

ТЕХНІКО-ТЕХНОЛОГІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЛІНІЇ ВИРОБНИЦТВА ТРИБОЕЛЕКТРИЧНИХ НАНОГЕНЕРАТОРІВ ІЗ ЛУШПИННЯ ОЛІЙНИХ КУЛЬТУР

Мельник С., аспірант,

<https://orcid.org/0000-0002-8151-223X>, e-mail: stealths1978@gmail.com,
Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Україна,

Сармалаєв А., докторант,

<https://orcid.org/0009-0007-2362-8780>, e-mail: sarmalayev@gmail.com,
Алматинський технологічний університет, Казахстан,

Мельник М.,

<https://orcid.org/0000-0002-2252-2235>, e-mail: mykhaylo.melnyk@gmail.com,
ТОВ НВО «Сортувальні машини», Україна

Анотація

Мета досліджень полягає у науково-технічному обґрунтуванні методів підготовки біосировини та розробленні узагальненої схеми технологічної лінії безперервної дії для промислового виробництва трибоелектричних наногенераторів (TENG) із лушпиння олійних культур (соняшнику, конопель, льону) із забезпеченням екологічної безпеки.

Методи. Дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні методів. Бібліометричний аналіз (із використанням закономірностей Бредфорда, Лотки, Ципфа) застосовано для оцінювання стану індустріалізації TENG. Метод експертного оцінювання (із залученням фахівців олійно-жирової галузі) використано для валідації можливостей адаптації екстракційного обладнання. Методом структурно-логічного моделювання синтезовано функціональні етапи в єдину технологічну лінію.

Результати. Розроблено узагальнену технологічну схему лінії виробництва TENG. Інноваційним рішенням є інтеграція модуля попередньої екстракції олійної домішки екологічними біорозчинниками (диметилкоксоланом). Це знижує вміст ліпідів до $\leq 0,5\%$, усуваючи діелектричне екранування трибопар та відкриваючи доступ до целюлозно-лігнінової матриці. Лінію структуровано за п'ятьма модулями: попереднє магнітне та повітряно-ситове очищення (для запобігання пробоям TENG); глибоке знежирення; двоетапна механохімічна активація (кульовий млин і диспергатор) для дегломерації сировини та максимізації питомої площі поверхні нанопудри; роботизоване високоточне формування; рекуперація розчинника. Таке обладнання оптимізує фізико-хімічні параметри сировини для максимальної щільності поверхневого заряду.

Висновки. Створена технологічна схема вирішує проблему масштабування виробництва TENG, перетворюючи відходи переробки олійних культур на елементну базу для відновлюваної енергетики. Наукова цінність полягає в обґрунтуванні подолання діелектричного екранування шляхом селективного вилучення тригліцеридів. Практична цінність визначається адаптацією обладнання олійно-жирової промисловості для наноіндустрії. Перспективи подальших досліджень спрямовано на розроблення параметрів автоматизованого робототехнічного комплексу формування елементної бази TENG для галузевого машинобудування.

Ключові слова: трибоелектричні наногенератори, SFP-TENG, технологічна лінія, лушпиння олійних культур, глибока екстракція, механохімічна активація, нанопудра.

Вступ. Сучасний розвиток світової індустрії та глобальні кліматичні зміни зумовлюють високу актуальність екологічного напрямку та розроблення новітніх технологій збереження енергії. У цьому контексті особливий інтерес світової наукової спільноти викликає технологія трибоелектричних наногенераторів (TENG), які здатні ефективно перетворювати механічну енергію навколишнього середовища на електричну, забезпечуючи автономне живлення для різноманітних електронних пристроїв [Shaukat et al., 2021; Walden et al., 2022; Choi et al., 2023].

Водночас стрімке зростання попиту на такі автономні джерела відновлюваної енергії актуалізує проблему екологічної сумісності матеріалів, що використовуються для їх виготовлення. Традиційні методи утилізації супутніх відходів часто призводять до значного забруднення навколишнього природного середовища, тому для забезпечення сталого розвитку технології TENG критично важливим є впровадження та вдосконалення так званих зелених, біорозкладних та біосумісних матеріалів [Mi et al., 2022; Ahmed et al., 2024; Shen et al., 2024].

Перспективним глобальним трендом у матеріалознавстві є використання природних біополімерів — целюлози та лігніну, які містяться в рослинній біомасі та сільськогосподарських відходах. Вони є чудовим сировинним джерелом для процесів трибоелектрифікації завдяки своїй доступності та хімічній структурі. У світовій практиці вже існують успішні приклади проектування гнучких трибоелектричних пристроїв, зокрема на основі золи рисового лушпиння, а також дослідження можливостей застосування порошку соняшникового лушпиння для збирання енергії [Vikram et al., 2025].

