

**RESULTS OF EXPERIMENTAL RESEARCH OF THE HOMOGENIZER-DISPERSER OF LIQUID FEED FOR PIGS**

E. Aliiev, R. Maliehin\*

*Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine*

AGRICULTURAL MACHINES

**ABSTRACT**

*Effective pig farming is impossible without providing animals with high quality, balanced feed at a competitive price and in the required quantity. The article analyzes the dependences determined during the experiment between various parameters of liquid feed production. In particular, changes in the content of 0–0.5 mm particles in the mixture depend on the frequency of rotation of the rotor, the diameter of the stator inlet and the operating time of the equipment. It was also found that the index of stratification of the mixture varies depending on the same parameters. The temperature of the mixture, the power consumption of the electric motor and the energy consumption also change according to the frequency of rotation of the rotor, the diameter of the inlet hole of the stator and the operating time of the equipment. The energy consumption was calculated as the product of the power consumption of the electric motor and the operating time of the equipment. In order to evaluate the influence of each of these factors on the optimization criteria of the liquid feed preparation process, studies were conducted according to the Box-Benkin D-optimal plan matrix of the second order for three factors. Each experiment was carried out in three replicates to ensure the reliability of the results obtained. The dependencies of the specific energy consumption for the execution of the process also vary from these factors. Particularly interesting is the fact that when the value of the indicator of stratification of the mixture is less than 5% and the efficiency indicator is minimized, the optimal value of the equipment operation time is observed in the range from 45.1 to 50.4 minutes for different types of input material. The specific energy consumption indicator also depends on the type of grain used. The lowest specific energy consumption is: for soybeans – 0.696 MJ/kg, for wheat – 0.794 MJ/kg, for barley – 0.896 MJ/kg.*

**Key words:**

liquid feed,  
homogenization,  
dispersion,  
swine breeding,  
feed production

**Article history:**

Received 04.05.2024

Accepted 05.06.2024

**\*Corresponding author:**

malegin.r.d@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi50.1334

**To cite this article:**

Aliiev, E., & Maliehin, R. (2024). Results of experimental research of the homogenizer-disperser of liquid feed for pigs. *Agricultural Machines*, 50, 48-60. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1334>

УДК 636.085.5

**РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ГОМОГЕНІЗАТОРА-ДИСПЕРГАТОРА РІДКИХ КОРМІВ ДЛЯ СВИНЕЙ****Е.Б. Алієв, Р.Д. Малегін\****Дніпровський державний аграрно-економічний університет, Дніпро, Україна*

AGRICULTURAL MACHINES

**АНОТАЦІЯ**

Ефективне функціонування свинарства неможливе без забезпечення тварин якісними збалансованими кормами за конкурентною ціною та у потрібній кількості. У статті проаналізовані визначені під час експерименту залежності між різними параметрами виробництва рідких кормів. Зокрема, зміна вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші залежить від частоти обертання ротора, діаметра вхідного отвору статора та тривалості роботи обладнання. Також встановлено, що показник розширення суміші змінюється залежно від тих самих параметрів. Температура суміші, споживана потужність та витрати енергії також змінюються залежно від частоти обертання ротора, діаметра вхідного отвору статора та тривалості роботи обладнання. Енергоспоживання обчислювали як добуток споживаної потужності та тривалості роботи обладнання. Для оцінювання впливу кожного з цих факторів на критерії оптимізації процесу приготування рідких комбікормів проводили дослідження за D-матрицею оптимального плану Бокса-Бенкіна другого порядку для трьох факторів. Кожен експеримент проводили у трьох повтореннях для забезпечення достовірності отриманих результатів. Від цих факторів залежать також і питомі енерговитрати на виконання технологічного процесу. За значення показника розширення суміші менше 5% та мінімальних питомих витрат енергії оптимальна тривалість роботи обладнання змінюється в інтервалі від 45,1 хв до 50,4 хв для різної сировини. Показник питомих енерговитрат також залежить від сировини. Найменші питомі енерговитрати становлять: для сої – 0,696 МДж/кг, для пшениці – 0,794 МДж/кг, для ячменю – 0,896 МДж/кг.

