US 8828187 B2: C13K13/00. № 13/445894; declared 12.04.2012; published 09.09.2014. 8 p.
12. *Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Bulii Yu.V., Azarov S.P.* (2022). Pilotne teplomasoobminne obladnannya dlya kompleksnoyi pererobky roslinnykh vidkhodiv v biopalyvo i pobichni produkty [Pilot heat and mass exchange equipment for complex processing of plant waste into biofuel and by-products]. *Thermophysics and Thermal Power Engineering*, 44 (4), 81-88. <https://doi.org/10.31472/tpe.4.2022.10/>. (in Ukr.)
13. *Larysa A. Sablii, Oleksandr M. Obodovych, Vitalii V. Sydorenko, Tamila V. Sheyko* (2020). Study of wheat straw delignification in a rotary-pulsation apparatus. *Acta Periodica Technologica*, 51, 103-110. <https://doi.org/10.2298/APT2051103S>.
14. *Obodovych O.M., Sydorenko V.V., Pereyaslavtseva O.O., Chernyavskiy K.Ye., Khomenko V.O.* (2022). Delihnifikatsiya pshenychnoyi solomy v tekhnolohiyi otrymannya bioetanolu metodom dyskretno-impul'snoho vvedennya enerhiyi [Delignification of wheat straw in the technology of bioethanol production by the method of discrete-pulse energy input]. *Materials 15th International scientific and practical conference "Science, innovations and education: problems and prospects"* (September 21-23, 2022). CPN Publishing Group, Tokyo, Japan, 53-59. <https://sci-conf.com.ua/xv-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-21-23-09-2022-tokio-yaponiya-arhiv/>. (in Ukr.)
15. *Vashi palyvni hranuly. "Praym-bio"* [Your fuel pellets. "Prime-bio"]. (Electronic resource). Retrieved from <https://www.prime-bio.com/> (date of access: 12.03.2025). (in Ukr.)

Отримано 14.03.2025

Received 14.03.2025

Прийнято до друку 10.05.2025
Accepted for publication 10.05.2025