Для сьогодення таких потужних аграрних країн, як Україна та Казахстан, дослідження у сфері циркулярної економіки та енергетичної утилізації відходів переробної промисловості мають виняткове значення. Насіння соняшнику традиційно вирощується у значних обсягах в Украї-

ні, тоді як Казахстан активно нарощує виробничі площі соняшнику, конопель та льону. Наприклад, в Україні лише за 2024/25 маркетинговий рік обсяги генерації лушпиння соняшнику досягли понад 2,1 млн т (приблизно 16,89 % від загальної маси переробленого насіння). З економічної та екологічної точок зору, таке лушпиння олійних культур є надзвичайно вигідним і корисним матеріалом для масового виробництва елементної бази TENG.

Водночас, попри значну кількість фундаментальних світових розробок у сфері створення лабораторних зразків наногенераторів, рівень промислового втілення та індустріалізації їх виробництва залишається невисоким. Аналіз наукової літератури свідчить, що наявні пропозиції технічного забезпечення мають фрагментарний характер. Серйозний технологічний виклик під час використання сировини рослинної сировини — негативний вплив супутніх домішок, зокрема залишкових тригліцеридів та протеїнів (олійної домішки), які суттєво знижують діелектричні та трибоелектричні показники кінцевого наноматеріалу. Сьогодні практично відсутні комплексні інженерні рішення та узагальнені технологічні схеми ліній безперервної дії, які б забезпечували повний цикл підготовки сировини, її глибоке деоліювання та механохімічну активацію для потреб наноіндустрії.

Невирішеність зазначених аспектів технічного оснащення обмежує масштабне використання відновлюваної біосировини у промисловому виробництві засобів альтернативної енергетики, що обумовлює актуальність цього дослідження.

Мета дослідження — науково-технічне обґрунтування вибору методів підготовки рослинної біосировини та розроблення узагальненої схеми технологічної лінії промислового виробництва трибоелектричних наногенераторів із лушпиння олійних культур із забезпеченням замкнутого екологічного циклу та стабільно високої якості кінцевого наноматеріалу.

Методи і матеріали. Гіпотеза дослі-

дження базується на припущенні, що формування екологічно безпечної та технологічно ефективної лінії виготовлення трибоелектричних наногенераторів (TENG) на базі рослинної сировини можливе за умови інтеграції етапу попередньої глибокої екстракції ліпідів з лушпиння, що дасть змогу максимізувати трибоелектричні властивості целюлозно-лігнінової матриці.

Предмет дослідження — технологічні процеси та лінії переробки лушпиння олійних культур (зокрема соняшнику, конопель та льону) з метою їх подальшого використання як елементної бази для виготовлення TENG.

Дослідження ґрунтується на комплексному застосуванні загальнонаукових та конкретнонаукових методів:

— бібліометричний та системний аналіз: для визначення поточного стану розробок у сфері індустріалізації TENG використано методи Бредфорда, Лотки та Ципфа [Ланде та ін. 2018]. За допомогою цих статистичних закономірностей розподілу частоти вживання термінів було відфільтровано нерелевантні джерела та окреслено обмежену кількість ключових статей. Аналіз зосереджено здебільшого на публікаціях у топових журналах, де щільність тематичних статей найвища, а також у фахових виданнях з матеріалознавства та прикладної фізики за останні роки;

— експертне оцінювання: для валідації можливостей використання наявних конструкцій ліній олійно-жирового виробництва у новій технологічній схемі було залучено 10 провідних спеціалістів відповідної галузі. Експертам було запропоновано оцінити доцільність використання наявного екстракційного та сепараційного обладнання з погляду екобезпеки (зокрема, використання зелених розчинників) та технологічної сумісності;

— метод структурно-логічного моделювання: використано для синтезу окремих функціональних етапів (попереднє очищення, екстракція, диспергація, одержання нанопудри та рекуперація розчинника) в єдину узагальнену технологічну

лінію безперервної дії.

Результати. На основі проведеного аналізу та експертного оцінювання існуючого екстракційного обладнання, авторами розроблено та обґрунтовано узагальнену технологічну схему лінії виробництва трибоелектричних наногенераторів на базі лушпиння олійних культур (рис. 1).

Головна інноваційна відмінність та технологічна перевага запропонованої схеми — інтеграція блоку попередньої екстракції олійної домішки, що дає змогу суттєво підвищити трибоелектричні властивості кінцевого наноматеріалу шляхом видалення залишкових ліпідів, які діють як діелектричні ізолятори.