**Ключові слова:**

рідкі корми,  
гомогенізування,  
диспергування,  
свинарство,  
виробництво кормів

**Історія публікації:**

Отримано 04.05.2024

Затверджено 05.06.2024

**\*Автор для листування:**

malegin.r.d@dsau.dp.ua

DOI: 10.36910/acm.vi50.1334

**Цитувати цю статтю:**

Алієв, Е. Б., & Малегін, Р. Д. (2024). Результати експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів для свиней. *Сільськогосподарські машини*, 50, 48-60. <https://doi.org/10.36910/acm.vi50.1334>

## СТАН ПИТАННЯ ТА ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ

Як зазначено в дослідженнях (*Delsart et al., 2020; van Klompenburg & Kassahun, 2022*) ефективне функціонування свинарства неможливе без забезпечення тварин якісними збалансованими кормами за конкурентною ціною та у потрібній кількості. Якість кормів, передусім, визначається технологічними операціями їх приготування (*Kim et al., 2016; Jung et al., 2018; Romaniuk et al., 2021*). По-перше, корми для тварин повинні бути однорідними за фракційним складом. Тобто процес подрібнення повинен забезпечувати однаковий фракційний склад за кожним з компонентів рослинної сировини, що входить до складу корму (*Millet et al., 2010*). По-друге, корми для тварин повинні бути однорідними за розподілом компонентів у суміші. Тобто процес змішування повинен забезпечувати рівномірний розподіл компонентів рослинної сировини у всьому об'ємі (або масі) суміші (*Camp Montoro et al., 2022*). По-третє, корми повинні зберігати всі поживні речовини та вітамінні комплекси, не містити шкідливих речовин, забезпечуючи вимоги безвідходності трансформації рослинної сировини вздовж харчового ланцюга (*Aliiev et al., 2021*). Тобто приготування кормів повинно містити такі технологічні процеси, що задовольняють зазначеним вимогам.

Вищезазначені критерії відповідають процесам диспергування та гомогенізації складових корму за допомогою кавітаційного оброблення. Дослідження підтверджують, що диспергування – це технологічний процес подрібнення та розподілу твердого матеріалу, рідини або газу, внаслідок чого утворюються дисперсні системи: порошки, суспензії, емульсії, аерозолі (*Atiemo-Obeng & Calabrese, 2003*). Гомогенізація – це процес зменшення неоднорідності розподілу компонентів та фаз у гетерогенній системі (*Lesmes et al., 2008; Osorio-Arias et al., 2021*). Кавітація є фізичним процесом утворення бульбашок у рідких середовищах, їх руйнування та вивільнення енергії, що виникає внаслідок зовнішніх фізичних впливів (*Asaithambi et al., 2019; Sun et al., 2022; Askarniya et al., 2023; Zhou et al., 2024; Zhu et al., 2024*). Отже, кавітаційне оброблення сировини дозволяє подрібнювати компоненти тваринного корму за допомогою ударної хвилі. Актуальним є підвищення

ефективності приготування якісних рідких кормів шляхом застосування технологічних процесів диспергування та гомогенізації з кавітаційним обробленням складових корму.

Розроблено багато диспергаторів та гомогенізаторів, що використовують ефект кавітації. Їх, зокрема, використовують для оброблення складових корму для отримання кормів для тварин з високою засвоюваністю. Переважно такі гідродинамічні установки призначені для підготовки рідких кормових паст зернових, олійних та бобових культур, а також кормів тваринного походження для молодняка й дорослих сільськогосподарських тварин. Також під час приготування кормів проходить знезараження та руйнування токсичних речовин, зокрема, мікотоксинів та алкалоїдів.

Найбільш поширеними конструктивними елементами кавітаційних гідроударних диспергаторів є ротор та статор. У роторі розташовані резонансні камери, а у статорі – конфузори. Під час обертання ротора відбувається періодичне перекриття вихідних отворів резонаторів. Частота обертання ротора, зазвичай, знаходиться у межах 1000–3000 об/хв. Подрібнення відбувається внаслідок впливу кавітації та подвійного гідравлічного удару під час переривання потоку пульпи з певною частотою. Гідродинамічні процеси в установці супроводжуються турбулентністю, що сприяє ефективній гомогенізації сировини, що обробляється.

**Мета дослідження** – дослідити роботу гомогенізатора-диспергатора рідких кормів для свиней.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Експериментальні дослідження проводили на стенді (**рис. 1**), що містить розроблений гомогенізатора-диспергатора, блок керування з частотним регулятором N700E-022SF для зміни параметрів процесу приготування рідких кормів, контрольно-вимірювальну апаратуру (термометр на базі цифрового давача температури DS18B20), а також персональний комп'ютер з програмним забезпеченням Hims N700 та TM32.

