

DOI <https://doi.org/10.32782/2078-0877-2026-26-1-21>

УДК 621.928:665.3:621.923.1:004.94

В. А. Самохвал<sup>1</sup>

ORCID: 0000-0001-5539-3647

І. М. Білоус<sup>2</sup>, д-р філософії

ORCID: 0000-0001-9635-6631

<sup>1</sup> Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного<sup>2</sup> Дніпровський державний аграрно-економічний університет

e-mail: samohvalvitaliy@gmail.com

## РЕЗУЛЬТАТИ ЧИСЕЛЬНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРЕСУВАННЯ БРИКЕТІВ І ВІДЖИМУ ОЛІЇ У ШНЕКОВОМУ ПРЕСІ

*Анотація.* У статті представлено комплексну методику чисельного моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі на основі інтегрованого підходу DEM–CFD. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю підвищення енергоефективності технологій переробки біомаси та вдосконалення конструктивно-технологічних параметрів брикетувального обладнання. Моделювання виконано в програмному середовищі STAR-CCM+ з урахуванням взаємодії твердих частинок рослинної сировини та міжчастинної рідкої фази, що дозволило відтворити реальну фізику процесів ущільнення, формування тиску та витиснення рідини. На основі повнофакторного чисельного експерименту побудовано регресійні моделі другого порядку для продуктивності преса, щільності сформованого брикету та кількості виділеної олії залежно від частоти обертання шнека, кроку завантажувального шнека та довжини формувального пристрою. Проведений аналіз показав нелінійний і багатокритеріальний характер процесу брикетування, наявність компромісу між показниками продуктивності, якості брикету та інтенсивності виділення рідкої фази. Отримані результати підтверджують адекватність застосованого DEM–CFD підходу та можуть бути використані для оптимізації режимів роботи й конструктивних параметрів шнекових пресів з метою підвищення ефективності виробництва твердого біопалива.

*Ключові слова:* біомаса, паливні брикети, шнековий прес, чисельне моделювання, DEM–CFD, продуктивність, щільність брикету, витиснення олії.

*Постановка проблеми.* Загальносвітова енергетична ситуація залишається критичною: нині понад 80 % первинної енергії забезпечується викопним паливом, що призводить до вичерпання запасів і зростання викидів парникових газів [1]. Водночас поновлювані джерела енергії, зокрема біомаса, набувають дедалі більшої ролі у сталому енергоспоживанні. За даними Всесвітньої асоціації біоенергетики, частка відновлюваної енергії у глобальному енергопостачанні становить ~15 %, а внесок твердого біопалива (біоенергії) досягає рекордних 56 ЕДж (~9 %) [1]. Біоенергію розглядають як невичерпне і довгострокове джерело, здатне пом'якшити проблеми вичерпання вуглецевих ресурсів [2]. Проте сировина біомаси (солота, лушпиння, деревні відходи тощо) зазвичай має низьку питому енергетичну щільність і великий вологовміст, що ускладнює її збір, транспортування та ефективне спалювання. Утворення компактних твердих брикетів із таких матеріалів суттєво підвищує їхню енергетичну цінність і покращує експлуатаційні властивості палива. Зокрема, брикетоване паливо характеризується значно вищою теплотворною здатністю і нижчим вмістом золи порівняно з вихідною сировиною чи вугіллям [2]. Таким чином, брикетування біомаси сприяє вирішенню проблеми низької щільності палива та є перспективним шляхом підвищення енергоефективності та зменшення екологічного впливу.

Попри очевидні переваги, технологія виробництва паливних брикетів вимагає ретельного налаштування обладнання та параметрів процесу. Шнекові екструдери широко застосовуються для ущільнення біомаси завдяки можливості безперервної роботи та ефективного витискання



вологи, проте їх конструкція та експлуатаційні режими потребують оптимізації. Наявні підходи до аналізу роботи брикетувальних машин часто покладаються на емпіричні спостереження або спрощені моделі, що не враховують комплексного характеру взаємодії твердої фази (частинок біомаси) з рідинною фазою (волога або інші компоненти). Відсутність детальних чисельних моделей, які б одночасно описували рух частинок і фільтрацію рідини під високим тиском, гальмує розвиток енергоефективних конструкцій екструдерів. Це визначає актуальність розробки і використання комплексних методів моделювання процесу брикетування з урахуванням усіх ключових фізичних явищ.

*Аналіз останніх досліджень.* У роботах останніх років числові методи дедалі активніше застосовують для моделювання процесів ущільнення біомаси. Так, Ning та співавт. зазначають, що використовують FEM, DEM або їх поєднання для імітації процесів брикетування біомаси, що дає змогу вивчати закономірності руху та деформації матеріалу й оптимізувати конструкцію прес-форм [3]. Зокрема, найраніші установки для формування палива – це шнекові преси з нагрівом матриці (150–300 °C), а також плоскі та кільцеві матричні преси. Нерівномірність контакту частинок із поверхнями пресу та їхня нелінійна деформація вимагають використання як неперервних (FEM), так і дискретних (DEM) моделей [3].

Bembenek та співавт. продемонстрували ефективність DEM-моделювання для роликів пресів. Використавши програму Altair EDEM, вони змоделювали процес ущільнення тонкодисперсного матеріалу між роликками, показавши, що DEM коректно відображає поля напружень і контакту в зоні деформації роликкового преса [4]. Результати дозволили врахувати характеристики частинок (розмір, фізично-механічні властивості) і визначити енергетичні параметри ущільнення. Автори робіт наголошують, що DEM-моделі допомагають прискорити розробку пресового обладнання та технологічних процесів брикетування шляхом ітеративного аналізу напружень і зносу поверхонь пресів [4].

Для шнекових пресів, які широко використовують для брикетування волокнистої біомаси, чисельних досліджень менше, проте окремі роботи відзначають важливість аналізу напружень у шнеку та матриці. Так, в огляді Ning та співавт. згадується, що шнекові преси формують брикети за рахунок поступово обертового нагрітого шнека [3]. Аналіз стресів та руху біомаси у шнековому екструдері показав, що максимальні напруження виникають у ділянках, де припадає найбільший знос матриці [5]. Ці результати свідчать, що DEM-моделювання, яке враховує дискретність частинок, може бути успішно застосоване і до шнекових систем для прогнозування силових навантажень, зносу та дефектів брикету в режимі реальної експлуатації [4–5].