Теоретичне оцінювання адекватності запропонованої технологічної моделі базується на розбитті процесу на взаємопов'язані функціональні модулі, кожен з яких вирішує окреме технологічне завдання:

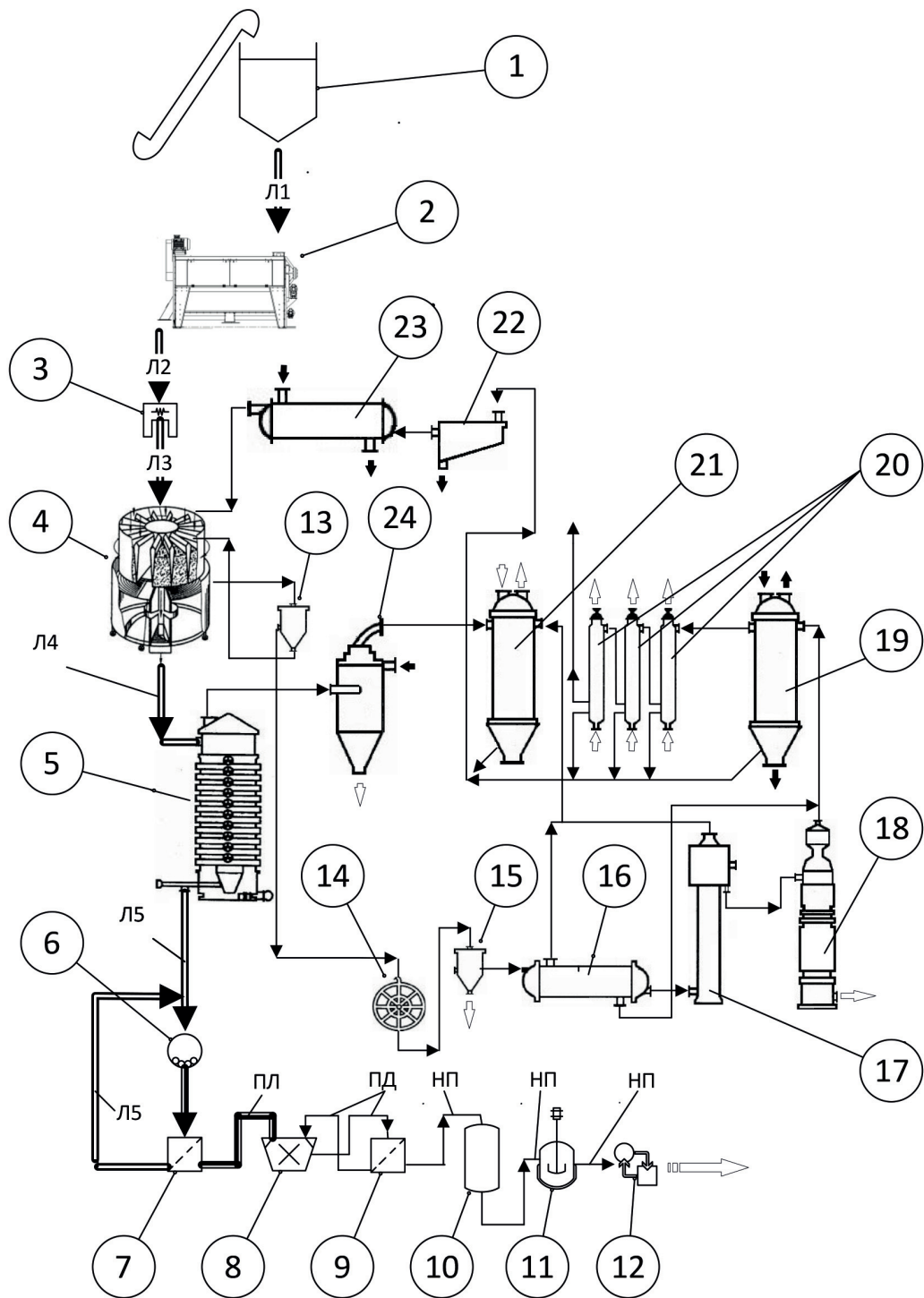
1. Модуль попереднього очищення (поз. 1-3): забезпечує видалення феромагнітних та сміттєвих домішок, що є критично важливим для запобігання механічним пошкодженням TENG і забезпечення чистоти трибоелектричного шару.

2. Модуль екстракції (поз. 4-5): застосування екстрактора і тостера дає змогу перевести лушпиння у стан глибокого знежирення (деоліювання). Вилучення тригліцеридів відкриває доступ до целюлозно-лігнінової матриці, яка є основним джерелом трибоелектрифікації сировини.

3. Модуль диспергації та отримання нанопудри (поз. 6-11): використання кульового барабанного млина в комплексі з диспергатором забезпечує механохімічну активацію частинок. Це дає змогу досягти необхідної питомої площі поверхні нанопудри, що прямо пропорційно впливає на щільність поверхневого заряду TENG під час контактно-відривних циклів.

4. Модуль формування (поз. 12): застосування автоматизованого формувально-зварювального робота гарантує високоточне нанесення нанопудри на струмопровідні підкладки, забезпечуючи відтворюваність характеристик генераторів.