Конструкція стенду дозволяла змінювати технологічно-конструктивні параметри та вимірювати показники робочого процесу: діаметр вхідного отвору статора  $D_{in}$  від

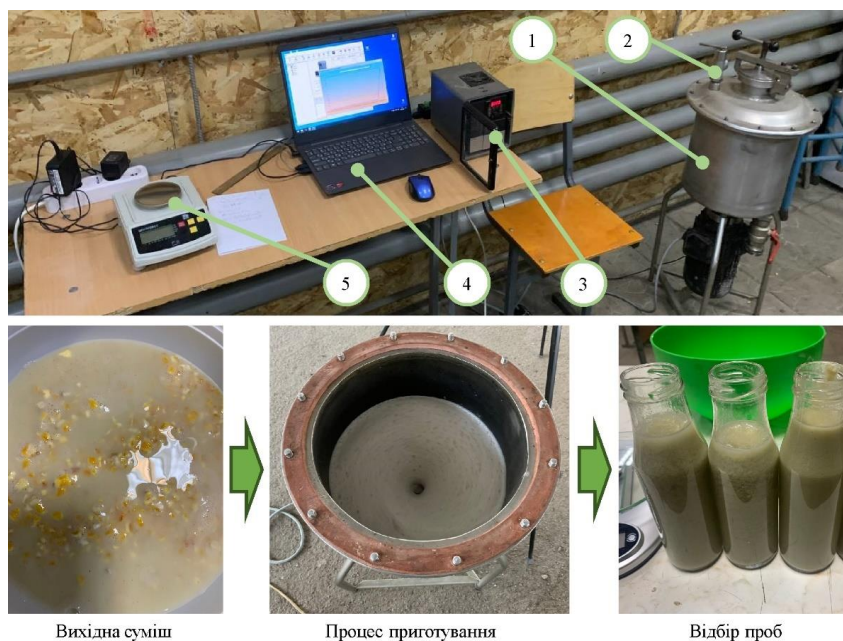
0,04±0,001 м до 0,07±0,001 м шляхом зміни фланців; частоту обертання ротора  $n$  в інтервалі від 0 об/хв до 3000±1 об/хв за допомогою частотного перетворювача; об'єм завантажених компонентів  $V$  до 0,34 м<sup>3</sup>; динаміку температури суміші в місткості гомогенізатора-диспергатора за допомогою електронного датчика температури DS18B20 від 0°C до 100±0,1°C з відтвореністю 0,5 с; динаміку потужності електродвигуна стенда за допомогою частотного перетворювача Hims N700 в інтервалі від 0 кВт до 2,00±0,01 кВт з відтвореністю 0,5 с.

В якості рослинної сировини (зерна) для проведення експериментальних досліджень було вибрано пшеницю, ячмінь та сою. Згідно з дослідженнями (Aliiev *et al.*, 2021) концентрація сухої речовини у суміші корму повинна складати 12%. Ураховуючи вологість зерна (8%), співвідношення маси води до маси сипкого компонента має бути 6,75:1. Маса початкової суміші була 5 кг (0,65 кг зерна та 4,35 кг води).

За результатами проведеного чисельного моделювання (Aliiev, 2023) та аналізу джерел інформації (Dickey, 2015), для проведення експериментальних досліджень було вибрано три фактори, які найбільш вагомо впливають на робочий процес та вибрано їх натуральні значення на нульовому рівні та рівні їх

варіювання. Інтервали та рівні варіювання факторів для проведення досліджень подані в таблиці.

В якості критеріїв оптимізації було прийнято: вміст частинок розміром 0–0,5 мм у суміші ( $k_{fr}$ , %); показник розшарованості суміші ( $i_d$ , %); температура суміші в кінці процесу ( $T$ , °C); потужність електродвигуна ( $N$ , кВт); витрати енергії ( $E$ , МДж); питомі витрати енергії ( $E_0$ , МДж/кг). Вміст частинок розміром 0–0,5 мм у суміші ( $k_{fr}$ , %) визначали шляхом її поділу на фракції на лабораторних ситах з подальшим зважуванням на вагах ВТЕ-Центровес-15-Т3-ДВ (Центровес, Україна). Показник розшарованості суміші ( $i_d$ , %) визначали шляхом відстоювання зразка суміші у пробірці протягом 5 год. У випадку  $i_d = 0\%$  – немає розшарованості, а у випадку  $i_d = 100\%$  – повна розшарованість. Витрати енергії ( $E$ , МДж) обчислювали як добуток споживаної потужності електродвигуна та тривалості роботи обладнання. Питомі витрати енергії ( $E_0$ , МДж/кг) визначали як відношення споживаної потужності до продуктивності кавітаційного гомогенізатора-диспергатора з урахуванням вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші. Продуктивність кавітаційного гомогенізатора-диспергатора кормів ( $Q$ , кг/год) обчислювали як відношення маси суміші до тривалості роботи.