Під час моделювання процесу брикетування важливі технологічні параметри. Adam та співавт. моделювали пресування вологої деревної біомаси у штемпельному пресі і виявили, що час витримки під тиском є ключовим фактором: у разі збільшення цього часу щільність брикету зростає, причому напір тиску по довжині матриці нерівномірний через тертя [6]. Моделювання показало також, що доцільно використовувати легкий конус на вході матриці для вирівнювання тиску. Крім того, експерименти підтверджують, що вологість сировини суттєво впливає на якість брикетів: дослідження на прикладі альфальфи показали, що низька вологість призводить до недостатнього ущільнення і погіршення якості, тоді як оптимальна вологість (~15–18 %) забезпечує підвищений тиск ущільнення та міцність брикету [5]. Загалом процес ущільнення знижує вміст вологи в брикеті та підвищує його енергетичну щільність і якість палива [7]. Такі результати і моделювання, і експериментів показують, що для вологої біомаси необхідно оптимізувати конструкцію пресів і режими роботи для ефективного відведення вологи та досягнення високої щільності готового палива [5; 7].

Останні дослідження підкреслюють користь комбінованих моделей. Наприклад, Gao та співавт. використали метод DEM–FEM для аналізу зносу матриці плоского пелетного преса



у разі різних співвідношень компонентів суміші. Поєднання DEM і FEM дозволило безпосередньо передавати сили від частинок до моделі конструкції пресу і точніше оцінювати розподіл напружень і знос матеріалу [8]. Таким чином, цей підхід інтегрує мікроскопічні взаємодії частинок і макроскопічну механіку прес-форм, що дає більш коректні прогнози параметрів ущільнення та зношування [8]. Використання DEM–FEM-моделей уже показало перспективність для оптимізації геометрії та режимів пресів: вони дають можливість варіювати кут конусності, співвідношення діаметру і довжини матриці тощо, щоб забезпечити рівномірніше ущільнення та мінімізувати енергоспоживання і знос деталей.

Огляд літератури свідчить, що за останні 5 років чисельне моделювання брикетування біомаси активно розвивається. DEM-моделювання застосовується для роликівих і шнекових пресів, дозволяючи виявляти зони концентрації напружень і зносу [4–5]. Параметри процесу (тиск, час утримки, вологість) демонструють сильний вплив на щільність і міцність брикету [5–6]. Зі свого боку, поєднання DEM з FEM (та потенційно CFD) відкриває нові можливості: перенесення даних частинкових моделей у глобальні розрахунки пресових конструкцій дає змогу оптимізувати дизайн матриць і режимів роботи для підвищення ефективності ущільнення [7–8]. Тобто сучасні дослідження показують, що комбіновані чисельні моделі можуть стати потужним інструментом для підвищення продуктивності та надійності брикетувального обладнання.

*Формулювання цілей статті.* Метою цього дослідження є розробка комплексної методики чисельного моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі з використанням інтегрованого підходу DEM–CFD. Зокрема, передбачається: побудувати детальну 3D-геометрію преса та сітки для моделювання; змодельовати динаміку переміщення і ущільнення твердих частинок біомаси разом із витисненням міжчастинної рідини (олії); проаналізувати вплив основних технологічних параметрів (частоту обертання шнеків, крок завантажувального шнеку, довжину формувального каналу) на ключові вихідні показники процесу (продуктивність преса, щільність сформованого брикету та вміст витиснутої рідини). Для кількісної оцінки зв'язків між факторами і результатами передбачено проведення повнофакторного експериментального плану з наступною побудовою квадратичних регресійних моделей з урахуванням взаємодій факторів [9]. Застосування таких моделей забезпечить обґрунтоване визначення оптимальних значень параметрів роботи преса та підвищить узгодженість моделювання з фізичною природою процесу.

*Основна частина.* Чисельне моделювання процесу виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі проводилося із застосуванням комбінованого підходу DEM–CFD, реалізованого у програмному середовищі STAR-CCM+ [10]. Такий підхід дозволяє одночасно враховувати рух і взаємодію твердих частинок рослинної сировини, що розглядаються як дискретні елементи в межах методу DEM, та поведінку міжчастинної рідкої фази – олії, яка заповнює пори середовища та описується як неперервна фаза в рамках CFD-моделі, що є припущенням для симуляції. Інтеграція DEM та CFD у єдиному чисельному середовищі дає можливість відтворити реальну фізику процесу пресування: від завантаження сипучої суміші у зону захвату шнека до формування брикету у конічній насадці.

Першим етапом моделювання було створення точної тривимірної геометричної моделі шнекового пресу. 3D-модель виконано в 3D-CAD STAR-CCM+ (рис. 1), що дозволило з високою точністю відтворити всі елементи конструкції, зокрема: корпус пресу, завантажувальний бункер, секцію шнекового транспортера, активну зону ущільнення, перехідну конічну насадку та канал остаточного формування брикету. Геометрію шнека моделювали на основі попередніх аналітичних досліджень: довжина шнеків  $L_1 = 160$  мм,  $L_2 = 65$  мм,  $L_3 = 55$  мм,  $L_4 = 55$  мм,  $L_5 = 135$  мм; крок шнеків  $S_1 = S_2 = 50 \dots 90$  мм,  $S_2 = 50$  мм,  $S_3 = 40$  мм,  $S_4 = 40$  мм,  $S_5 = 35$  мм;

зовнішній діаметр шнеків  $D_1 = 105$  мм,  $D_2 = 105$  мм,  $D_3 = 105$  мм,  $D_4 = 105$  мм,  $D_5 = 60$  мм; діаметр валів шнеків  $d_0 = 75$  мм,  $d_1 = 77$  мм,  $d_2 = 78$  мм,  $d_3 = 79$ ,  $d_4 = 80$  мм,  $d_5 = 40$ ; розміри матриці  $D_m = 53$  мм,  $L_m = 80$  мм; довжина елемента дожимної камери  $L_d = 200$  мм; кількість елементів дожимної камери  $N_d = 1 \dots 11$ , загальна довжина дожимної камери  $L = L_d \cdot N_d = 200 \dots 2200$  мм; розмір завантажувального отвору  $L_z = 102$  мм,  $B_z = 80$  мм.