5. Модуль рекуперації розчинни-



1 – бункер лушпиння; 2 – бітер сепаратор; 3 – сепаратор магнітний; 4 – екстрактор; 5 – тостер; 6 – кульовий барабанний млин; 7 – фільтр; 8 – диспергатор; 9 – фільтр; 10 – ємність нанопудри; 11 – фідер-дозатор нанопудри; 12 – формувально-зварювальний робот; 13 – місцелозбірник; 14 – фільтр; 15 – місцелозбірник; 16 – підігрівач місцели; 17 – дистилятор; 18 – дистилятор, 19 – конденсатор водяний; 20 – дефлегматор; 21 – конденсатор водяний; 22 – водовіддільник; 23 – підігрівач розчинника; 24 – пастка для лушпиння. Перелік позначень матеріальних потоків: Л1 – лушпиння, очищене від олійної домішки до рівня 0,5%; Л2 – лушпиння без олійної домішки; Л3 – лушпиння, очищене від феромагнітних домішок; Л4 – лушпиння з розчинником; Л5 – лушпиння деолійне; ПЛ – пил лушпиння; ПД – пудра; НП – нанопудра

Рисунок 1 – Узагальнена схема технологічної лінії виробництва трибоелектричних наногенераторів із лушпиння олійних культур

Таблиця 1 – Науково-технічне обґрунтування методів підготовки рослинної біосировини для ліній виробництва TENG

Функціональний модуль лінії	Обраний метод / обладнання	Фізико-хімічне та інженерне обґрунтування вибору	Цільовий показник / Технологічний ефект
Попереднє очищення (поз. 1–3)	Повітряно-ситова та магнітна сепарація (бітер-сепаратор, магнітний сепаратор)	Вилучення мінеральних, пилових та феромагнітних домішок із вихідного лушпиння.	Запобігання механічним пошкодженням обладнання та електричному пробію елементної бази TENG.
Глибоке знежирення (поз. 4–5)	Екстракція селективними екологічними розчинниками (DES/NADES, диметилзоксалан)	Видалення тригліцеридів і протеїнів, які діють як діелектричні ізолятори навколо рослинних волокон.	Зниження вмісту олійної домішки до рівня $\leq 0,5\%$ (потік Л1); повне відкриття целюлозно-лігнінової матриці.
Механохімічна активація (поз. 6–11)	Двоетапне подрібнення (кульовий барабанний млин + гідродинамічний диспергатор)	Подолання високої еластичності та волокнистості лігнін-целюлозного комплексу рослинних клітин.	Послідовне перетворення сировини на пудру (ПД), а потім – на дегломеровану нанопудру (НП) з максимальною питомою поверхнею.
Елементне формування (поз. 12)	Роботизоване нанесення (формувальнотварювальний робот)	Заміна дискретних ручних операцій автоматизованим безперервним циклом зварювання та пресування.	Стабілізація товщини трибоелектричного шару, відтворюваність електрофізичних характеристик TENG.
Рекуперація компонентів (поз. 13–24)	Багатоступенева дистиляція та водяна конденсація	Створення замкнутого контуру циркуляції екстрагенту з уловлюванням парів.	Екологічна безпека процесу, мінімізація викидів VOC (летких органічних сполук), зниження собівартості.

ка (поз. 13–24): забезпечує екологічну та економічну доцільність лінії. Замкнутий цикл дистиляції та конденсації мінімізує викиди летких органічних сполук, що відповідає сучасним концепціям «зеленого» виробництва.

Для систематизації та наочного представлення отриманих результатів техніко-технологічні параметри обґрунтування методів підготовки біосировини зведено в таблицю 1.

Отже, розроблена технологічна схема концептуально вирішує проблему масштабування виробництва елементної бази TENG, поєднуючи екологічну утилізацію відходів олійно-жирової промисловості з генерацією відновлюваної енергії.

Обговорення. Широке впровадження нанотехнологій у різних сферах, зокре-

ма сільському господарстві та переробній промисловості, відкриває значні перспективи для сталого розвитку й енергозбереження [Kumar, Tyagi et al., 2024; Shukla et al., 2024]. Однак аналіз наукових публікацій свідчить про те, що відкритий доступ до передових результатів досліджень у цій галузі є частково обмеженим і становить у середньому 60–70 %. Для технологічних схем проектування елементної бази SFP-TENG характерна спадна ефективність профільних видань, де тематичні публікації розпорошені за трьома основними зонами з різною щільністю статей. Перспективний екологічний тренд — використання рослинної біомаси, багатой на целюлозу та лігнін як відновлюваного сировинного джерела для процесів трибоелектрифікації [Troncoso et al., 2023]. Водночас суттєвим

викликом є негативний вплив природних домішок у сирій біомасі, які здатні значно знижувати електрофізичні показники наноматеріалів [Park et al., 2024].