**Рис. 1** – Стенд та етапи експериментальних досліджень:

1 – експериментальний гомогенізатора-диспергатора рідких кормів; 2 – датчик температури DS18B20; 3 – частотний перетворювач N700E-022SF; 4 – комп'ютер; 5 – ваги ВТЕ-Центровес-15-Т3-ДВ

Таблиця – Рівні та інтервали варіювання факторів для проведення експериментальних досліджень гомогенізатора-диспергатора рідких кормів

Рівні та інтервали варіювання	Кодоване значення	Фактори та їх позначення		
		Частота обертання ротора $n$ , об/хв	Діаметр вхідного отвору статора $D_{in}$ , м	Тривалість роботи $t$ , с
Верхній рівень	+1	3000	0,06	1800
Основний рівень	0	2250	0,05	1200
Нижній рівень	-1	1500	0,04	600
Інтервал варіювання	$\Delta$	750	0,01	600

Для визначення впливу кожного з факторів на критерій оптимізації процесу приготування рідкого корму проведені дослідження за матрицею  $D$ -оптимального плану Бокса-Бенкіна (Повод та ін., 2021) другого порядку для трьох факторів з загальною кількістю дослідів – 15. Кожен дослід проводили у триразовій повторності.

Експерименти з визначення режимних параметрів процесу провели з використанням методики планування багатофакторного експерименту, яка дозволила визначити математичні моделі процесу у вигляді рівнянь регресії (полінома) другого порядку (Everitt & Hothorn, 2009; Кисельов та ін., 2017; Повод та ін., 2021).

Оброблення результатів проведених досліджень за методом факторного планування експерименту виконували з використанням програмних пакетів Microsoft Excel (Microsoft, USA) та Wolfram Cloud (Wolfram Research, USA). Для перевіряння відтворюваності дослідів використовували критерій Кохрена. Адекватність отриманих моделей перевіряли за допомогою критерію Фішера. Значимість коефіцієнтів регресії перевіряли за допомогою визначення довірчого інтервалу для них. Коефіцієнт регресії приймали значимим, якщо його абсолютне значення перевищувало величину довірчого інтервалу, який визначали за  $t$ -критерієм Стюдента (Shumway & Stoffe, 2011).

## РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОБГОВОРЕННЯ

У результаті оброблення даних досліджень отримані рівняння регресії другого порядку (після відхилення незначущих коефіцієнтів за

критерієм Стюдента) для вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші:

- для пшениці:

$$k_{fr} = -47,95 + 3126,39D_{in} - 32888,9D_{in}^2 - 1,22469 \cdot 10^{-6}n^2 + 0,0199444n - 0,00009tn + 0,860278t - 0,00572222t^2; \quad (1)$$

- для ячменю:

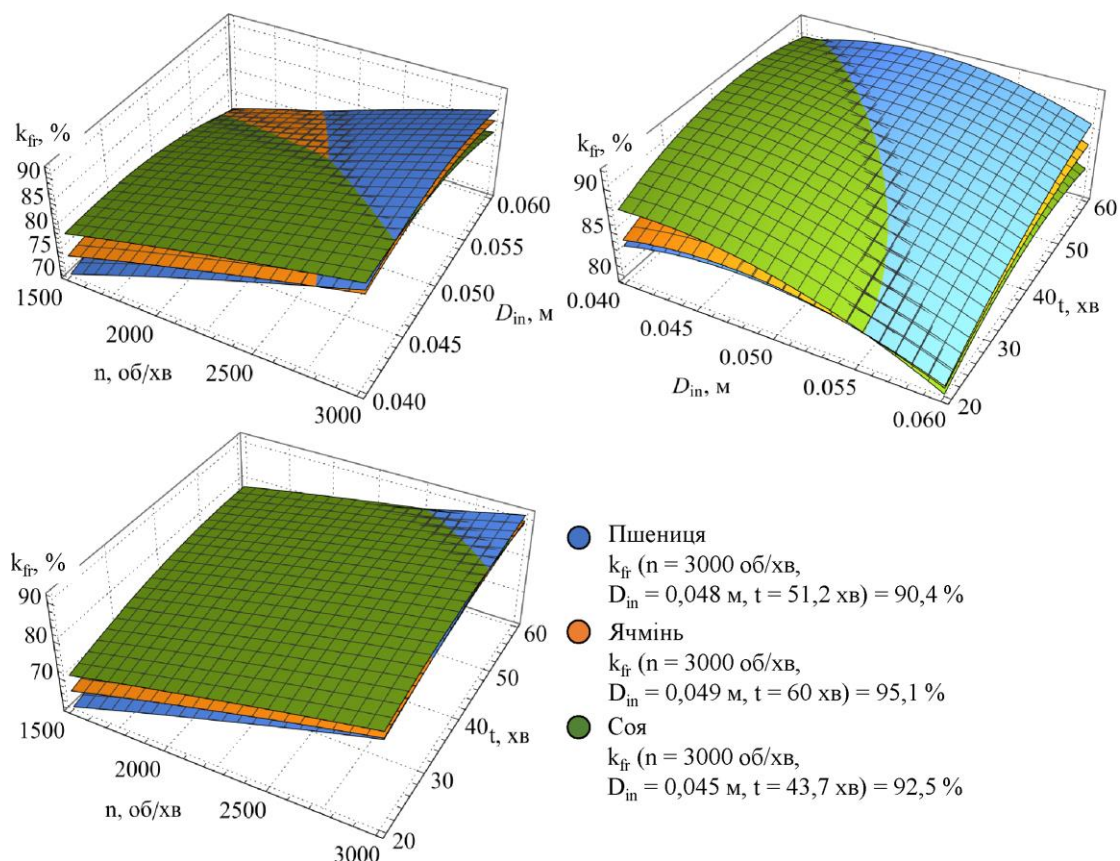
$$k_{fr} = -38,2833 + 3147,92D_{in} - 31479,2D_{in}^2 + 0,0134417n + 0,239375t; \quad (2)$$