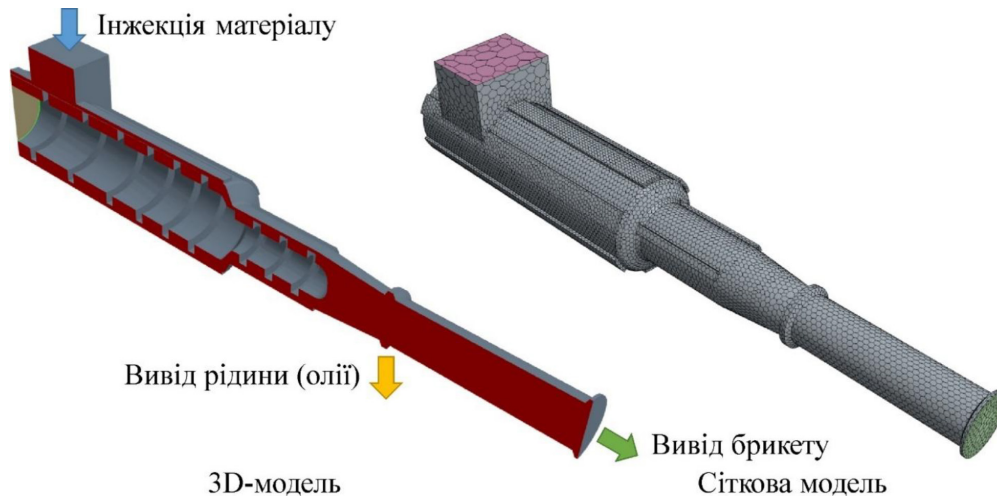


Рис. 1. 3D-модель і сіткова модель шнекового пресу

У STAR-CCM+ було створено дві взаємопов'язані сіткові області: сітку CFD та простір для дискретних елементів DEM (рис. 1). Важливим кроком було забезпечення достатньої деталізації сітки в місцях звужень та різких змін геометрії, зокрема в зоні формування брикету, де очікується найбільше зростання градієнтів тиску та швидкості потоку.

Для CFD-частини використовувалася багатогранна сітка, яка забезпечує високу точність за помірної кількості комірок. У критичних зонах виконували локальне згущення сітки за рахунок функції volumetric controls, що дозволило збільшити роздільність у місцях з очікуваними високими градієнтами.

Вибір розміру комірки DEM-решітки здійснювався з урахуванням середнього розміру частинок суміші (0,5–2 мм). Для коректної роботи DEM–CFD coupling кількість CFD-комірок у сфері впливу однієї частинки мала становити не менше 6–8. Такий підхід забезпечує баланс між точністю та обчислювальною ефективністю.

Після створення геометрії було сформовано обчислювальну область та створено фізичні моделі для опису процесу пресування. Оскільки матеріал являє собою багатокомпонентну систему, що складається з твердих частинок та рідини, було застосовано двофазну модель Euler–Lagrange, де рідина описується рівняннями неперервного середовища, а тверді частинки – моделлю DEM.

Система включала: модель руху твердих частинок на основі DEM, модель руху рідкої фази (олії) на основі CFD, модель взаємодії фаз DEM–CFD, модель обертального руху шнека, визначення зон інтерфейсної взаємодії.

Завдяки такій структурі STAR-CCM+ забезпечує послідовний розрахунок динаміки частинок і потоку рідини з урахуванням зворотного впливу.

Частинки суміші в DEM моделювалися як кульові елементи з еквівалентним діаметром. Використовувалася модель контактної взаємодії Герца–Міндліна (Hertz–Mindlin) з урахуванням тертя, пружності та демпфування. Для частинок були задані такі параметри, як: густина матеріалу, модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, коефіцієнт ковзного тертя, коефіцієнт кочення, коефіцієнт реституції.



Для моделювання зчеплення частинок у зоні високого тиску вводилася когезійна модель з лінійним законом злипання. Це дозволяло відтворити процес утворення щільної квазісуцільної структури брикету, характерної для реальних умов.

Рідина – олія, що виділяється під час пресування або присутня у початковій суміші, моделювалася як ньютонівська рідина з постійною динамічною в'язкістю. Для моделювання її руху застосовувалися рівняння Нав'є–Стокса у повній нестационарній постановці. Турбулентність моделювали за допомогою моделі  $k$ - $\omega$  SST як оптимальної для пристінних течій та зон зі значними деформаціями.

Особливе значення мала модель пористості, що виникає внаслідок наявності частинок DEM у кожній CFD-комірці. У STAR-CCM+ це реалізується через DEM–CFD coupling: поле пористості змінюється динамічно відповідно до розташування частинок, що дозволяє відтворювати реальний процес витиснення олії під час ущільнення суміші.

Початкові умови включали: початкове випадкове розташування частинок у зоні завантаження; початкову швидкість частинок – нульову; початковий вміст рідкої фази у вигляді рівномірно розподіленого поля пористості.

Граничні умови: на стінках пресу – no-slip для рідини та law of wall для частинок DEM; на вході – умова поповнення частинок із заданою інтенсивністю подачі; на виході – тиск 1 атм (101325 Па) або умова витиснення зі збереженням безперервності потоку.

Обертання шнека реалізувалося двома способами: реальний твердотільний рух, коли шнек є рухомою частиною геометрії.

Фізико-механічні властивості частинок визначали на основі попередніх досліджень [11–13]: насипна густина сухої маси становила 620 кг/м<sup>3</sup>, дійсна густина – 1200 кг/м<sup>3</sup>, межа міцності частинок у разі стискання – 1,8 МПа, коефіцієнт внутрішнього тертя в нерухомому стані – 0,43, у рухомому стані – 0,35, адгезія у разі стискання – 0,30 Н/м.

Властивості рідкої фази включали [14–15]: динамічну в'язкість олії – 0,065 Па · с, густину – 920 кг/м<sup>3</sup>, поверхневий натяг – 0,032 Н/м, температурну залежність в'язкості  $d\eta/dT$  – 0,0045 Па · с/°С.

У ході моделювання формувалися такі графічні дані: скалярне поле тиску уздовж шнекового пресу (рис. 2), скалярне поле щільності уздовж шнекового пресу (рис. 3), векторне поле швидкостей уздовж шнекового пресу (рис. 4), розподіл рідини (олії) уздовж шнекового пресу (рис. 5). Отримані поля дозволили візуалізувати процеси ущільнення частинок, формування зони максимального тиску та інтенсивність переміщення матеріалу, а також оцінити ефективність віджиму рідкої фази. Таке графічне представлення дає можливість встановити взаємозв'язок між геометрією шнека, параметрами тертя та розвитком фільтраційних потоків, що є важливим для оптимізації конструктивно-технологічних параметрів пресового обладнання.

Ці результати дозволяли оцінити не тільки кінцеві параметри процесу, але й внутрішні механізми пресування: утворення зони ущільнення, витиснення олії, формування макроструктури брикету.