Як зазначають дослідники [Raja et al., 2023], ключовою проблемою впровадження TENG є незадовільна екологічна сумісність деяких конструкційних матеріалів. Для подолання цього бар'єру пропонується активне вдосконалення «зелених» технологій, а систематичний огляд прогресу в сфері екологічно безпечних матеріалів є критично важливим для сталого розвитку альтернативної енергетики. Різні типи відновлюваної сировини, включаючи харчові відходи, органи рослин та природну целюлозу, потребують ретельної класифікації у межах діючих ліній переробки. Традиційні методи утилізації таких відходів супроводжуються вилученням великих земельних площ та забрудненням атмосферного повітря, водних ресурсів і ґрунтів. Натомість перетворення біовідходів на електричну енергію мінімізує антропогенне навантаження, забезпечуючи ефективне накопичення заряду в умовах постійно зростаючого попиту на автономні джерела живлення.

У світовій практиці відомі спроби проектування гнучких трибоелектричних пристроїв, наприклад на основі поєднання золи рисового лушпиння та полівінілідентфториду [Kar et al., 2024], де мікроструктурний кремній покращує електроактивну фазу композиту. Однак суттєвий технологічний недолік таких систем — обмежена біорозкладність, яка стосується лише наповнювача, а не всього приладу в цілому. Застосування пластикових або комбінованих відходів як трибопар дає змогу досягти високої ефективності генерації [Kumar, Najra et al., 2024], однак питання екологічності та утилізації таких напівсинтетичних пристроїв залишається невирішеним. Загалом концепція перетворення відходів на енергію дає змогу інтегрувати широкий спектр біоматеріалів [Pan & Lee, 2021], які є екологічно чистими та здатними до повного саморозкладання, проте на шляху їх масового використання існують

значні інженерні перешкоди.

Проведений огляд літератури підтверджує низький рівень промислового втілення та масштабування ліній виробництва TENG безпосередньо з рослинного лушпиння. Попри теоретичну безмежність використання нанотехнологій у галузевому машинобудуванні та технічному сервісі, практичні пропозиції щодо їх інструментального забезпечення мають фрагментарний характер. Відомі аналоги, такі як лінія пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин із програмованими параметрами [Бардадим та ін., 2024] або лінія виробництва торрифікованої продукції [Мельник та ін., 2025], доводять високу ефективність сортувальних комплексів для покращення якості вихідного лушпиння. З позицій екологічності виробництва особливе значення має процес екстракції тригліцеридів. Використання традиційних токсичних і дорогих нафтових розчинників поступається місцем глибоким евтектичним розчинникам (DES/NADES) [Hikmawanti et al., 2021]. Більше того, впровадження інноваційної технології EcoXtract® із застосуванням 100 % рослинного розчинника диметиллоксолану [Carré, 2021], яка наразі перебуває на стадії експериментально-промислового освоєння, вже продемонструвало успішну роботу на підприємствах Великобританії та Мексики.

Найближчі за інженерною логікою до розробленої схеми — вітчизняні технічні рішення для технологічних ліній пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин з програмованими параметрами [Бардадим та ін., 2024] та ліній виробництва торрифікованої продукції [Мельник та ін., 2025]. Головна спільна риса — обов'язкове попереднє вилучення із лушпиння олійної домішки, яка є основним джерелом тригліцеридів та протеїнів. Однак, на відміну від зазначених аналогів, у запропонованій узагальненій схемі цей етап глибокого деоліювання безпосередньо інтегровано у безперервний цикл механохімічної активації біосировини. Це дає змогу повністю усу-

нути діелектричний екран навколо целюлозних волокон і поєднати процеси глибокого очищення, подрібнення до нанорівня та роботизованого формування елементної бази TENG у межах єдиного екологічно безпечного виробничого контуру.

Висновки. У роботі розроблено та науково-технічно обґрунтовано узагальнену технологічну схему промислової лінії безперервної дії для виробництва трибоелектричних наногенераторів (SFP-TENG) із відновлюваної біосировини — лущиння олійних культур (соняшнику, конопель, льону). Основний конструктивний результат — інтеграція модуля глибокого деоліювання (екстракції) безпосередньо у контур механохімічної активації рослинних волокон, що дає змогу знизити залишковий вміст ліпідів до критичного рівня $\leq 0,5\%$.

Наукова цінність дослідження полягає в обґрунтуванні механізму подолання ефекту діелектричного екранування трибопар шляхом селективного вилучення тригліцеридів та протеїнів зі збереженням цілісності лігнін-целюлозної матриці рослинних клітин. Практична цінність роботи полягає у систематизації інженерних параметрів підготовки сировини та визначенні можливостей адаптації наявного сепараційного та екстракційного обладнання олійно-жирової промисловості для потреб наноіндустрії.

Можливі сфери застосування отриманих результатів — галузі сільськогосподарського машинобудування, відновлюваної енергетики та циркулярної економіки, зокрема підприємства агропромислового комплексу, що спеціалізуються на екологічній утилізації та глибокій переробці багатотоннажних рослинних відходів.

Перспективи подальших досліджень у цьому напрямі пов'язані з розробленням та оптимізацією параметрів автоматизованого робототехнічного комплексу (формуально-зварювального робота) для високоточного нанесення нанопудри та герметизації елементної бази TENG, що потребує проведення додаткових науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт у сфері галузевого машинобудування.