- для сої:

$$k_{fr} = -30,6125 + 2957,92D_{in} - 33166,7D_{in}^2 + 0,0136778n - 0,000109444tn + 1,06688t - 0,00845833t^2. \quad (3)$$

Аналіз даних, що виконали за критерієм Кохрена, показує, що на 95% рівні довірчої ймовірності дисперсії однорідні:  $G_{(1)} = 0,0973$ ,  $G_{(2)} = 0,1318$ ,  $G_{(3)} = 0,1029$ , що менші за табличне значення  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для кожного з рівнянь (1)–(3) ( $F_{(1)} = 1,7033$ ,  $F_{(2)} = 1,4036$ ,  $F_{(3)} = 1,422$ ) менше за табличне значення  $F_{(0,05,8,30)} = 2,27$ . Тому отримані залежності адекватно описують процес. Графічну інтерпретацію залежностей (1)–(3) подано на **рис. 2**.

Максимізація показника вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші  $k_{fr}$  відбувається за збільшення частоти обертання робочих органів  $n$  та зменшення діаметру вхідного отвору  $D_{in}$ . Однак, при подрібненні зерна різних культур залежності відрізняються. Для випадку подрібнення пшениці показник  $k_{fr}$  збільшується зі збільшенням частоти обертання  $n$ .



**Рис. 2** – Залежності зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші ( $k_{fr}$ , %) від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

Максимальне значення показника  $k_{fr}$  у випадку подрібнення пшениці, ячменю та сої досягається за діаметру отвору, відповідно, 0,048 м, 0,049 м та 0,045 м. Для всіх культур, що досліджувалися, показник  $k_{fr}$  набуває максимального значення за досягнення найбільшої частоти обертання  $n$ . Цікавим є вплив тривалості роботи обладнання  $t$ . Після досягнення максимальних значень показника  $k_{fr}$  (за 51,2 хв для пшениці, за 60 хв для ячменю та за 44,7 хв для сої) спостерігається зміна характеру залежності. Це пояснюється досягненням критичного значення вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші  $k_{fr}$ .

Після аналізу даних експериментальних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента були складені рівняння регресії другого порядку для показника розшарованості суміші:

- для пшениці:

$$i_d = 82,0292 - 0,0597667n + 0,0000125407n^2 - 0,116875t; \quad (4)$$

- для ячменю:

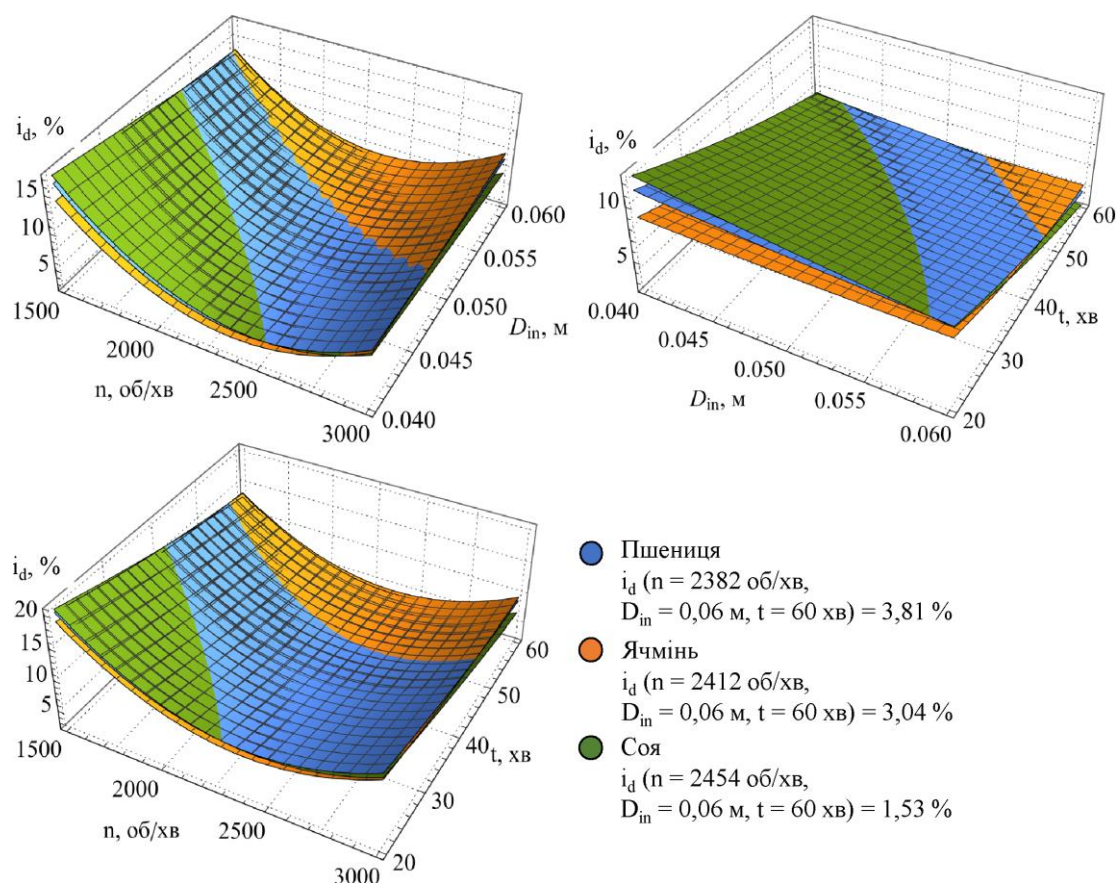
$$i_d = 80,1993 + 384,476D_{in} - 4894,76D_{in}^2 - 0,0610564n + 0,0000126557n^2 - 0,149375t; \quad (5)$$

- для сої:

$$i_d = 72,9792 + 753,472D_{in} - 9347,22D_{in}^2 - 0,0602667n + 0,000012279n^2 - 0,0807639t - 0,00117014t^2. \quad (6)$$

Результати аналізу даних за допомогою критерію Кохрена свідчать, що на рівні довіри 95% дисперсії є однорідними:  $G_{(4)} = 0,1361$ ,  $G_{(5)} = 0,1513$ ,  $G_{(6)} = 0,1157$ , їх значення менші за табличне значення критерію Кохрена  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для рівнянь також менші за табличне значення критерію  $F_{(0,05,11,30)} = 2,13$ , оскільки:  $F_{(1)} = 1,1050$ ,  $F_{(2)} = 2,0338$ ,  $F_{(3)} = 2,1135$ . Можемо зробити висновок щодо адекватності отриманих рівнянь. Графічну інтерпретацію рівнянь (4)–(6) подано на **рис. 3**.





**Рис. 3** – Залежності зміни показника розшарованості суміші ( $i_d$ , %) від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

Показник розшарованості суміші  $i_d$ , що отримана під час експерименту, починає суттєво зменшуватись за збільшення частоти обертання  $n$ , досягаючи найменшого значення за частоти обертання: 2382 об/хв (для пшениці), 2412 об/хв (для ячменю), 2454 об/хв (для сої). За подальшого збільшенні частоти обертання спостерігалось незначне збільшення показника розшарованості суміші. Аналогічно розшарованість суміші  $i_d$  залежить й від тривалості роботи обладнання. Найменше значення показника розшарованості було в інтервалі тривалості роботи обладнання від 50 хв до 60 хв. У випадку зменшення тривалості роботи показник розшарованості збільшується, приблизно на 10–12%. Діаметр вхідного отвору  $D_{in}$  на показник  $i_d$  практично не впливає. Найменше значення показника розшарованості суміші  $i_d$  залежно від виду сировини було у межах 1,53–3,81%.