Для моделювання були вибрані такі фактори (вхідні параметри): частота обертання шнека  $n$  (50 об/хв, 75 об/хв, 100 об/хв,), крок завантажувального шнека  $S_z$  (50 мм, 70 мм, 90 мм), довжина пристрою остаточного формування  $L$  (200 мм, 1200 мм, 2200 мм). Зміна цих параметрів дозволяла оцінити їх вплив на рух частинок, ступінь ущільнення, формування тиску й інтенсивність видавлювання олії.

Критеріями якості процесу пресування були: продуктивність  $Q$  (т/год), густина сформованого брикету  $\rho$  (т/м<sup>3</sup>), вихід олії  $B_o$  (%). Саме ці показники визначають технологічну ефективність шнекового пресу та його енергетичну доцільність.

У ході дослідження результати повнофакторного плану  $3^3 = 27$  дослідів було піддано статистичній обробці [16] у середовищі Wolfram Cloud. Для побудови регресійних залежностей

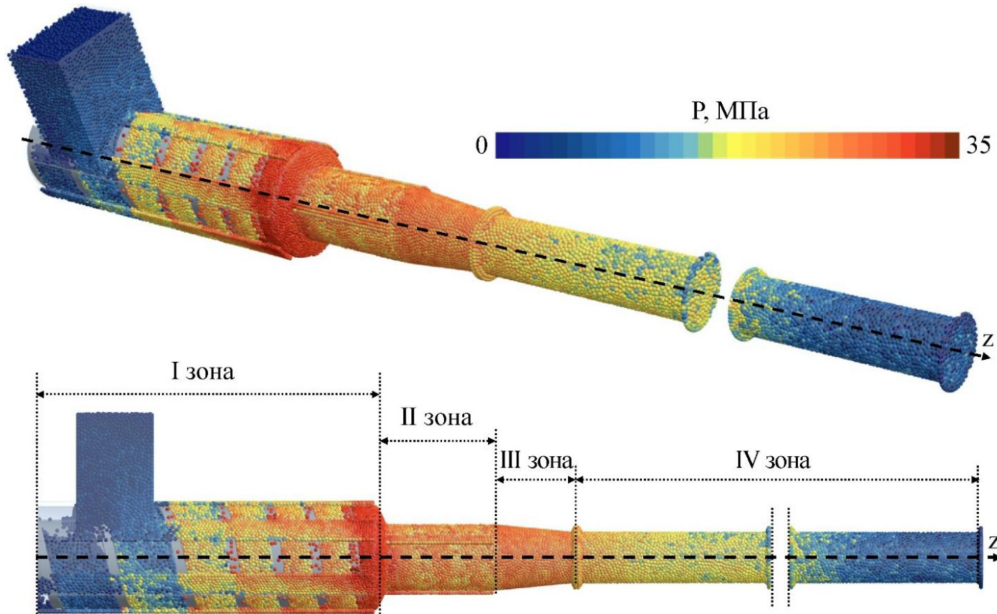


Рис. 2. Скалярне поле тиску уздовж шнекового пресу

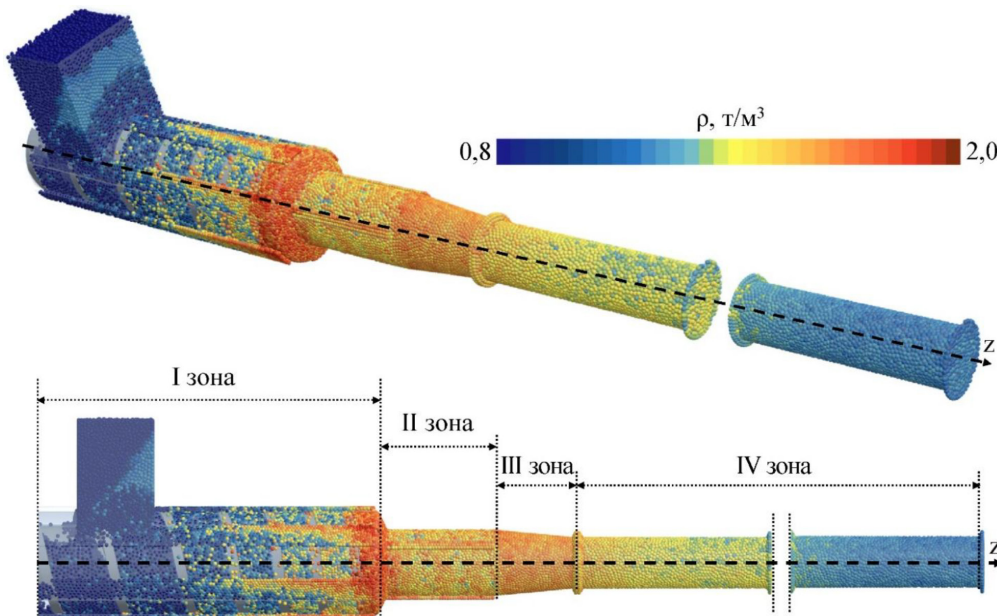


Рис. 3. Скалярне поле щільності уздовж шнекового пресу

другого порядку застосовано функцію `NonlinearModelFit`, що дозволила отримати модель із квадратичними та парними взаємодіями факторів. Оцінювання значущості коефіцієнтів виконували за допомогою `ParameterTable`, а перевірку адекватності та дисперсійний аналіз – через `ANOVATable`. Знайдення оптимальних значень цільових функцій здійснювали засобами `FindMinimum` та `FindMaximum` залежно від задачі оптимізації. Для наочного представлення просторової структури отриманих регресійних моделей і впливу трьох факторів на досліджуваний показник використовували функцію `Plot3D`, що дало змогу побудувати тривимірні поверхні відгуку та провести їх графічний аналіз.

У результаті обробки даних чисельного моделювання у середовищі `Wolfram Cloud` було отримано регресійну модель другого порядку для продуктивності  $Q$ , яка описує нелінійний характер впливу технологічних факторів та їх комбінованих взаємодій (рис. 6).