Перелік літератури

Бардадим В.К., Кудрявцев І.М., Бардадим О.В., Ярошкін В.П., Мельник С.М., Мельник М.М. (2024). Технологічна лінія пресування соняшникової олії повного циклу на базі адаптивних сортувальних машин із програмованими параметрами: Патент 155727 Україна: МПК (2024.01) A01F 12/44, B07B 4/02, B07B 9/00, B07B 9/02, B07B 13/14, B07B 15/00, B30B 9/02. № у 2023 03069; заяв. 23.06.2023; опуб. 03.04.2024; Бюл. №14. 16 с.

Ланде Д.В., Субач І.Ю., Бояринова Ю.Є. *Основи теорії і практики інтелектуального аналізу даних у сфері кібербезпеки: навчальний посібник*. К.: ІСЗІ КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2018. 297 с. <http://dwl.kiev.ua/art/oiad/oiad.pdf>

Мельник С.М., Бардадим В.К., Кудрявцев І.М., Бардадим О.В., Мельник М.М. (2025). Технологічна лінія виробництва торрифікованої продукції. Заявка № у 2025 05530, Україна. МПК (2024.01): A01F 12/44 (2006.01), B07B 4/02 (2006.01), B07B 9/00, B07B 9/02 (2006.01), B01B 13/14 (2006.01), B07B 15/00, B30B 9/02 (2006.01), заявл.11.11.2025.

Ahmed, A. A., Qahtan, T. F., Owolabi, T. O., Agunloye, A. O., Rashid, M., & Ali, M. S. M. (2024). Waste to sustainable energy based on TENG technology: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141354>

Carré, P. (2021). About solvents used in the preparation of oils for cosmetic products complying with the Cosmos standard. *OCL*, 28, 16. <https://doi.org/10.1051/ocl/2021003>

Choi, D., Lee, Y., Lin, Z. H., Cho, S., Kim, M., Ao, C. K., ... & Choi, D. (2023). Recent advances in triboelectric nanogenerators: from technological progress to commercial applications. *ACS nano*, 17(12), 11087-11219. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12458>

Hikmawanti, N. P. E.; Ramadan, D.; Jantan, I.; Mun'im, A. (2021). Natural Deep Eutectic Solvents (NADES): Phytochemical Extraction Performance Enhancers for Pharmaceutical and Nutraceutical Product Development. *Plants*, 10, 2091. <https://doi.org/10.3390/plants10102091>

- Kar, E., Maity, S., Kar, A. et al. (2024). Agricultural waste rice husk/poly(vinylidene fluoride) composite: a wearable triboelectric energy harvester for real-time smart IoT applications. *Adv Compos Hybrid Mater* 7, 87. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00896-5>
- Kumar, A., Tyagi, P. K., Tyagi, S., & Ghorbanpour, M. (2024). Integrating green nanotechnology with sustainable development goals: a pathway to sustainable innovation. *Discover Sustainability*, 5(1), 364. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00610-x>
- Kumar, K.U., Hajra, S., Mohana Rani, G. et al. (2024). Revolutionizing waste-to-energy: harnessing the power of triboelectric nanogenerators. *Adv Compos Hybrid Mater* 7, 91. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00903-9>
- Mi, Y., Lu, Y., Shi, Y., Zhao, Z., Wang, X., Meng, J., ... & Wang, N. (2022). Biodegradable polymers in triboelectric nanogenerators. *Polymers*, 15(1), 222. <https://doi.org/10.3390/polym15010222>
- Pan, H., & Lee, T.W. (2021). Recent progress in development of wearable pressure sensors derived from biological materials. *Advanced healthcare materials*, 10(17). <https://doi.org/10.1002/adhm.202100460>
- Park, C. H., & Kim, M. P. (2024). Advanced triboelectric applications of biomass-derived materials: a comprehensive review. *Materials*, 17(9), 1964. <https://doi.org/10.3390/ma17091964>
- Raja, V., Dutta, S., Murugesan, P. et al. (2023). Electricity production using food waste: a review. *Environ Chem Lett* 21, 839-864. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01555-1>
- Shaukat, R. A., Saqib, Q. M., Khan, M. U., Chougale, M. Y., & Bae, J. (2021). Bio-waste sunflower husks powder based recycled triboelectric nanogenerator for energy harvesting. *Energy Reports*, 7, 724-731. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.036>
- Shen, A., Xuan, H., Jia, Y., Gu, S., Neisiany, R. E., Shu, W., ... & You, Z. (2024). Dynamic healing-assembly for biocompatible, biodegradable, stretchable and self-healing triboelectric nanogenerators. *Chemical Engineering Journal*, 491, 151896. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151896>
- Shukla, K., Mishra, V., Singh, J., Varshney, V., Verma, R., & Srivastava, S. (2024). Nanotechnology in sustainable agriculture: A double-edged sword. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(10), 5675-5688. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13342>
- Troncoso, O. P., Corman-Hijar, J. I., & Torres, F. G. (2023). Lignocellulosic biomass for the fabrication of triboelectric nano-generators (TENGs) – A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15784. <https://doi.org/10.3390/ijms242115784>
- Vikram, L. S., Potu, S., Kasireddi AK, D. P., Khanapuram, U. K., Divi, H., & Rajaboina, R. K. (2025). Biowaste Sea Shells-Based Triboelectric Nanogenerator: Sustainable Approach for Efficient Mechanical Energy Harvesting. *Energy Technology*, 13(5), 2401333. <https://doi.org/10.1002/ente.202401333>
- Walden, R., Kumar, C., Mulvihill, D. M., & Pillai, S. C. (2022). Opportunities and challenges in triboelectric nanogenerator (TENG) based sustainable energy generation technologies: a mini-review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100237>