Після оброблення даних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів, були отримані рівняння регресії другого порядку для температури суміші у кінці процесу:

- для пшениці:

$$T = -6,57437 - 5,22333 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0204333n + 0,000482917tn + 0,420187t - 0,0122141t^2; \quad (7)$$

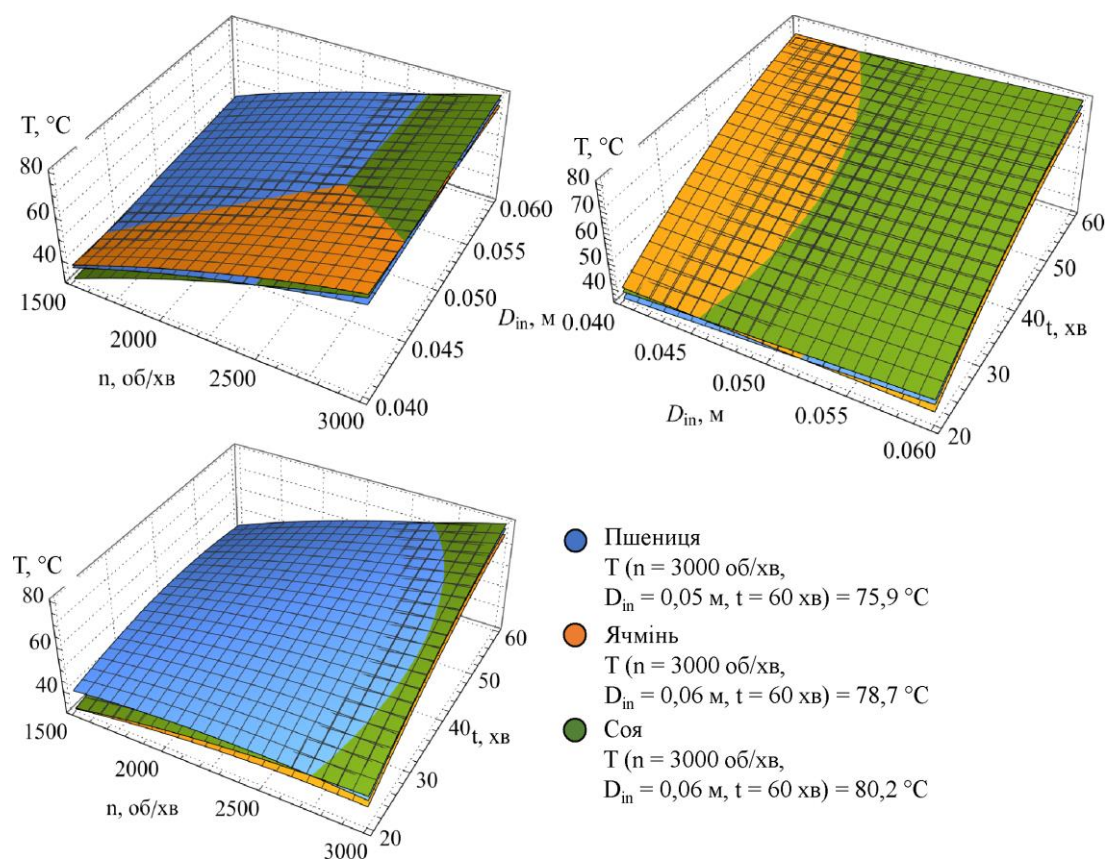
- для ячменю:

$$T = -19,4153 + 398,875D_{in} - 6,42086 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0211722n + 0,000527917tn + 0,339285t - 0,0130231t^2; \quad (8)$$

- для сої:

$$T = -15,914 + 271,375D_{in} - 4,71963 \cdot 10^{-6} n^2 + 0,0196833n + 0,000519583tn - 0,0758542t - 0,00713073t^2. \quad (9)$$

Результати аналізу даних за допомогою критерію Кохрена підтверджують однорідність дисперсій на рівні довіри 95%:  $G_{(7)} = 0,1335$ ,  $G_{(8)} = 0,1337$ ,  $G_{(9)} = 0,1320$ , що менші табличного



**Рис. 4** – Залежності зміни температури суміші ( $T$ ,  $^\circ\text{C}$ ) від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

значення  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для рівнянь також менші за табличне значення  $F_{(0,05,8,30)} = 2,27$ , зокрема:  $F_{(7)} = 1,96$ ,  $F_{(8)} = 2,26$  та  $F_{(9)} = 1,93$ . Це підтверджує адекватність отриманих рівнянь. Графічну інтерпретацію рівнянь (7)–(9) подано на **рис. 4**.

Температура суміші  $T$  під час процесу приготування рідкого корму залежить від тривалості роботи обладнання  $t$ . За збільшення тривалості процесу  $t$  з 40 хв до 60 хв, зростання температури  $T$  було з  $40^\circ\text{C}$  до  $80^\circ\text{C}$ . Прогнозуючи подальшу зміну температури  $T$  можна стверджувати про її стабілізацію на певному рівні:  $75,9^\circ\text{C}$  (для пшениці),  $78,7^\circ\text{C}$  (для ячменю),  $80,2^\circ\text{C}$  (для сої). Також підвищення частоти обертання ротора  $n$  спричиняє збільшення температури  $T$ , що пояснюється підвищенням інтенсивності подрібнення та кавітації. Спостерігається незначна різниця між температурами суміші  $T$  в середині робочої камери установки для різної сировини. Діаметр отвору  $D_{in}$  практично не впливає на зміну температури суміші  $T$ .