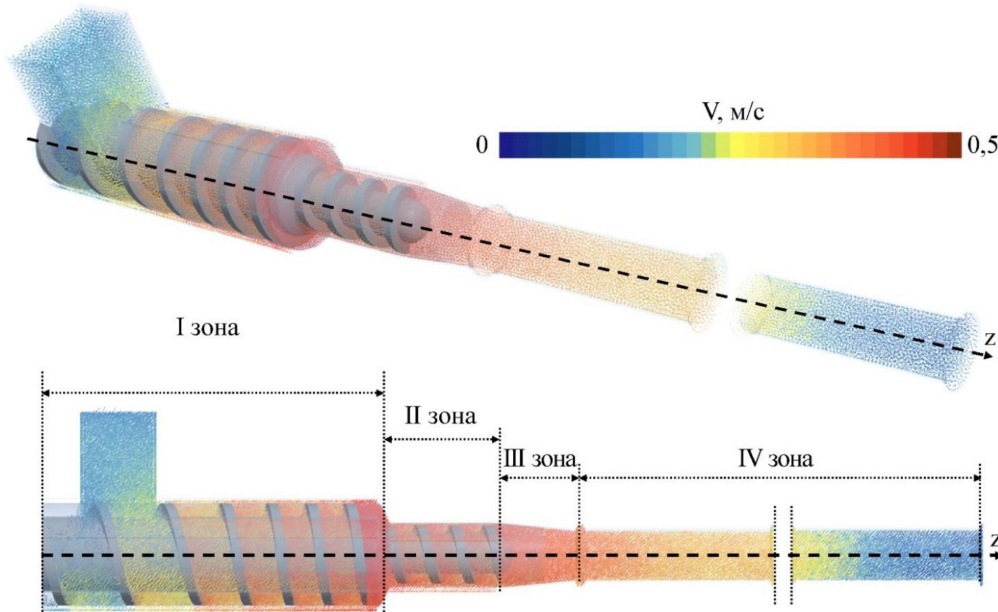


Рис. 4. Векторне поле швидкостей уздовж шнекового пресу

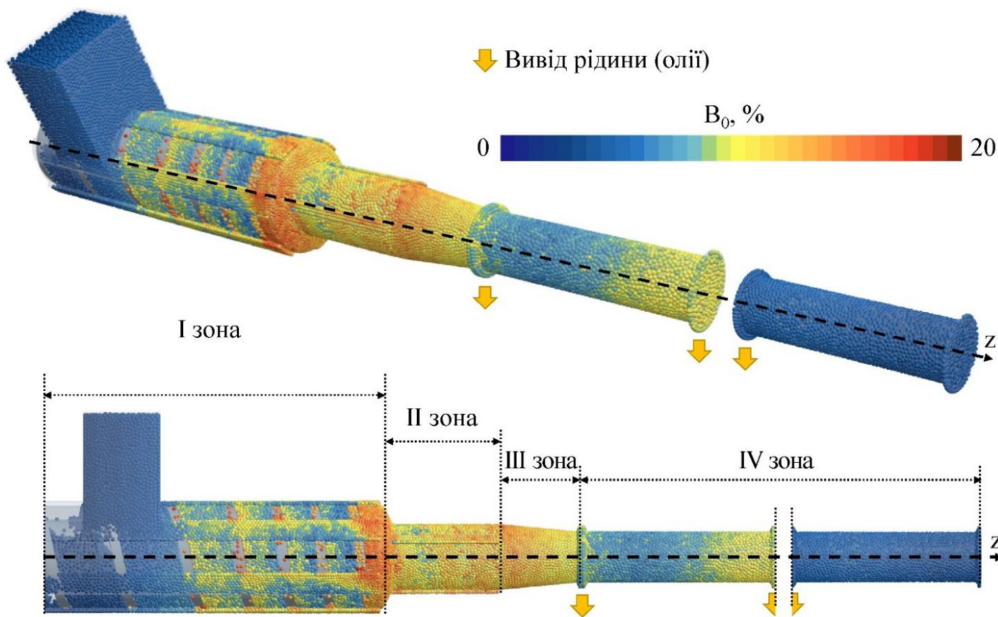


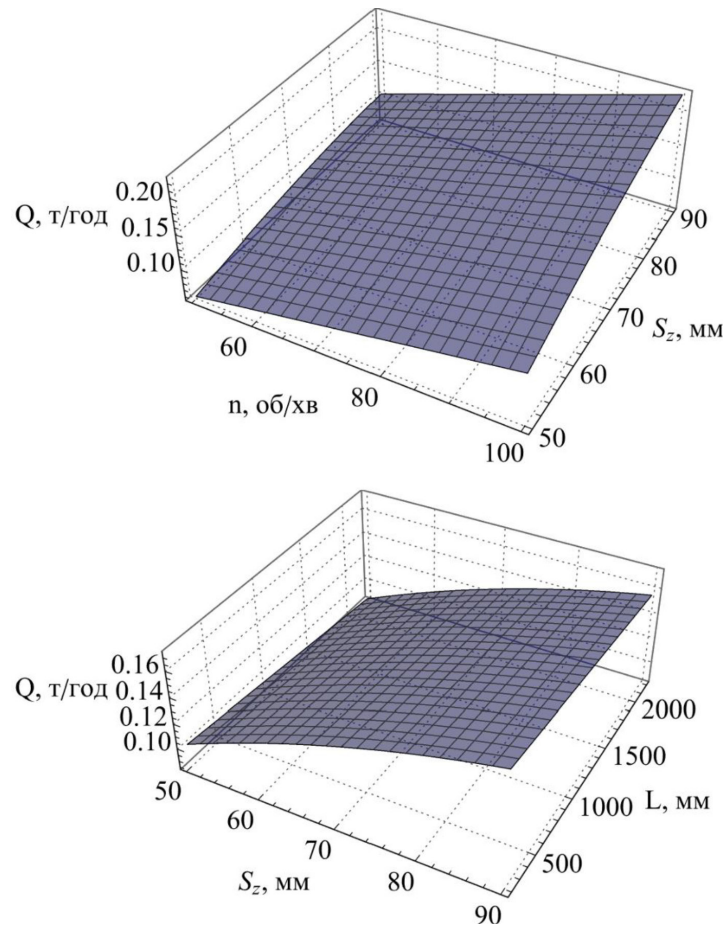
Рис. 5. Розподіл вмісту рідини (олії) уздовж шнекового пресу

$$Q = -0,074694 - 8,64444 \cdot 10^{-6} L + 0,00175833n + 0,00227458S_z + 0,00002525nS_z - 0,0000171389S_z^2. \quad (1)$$

Це рівняння дозволяє напряму оцінювати вплив кожного фактора на продуктивність у фізичних одиницях. Як видно, основні позитивні ефекти надають збільшення частоти обертання шнеків та кроку завантажувального шнеку, тоді як довжина формувального пристрою має незначний, але негативний вплив.