References

- Ahmed, A. A., Qahtan, T. F., Owolabi, T. O., Agunloye, A. O., Rashid, M., & Ali, M. S. M. (2024). Waste to sustainable energy based on TENG technology: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 448. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.141354>
- Bardadym, V. K., Kudriavtsev, I. M., Bardadym, O. V., Yaroshkin, V. P., Melnyk, S. M., & Melnyk, M. M. (2024). Technological line for full-cycle sunflower oil pressing based on adaptive sorting machines with programmable parameters (Patent No. 155727, Ukraine). IPC A01F 12/44, B07B 4/02, B07B 9/00, B07B 9/02, B07B 13/14, B07B 15/00, B30B 9/02. Application No. u 2023 03069, filed June 23, 2023, published April 3, 2024, Bulletin No. 14, 16 pp.
- Carré, P. (2021). About solvents used in the preparation of oils for cosmetic products complying with the Cosmos standard. OCL, 28, 16. <https://doi.org/10.1051/ocl/2021003>
- Choi, D., Lee, Y., Lin, Z. H., Cho, S., Kim, M., Ao, C. K., & Choi, D. (2023). Recent advances in triboelectric nanogenerators:

from technological progress to commercial applications. *ACS nano*, 17(12), 11087-11219. <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c12458>

Hikmawanti, N. P. E.; Ramadan, D.; Jantan, I.; Mun'im, A. (2021). Natural Deep Eutectic Solvents (NADES): Phytochemical Extraction Performance Enhancers for Pharmaceutical and Nutraceutical Product Development. *Plants*, 10, 2091. <https://doi.org/10.3390/plants10102091>

Kar, E., Maity, S., Kar, A. et al. (2024). Agricultural waste rice husk/poly(vinylidene fluoride) composite: a wearable triboelectric energy harvester for real-time smart IoT applications. *Adv Compos Hybrid Mater* 7, 87. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00896-5>

Kumar, A., Tyagi, P. K., Tyagi, S., & Ghorbanpour, M. (2024). Integrating green nanotechnology with sustainable development goals: a pathway to sustainable innovation. *Discover Sustainability*, 5(1), 364. <https://doi.org/10.1007/s43621-024-00610-x>

Kumar, K.U., Hajra, S., Mohana Rani, G. et al. (2024). Revolutionizing waste-to-energy: harnessing the power of triboelectric nanogenerators. *Adv Compos Hybrid Mater* 7, 91. <https://doi.org/10.1007/s42114-024-00903-9>

Lande, D. V., Subach, I. Yu., & Boyarynova, Yu. Ye. (2018). Fundamentals of the theory and practice of intelligent data analysis in the field of cybersecurity [Textbook]. Institute of Special Communications and Information Protection of Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute. <http://dwl.kiev.ua/art/oiaid/oiaid.pdf>

Melnyk, S. M., Bardadym, V. K., Kudriavtsev, I. M., Bardadym, O. V., & Melnyk, M. M. (2025). Technological line for the production of torrefied products (Patent Application No. u 2025 05530, Ukraine). IPC A01F 12/44, B07B 4/02, B07B 9/00, B07B 9/02, B01B 13/14, B07B 15/00, B30B 9/02. Filed November 11, 2025.

Mi, Y., Lu, Y., Shi, Y., Zhao, Z., Wang, X., Meng, J., ... & Wang, N. (2022). Biodegradable polymers in triboelectric nanogenerators. *Polymers*, 15(1), 222. <https://doi.org/10.3390/polym15010222>

Pan, H., & Lee, T.W. (2021). Recent progress in development of wearable pressure sensors derived from biological materials. *Advanced healthcare materials*, 10(17). <https://doi.org/10.1002/adhm.202100460>

Advanced healthcare materials, 10(17). <https://doi.org/10.1002/adhm.202100460>

Park, C. H., & Kim, M. P. (2024). Advanced triboelectric applications of biomass-derived materials: a comprehensive review. *Materials*, 17(9), 1964. <https://doi.org/10.3390/ma17091964>