На основі моделі було визначено умови мінімальної та максимальної продуктивності:

$$\begin{aligned} Q_{\min} = 0,0491 \text{ т/год} &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 50,0 \text{ мм}, \quad L = 2200 \text{ мм}, \\ Q_{\max} = 0,2343 \text{ т/год} &\Rightarrow n = 100 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (2)$$



**Рис. 6. Залежність продуктивності  $Q$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

Отримані дані підтверджують, що для досягнення максимальної продуктивності необхідно використовувати високі частоти обертання шнеків, більший крок шнеку та мінімальну довжину формувального пристрою. Зменшення довжини  $L$  скорочує час перебування матеріалу в прес-формі, що дозволяє зменшити втрати енергії на тертя і збільшити швидкість формування брикету.

Особливу увагу приділено щільності брикету, оскільки саме цей критерій визначає якість та енергетичну цінність готового продукту, а також опосередковано впливає на стійкість брикетів у разі транспортування та зберігання. Структура моделювання включала отримання повної квадратичної регресійної моделі другого порядку, перевірку її статистичної значущості, оцінку параметрів моделі та визначення оптимальних технологічних параметрів для максимізації щільності. Отримане рівняння для щільності брикету  $\rho$  (рис. 7):

$$\begin{aligned} \rho = & -3,46479 + 0,00121889L - 3,55833 \cdot 10^{-7} L^2 + 0,0609747n - \\ & - 0,000317667n^2 + 0,0418446S_z - 0,000162083nS_z - 0,000241875S_z^2. \end{aligned} \quad (3)$$

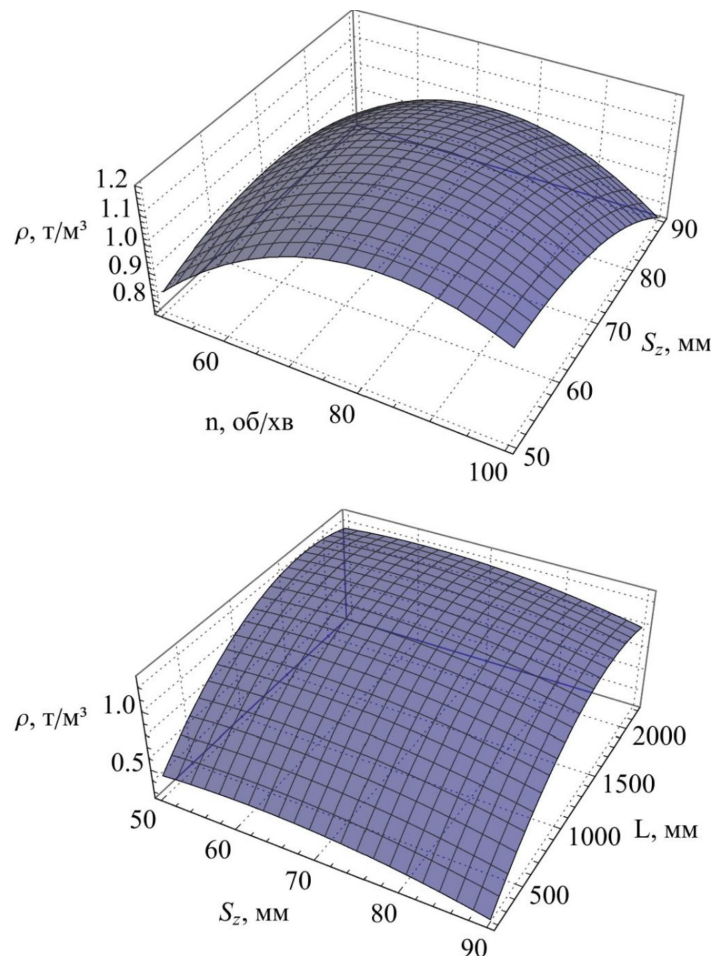
Збільшення  $L$  сприяє тривалішому перебуванню біомаси під тиском, що підвищує щільність. Проте надмірне збільшення довжини призводить до перевантаження преса і росту зворотного тиску, що відображено негативним коефіцієнтом при  $L^2$ . Зі збільшенням  $n$  інтенсивніше відбувається транспорт середовища та генерується більший тиск, проте після певної межі швидкість стає надмірною – ущільнення зменшується, а біомаса не встигає прогріватись та дегазуватись. Менший крок  $S_z$  забезпечує краще попереднє ущільнення і рівномірніше подавання до

пресуючої зони. Занадто великий крок зменшує тиск у початковій частині шнекового преса.

За допомогою аналізу поверхні відгуку встановлено граничні значення критерію:

$$\begin{aligned} \rho_{\min} = 0,0967734 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}, \\ \rho_{\max} = 1,8607 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 80,8 \text{ об/хв}, \quad S_z = 59,4 \text{ мм}, \quad L = 1713 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (4)$$

Зона найменш ефективної роботи преса, коли стискання біомаси є недостатнім, а тиск у каналі формування – мінімальний. Максимальна щільність відповідає режиму, коли: обертання шнеків досить інтенсивне для формування високого тиску; крок шнеку – середній, що забезпечує рівномірне попереднє ущільнення; довгий канал формування забезпечує тривале знаходження біомаси під тиском та видалення повітря і надлишкової вологи.



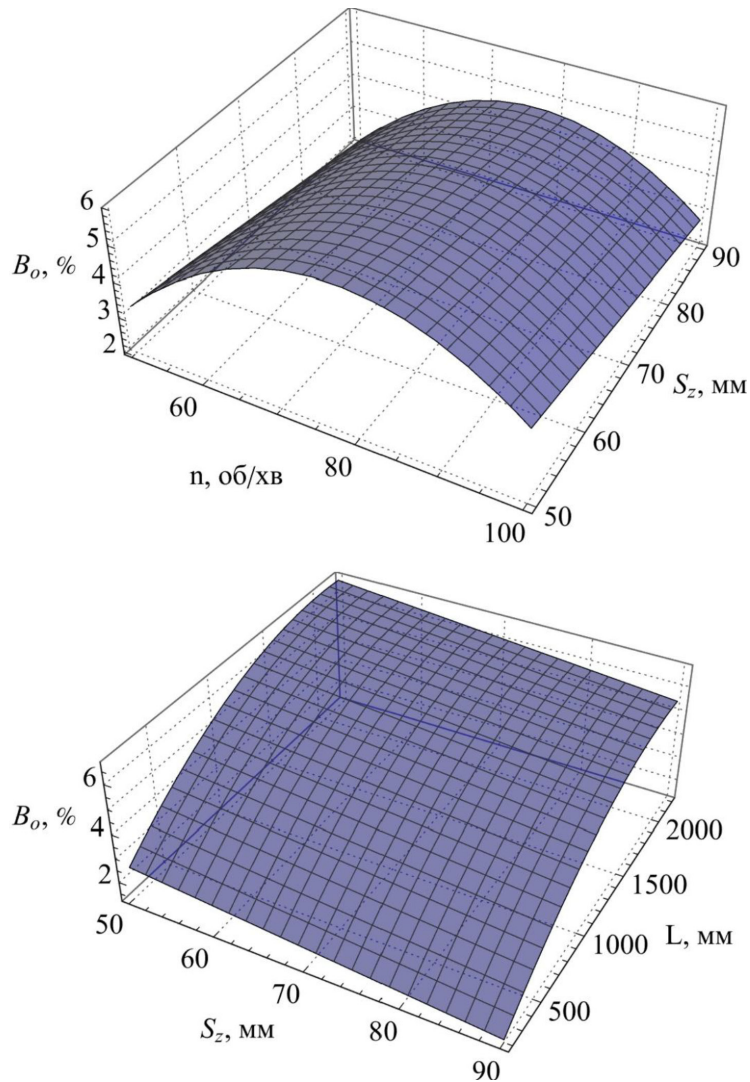
**Рис. 7. Залежність щільності брикету  $\rho$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

У результаті обробки даних моделювання побудовано регресійні моделі другого порядку для всіх трьох критеріїв. Для кількості отриманої олії  $B_o$  модель має вигляд (рис. 8):

$$\begin{aligned} B_o = &-3,46479 + 0,00121889L - 3,558 \cdot 10^{-7}L^2 + 0,0609747n - \\ &- 0,000317667n^2 + 0,0418446S_z - 0,000162083nS_z - 0,000241875S_z^2. \end{aligned} \quad (5)$$

Оптимізація рівняння показала, що мінімальна величина кількості олії становить:

$$\begin{aligned} B_{o_{\min}} = 0,012 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 50,0 \text{ об/хв}, \quad S_z = 90,0 \text{ мм}, \quad L = 200 \text{ мм}, \\ B_{o_{\max}} = 6,78597 \text{ т/м}^3 &\Rightarrow n = 77,1 \text{ об/хв}, \quad S_z = 50,0 \text{ мм}, \quad L = 2021 \text{ мм}. \end{aligned} \quad (6)$$



**Рис. 8. Залежність кількості отриманої олії  $B_o$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнеку  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$**

Максимальне значення ж досягається за умов високих обертів та максимальної довжини формувального каналу, що очікувано збільшує глибину фільтраційного виділення.

Поведінка моделі добре узгоджується з технологічною природою пресування: сильне ущільнення та довготривале утримання тиску – необхідні умови для прориву міжчасткового фільтраційного фронту. Додавання кроку шнека  $S_z$  у модель демонструє слабку участь цього параметра у формуванні олієвиділення, оскільки геометрія завантажувального шнека визначає лише первинні транспортні властивості, але не механічну роботу у зоні пресування.

Порівняння оптимальних точок для  $\rho$  та  $B_o$  показує, що максимальна щільність формується за дещо менших, ніж оптимальні для олієвиділення, значень довжини формувального пристрою. Це пояснюється різницею механізмів: для виділення олії важлива тривала дія тиску, тоді як для формування щільного брикету критичними є локальні піки тиску та інтенсивність зсуву у кінцевій зоні пресування. Тривале перебування матеріалу у каналі, навпаки, може спричинити термічну деградацію структури та появу мікротріщин, що зменшує щільність готового продукту.

Продуктивність  $Q$  має типову для шнекового обладнання поведінку: зростає зі збільшенням  $n$  і кроку  $S_z$ , але зменшується зі збільшенням  $L$ , оскільки надмірна довжина формувального каналу збільшує опір руху матеріалу та обмежує масовий витратний потік.



Отже, багатокритеріальна картина процесу у шнековому пресі має сідлоподібний характер: параметри, що збільшують продуктивність, не завжди максимізують щільність, а оптимальні умови для виділення олії передбачають певне зниження продуктивності через збільшення  $L$ . Компромісне налаштування повинно орієнтуватися на конкретну технологічну задачу – максимальний вихід палива, максимальна якість брикету або максимальний відбір олії.

Результати чисельного моделювання демонструють, що система реагує на зміну параметрів плавно, поверхні відгуку є гладкими, без різких розривів, а статистичні критерії підтверджують адекватність моделей. Це дозволяє розглядати отримані рівняння як придатний інструмент для подальшої оптимізації конструктивних і режимних параметрів шнекового преса, створення енергоефективних режимів та керування процесом у режимах компромісу « $Q$ – $\rho$ – $B_o$ ». Описані тенденції узгоджуються з фізичною природою деформації рослинної сировини, реологією пресування та механізмами фільтрації рідини у середовищах зі змінною щільністю пакування частинок.

**Висновки.** Методика чисельного моделювання виготовлення паливних брикетів у шнековому пресі, побудована на інтегрованому підході DEM–CFD у середовищі STAR–CCM+, дала змогу комплексно відтворити фізику процесу пресування багатофазної суміші та врахувати взаємодію твердих частинок рослинної сировини з рідкою фазою. Ретельне створення 3D-геометрії преса, побудова високоякісної CFD- та DEM-сіток, застосування моделей контактної взаємодії, когезії, турбулентності, пористості та обертального руху шнека забезпечили адекватне описання ключових явищ: ущільнення суміші, формування зони максимального тиску, інтенсивності переміщення матеріалу та процесу витиснення олії. Отримані поля тиску, щільності, швидкостей та розподілу рідини дозволили не лише оцінити роботу преса, а й розкрити внутрішні механізми формування брикету, що є основою для подальшої оптимізації конструктивно-технологічних параметрів шнекового обладнання та підвищення ефективності процесу брикетування.

У результаті обробки даних чисельного моделювання у середовищі Wolfram Cloud побудовано регресійні моделі другого порядку для продуктивності  $Q$ , щільності брикету  $\rho$  та кількості отриманої олії  $B_o$  від частоти обертання шнеків  $n$ , кроку завантажувального шнека  $S_z$ , довжини пристрою остаточного формування  $L$ . Аналіз коефіцієнтів та ANOVA показав високу статистичну значущість моделей і їхню адекватність даним чисельного моделювання. Для продуктивності визначальними факторами є частота обертання шнеків та крок завантажувального шнека, тоді як збільшення довжини формувального пристрою дещо знижує  $Q$ . Модель щільності підтверджує нелінійний характер ущільнення біомаси: максимальна  $\rho$  досягається за середніх значень  $S_z$ , підвищених  $n$  та збільшеній довжині  $L$ . Для виділення олії  $B_o$  найсильнішими впливовими параметрами є  $n$  та  $L$ , причому обидва чинники проявляють виразну квадратичну залежність. Порівняння критеріїв показує, що оптимальні умови для  $Q$ ,  $\rho$  та  $B_o$  не збігаються, а процес має сідлоподібний багатокритеріальний характер: параметри, що підвищують продуктивність, не завжди забезпечують максимальну щільність чи інтенсивне виділення олії.