Raja, V., Dutta, S., Murugesan, P. et al. (2023). Electricity production using food waste: a review. *Environ Chem Lett* 21, 839-864. <https://doi.org/10.1007/s10311-022-01555-1>

Shaukat, R. A., Saqib, Q. M., Khan, M. U., Chougale, M. Y., & Bae, J. (2021). Bio-waste sunflower husks powder based recycled triboelectric nanogenerator for energy harvesting. *Energy Reports*, 7, 724-731. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.01.036>

Shen, A., Xuan, H., Jia, Y., Gu, S., Neisiany, R. E., Shu, W., ... & You, Z. (2024). Dynamic healing-assembly for biocompatible, biodegradable, stretchable and self-healing triboelectric nanogenerators. *Chemical Engineering Journal*, 491, 151896. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2024.151896>

Shukla, K., Mishra, V., Singh, J., Varshney, V., Verma, R., & Srivastava, S. (2024). Nanotechnology in sustainable agriculture: A double-edged sword. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 104(10), 5675-5688. <https://doi.org/10.1002/jsfa.13342>

Troncoso, O. P., Corman-Hijar, J. I., & Torres, F. G. (2023). Lignocellulosic biomass for the fabrication of triboelectric nanogenerators (TEGs) – A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 24(21), 15784. <https://doi.org/10.3390/ijms242115784>

Vikram, L. S., Potu, S., Kasireddi AK, D. P., Khanapuram, U. K., Divi, H., & Rajaboina, R. K. (2025). Biowaste Sea Shells-Based Triboelectric Nanogenerator: Sustainable Approach for Efficient Mechanical Energy Harvesting. *Energy Technology*, 13(5), 2401333. <https://doi.org/10.1002/ente.202401333>

Walden, R., Kumar, C., Mulvihill, D. M., & Pillai, S. C. (2022). Opportunities and challenges in triboelectric nanogenerator (TENG) based sustainable energy generation technologies: a mini-review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9, 100237. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100237>

*Надійшла до редакції 04.05.2026 р.;
переглянуто 07.05.2026 р.;
прийнято до друку 25.05.2026 р.;
опубліковано 29.06.2026 р.*

*Received 05/04/2026;
revised 05/07/2026;
accepted 05/25/2026;
published 06/29/2026*

UDC 631.36:631.57:620.3

TECHNICAL AND TECHNOLOGICAL JUSTIFICATION OF A PRODUCTION LINE FOR TRIBOELECTRIC NANOGENERATORS FROM OILSEED HUSKS

Melnyk S., postgraduate student,
<https://orcid.org/0000-0002-8151-223X>, e-mail: stealths1978@gmail.com,
Dnipro State Agrarian and Economic University, Ukraine

Sarmalayev A., doctoral student,
<https://orcid.org/0009-0007-2362-8780>, e-mail: sarmalayev@gmail.com
Almaty Technological University, Kazakhstan

Melnyk M., Technical Director,
<https://orcid.org/0000-0002-2252-2235>, e-mail: mykhaylo.melnyk@gmail.com,
Sorting Machines R&D LLC, Ukraine.

Summary

The purpose of the study is the scientific and technical justification of biowaste preparation methods and the development of a generalized scheme of a continuous technological line for the industrial production of triboelectric nanogenerators (TENG) from oilseed husks (sunflower, hemp, flax) while ensuring environmental safety.

Methods. The research is based on a comprehensive application of methods. Bibliometric analysis (utilizing Bradford's, Lotka's, and Zipf's laws) was applied to evaluate the state of TENG industrialization. The expert assessment method (involving specialists from the oil and fat industry) was used to validate the possibilities of adapting extraction equipment. The method of structural-logical modeling was used to synthesize functional stages into a single technological line.

Results. A generalized technological scheme of the TENG production line has been developed. An innovative solution is the integration of a preliminary oil impurity extraction module using eco-friendly bio-based solvents, specifically dimethyloxolane. This reduces the lipid content to $\leq 0.5\%$, eliminating the dielectric shielding of tribopairs and opening access to the cellulose-lignin matrix. The line is structured into five modules: preliminary magnetic and air-sieve cleaning to prevent TENG breakdowns; deep degreasing; two-stage mechanochemical activation (ball mill and disperser) for raw material deglomeration and maximization of the specific surface area of the nanopowder; robotic high-precision forming; and solvent recovery. Such equipment optimizes the physicochemical parameters of the raw material for maximum surface charge density.

Conclusions. The created technological scheme addresses the problem of scaling TENG production, converting oilseed processing waste into an element base for renewable energy. The scientific value lies in justifying the elimination of dielectric shielding through the selective removal of triglycerides. The practical value is determined by the adaptation of oil and fat industry equipment for the nanoindustry. Future research prospects are aimed at developing the parameters of an automated robotic complex for forming the TENG element base for industrial mechanical engineering.

Keywords: triboelectric nanogenerators, SFP-TENG, technological line, oilseed husks, deep extraction, mechanochemical activation, nanopowder.