#### Список використаних джерел

1. World Bioenergy Association. *Global bioenergy statistics report*: 12th edition. 2025. URL: <https://www.worldbioenergy.org/uploads/251118%20GBSR.pdf>
2. Bot B. V., Axaopoulos P. J., Sakellariou E. I., Sosso O. T. and Tamba J. G. Energetic and Economic Analysis of Biomass Briquettes Production from Agricultural Residues. *Applied Energy*, 321, Article 119430. 2022. DOI: 10.1016/j.apenergy.2022.119430
3. Ning T., Zhang Y., Wang X. Application of Numerical Simulation Technology in the Biomass Densification and Molding Field: A Review. *BioResources*, 21(1). 2026. URL: <https://ojs.bioresources.com/index.php/BRJ/article/view/25031>



4. Bembenek M., Buczak M., Baiul K. Modelling of the Fine-Grained Materials Briquetting Process in a Roller Press with the Discrete Element Method. *Materials*, 2022. 15(14), 4901. DOI: 10.3390/ma15144901
5. Du H., Du H., Ma Y., Su H., Xuan C., Xue J. Research and Prediction of Wear Characteristics of Alfalfa Densification Die Based on the Discrete Element Method. *Agriculture*, 14(8), 2024. 1260. DOI: 10.3390/agriculture14081260
6. Adam R., Yiyang D., Kruggel-Emden H., Zeng T., Lenz V. Influence of pressure and retention time on briquette volume and raw density during biomass densification with an industrial stamp briquetting machine. *Renewable Energy*, 229, 2024. 120773. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120773
7. Aal A. M. K. A., Ibrahim O. H. M., Al-Farga A., Saeidy E. a. E. Impact of Biomass Moisture Content on the Physical Properties of Briquettes Produced from Recycled Ficus nitida Pruning Residuals. *Sustainability*, 15(15), 2023. 11762. DOI: 10.3390/su151511762
8. Gao A., Dong Q., Sun W. Study on Flat Die Wear Characteristics in Flat Die Pelletizing with Different Material Ratios Based on DEM-FEM. *Agriculture*, 14(6), 2024. 894. DOI: 10.3390/agriculture14060894
9. Okpala I. F., Onyenanu I. U., Ezechukwu V. C., Iochonwu C. E. Performance optimization of a locally developed charcoal briquette machine using response surface methodology. *Scientific Journal of Engineering and Technology*, 2(1), 2025. 55–66. DOI: 10.69739/sjet.v2i1.486
10. Алієв Е. Б. Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва : підручник. Київ : Аграрна наука, 340 с. 2023. DOI: 10.31073/978-966-540-584-9
11. Malik M. A., Saini C. S., Yildiz F. Engineering properties of sunflower seed: Effect of dehulling and moisture content. *Cogent Food & Agriculture*, 2(1), 2016. Article 1145783. DOI: 10.1080/23311932.2016.1145783
12. Ali K. A. M., Zong W. Y., Yang L., El-Ghany H. M. A. Effect of Moisture Content on Sunflower Seed Physical and Mechanical Properties. In *International Journal of Engineering Research in Africa*, 2021. 57, 169–179. DOI: 10.4028/www.scientific.net/jera.57.169
13. Li Z., Xiang F., Huang X., Liang M., Ma S., Gafurov K., Gu F., Guo Q., Wang Q. Properties and Characterization of Sunflower Seeds from Different Varieties of Edible and Oil Sunflower Seeds. *Foods*, 13, Article 1188. 2024. DOI: 10.3390/foods13081188
14. Pawlicki L. T., Rostocki A. J., Tefelski D. B., Siegoczyński R. M., Ptasznik S. Mechanical properties of sunflower oil under pressure. *European Food Research and Technology*, 248(1), 2021. 283–287. DOI: 10.1007/s00217-021-03880-1
15. Guinda Á., Dobarganes M. C., Ruiz-Mendez M. V., Mancha M. Chemical and physical properties of a sunflower oil with high levels of oleic and palmitic acids. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 105(3–4), 2003. 130–137. DOI: 10.1002/ejlt.200390028
16. Кисельов О. В., Комарова І. Б., Мілько Д. О., Бакарджієв Р. О. Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт) : навчальний посібник. / За заг. ред. Д. О. Мілька. Інститут механізації тваринництва НААН. 2017. Запоріжжя : СТАТУС. 1181 с.

Дата першого надходження статті до видання: 29.01.2026

Дата прийняття статті до друку після рецензування: 26.02.2026

Дата публікації (оприлюднення) статті: 28.04.2026

Стаття поширюється на умовах ліцензії відкритого доступу (CC BY 4.0)





V. Samokhval<sup>1</sup>, I. Bilous<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Dmytro Motornyi Tavria State Agrrotechnological University*

<sup>2</sup> *Dnipro State Agrarian and Economic University*

## RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE BRIQUETTING PRESSING PROCESS AND OIL EXTRACTION IN A SCREW PRESS

### *Summary*

The article presents a comprehensive methodology for numerical modeling of the fuel briquette manufacturing process in a screw press based on an integrated DEM–CFD approach. The relevance of the study is driven by the need to improve the energy efficiency of biomass processing technologies and to refine the design and technological parameters of briquetting equipment. The modeling was performed in the STAR-CCM+ software environment, taking into account the interaction between solid particles of plant-based raw materials and the interparticle liquid phase, which made it possible to reproduce the real physics of compaction processes, pressure formation, and liquid extrusion. Based on a full-factorial numerical experiment of the 3<sup>3</sup> type, second-order regression models were developed for press productivity, density of the formed briquette, and the amount of expressed oil as functions of screw rotational speed, feeding screw pitch, and forming die length. The analysis revealed a nonlinear and multicriteria nature of the briquetting process, with the presence of trade-offs between productivity, briquette quality, and the intensity of liquid phase release. The obtained results confirm the adequacy of the applied DEM–CFD approach and can be used to optimize operating regimes and design parameters of screw presses in order to improve the efficiency of solid biofuel production.

**Keywords:** biomass, fuel briquettes, screw press, numerical modeling, DEM–CFD, productivity, briquette density, oil expression.