Проаналізуємо вплив технологічно-конструктивних параметрів обладнання на витрати енергії. Після виключення незначущих коефіцієнтів за критерієм Стюдента були отримані рівняння регресії другого порядку для споживаної потужності:

- для пшениці:

$$N = 1,86519 - 16,05D_{in} + 0,0122667nD_{in} + 1,50979 \cdot 10^{-7}n^2 - 0,000675407n - 3,93333 \cdot 10^{-6}tn - 0,0145227t + 0,000156065t^2; \quad (10)$$

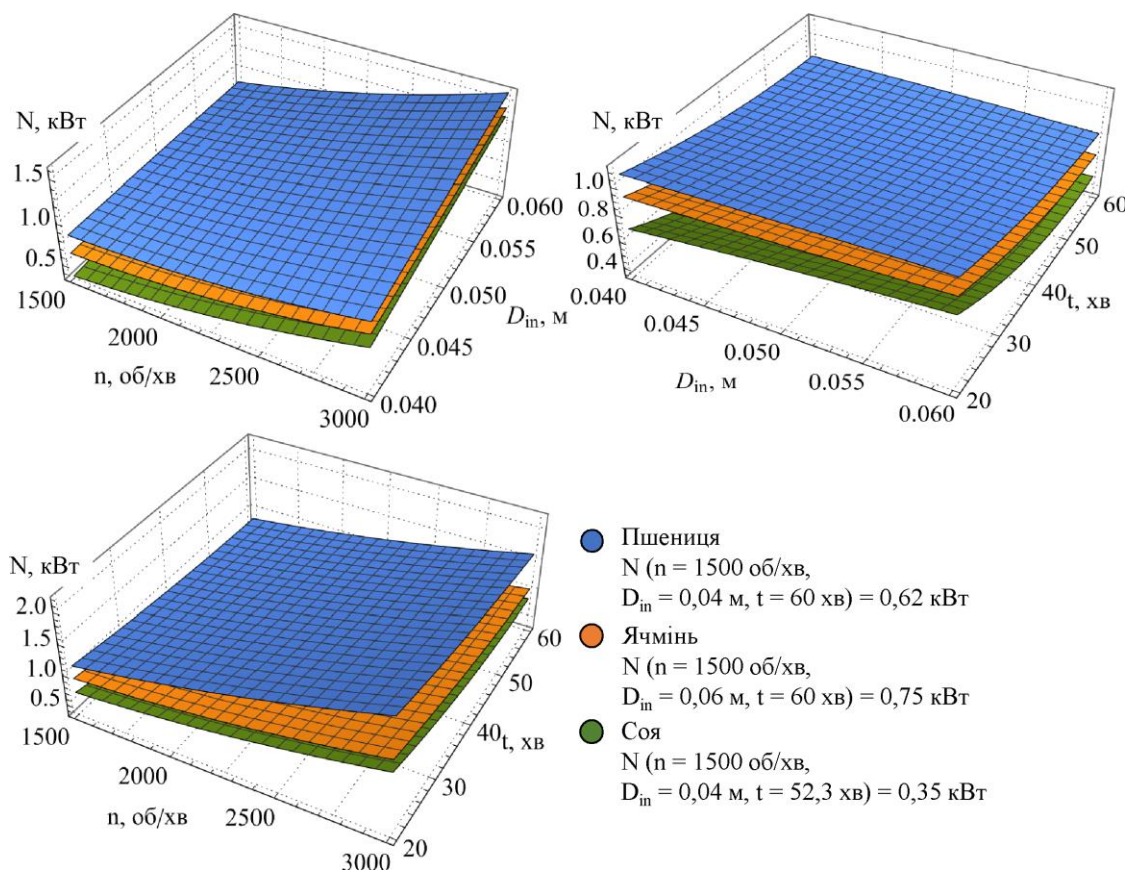
- для ячменю:

$$N = -1,00087 - 847,083D_{in}^2 + 1,03481 \cdot 10^{-7}n^2 + 74,5917D_{in} + 0,0101556nD_{in} - 0,0483333tD_{in} - 0,000335611n - 4,46111 \cdot 10^{-6}tn + 0,0103438t - 0,0000894792t^2; \quad (11)$$

- для сої:

$$N = 0,156708 + 11,6375D_{in} + 0,000478667n - 0,0452062t + 0,000428958t^2. \quad (12)$$





**Рис. 5** – Залежності зміни споживаної потужності ( $N$ , кВт) від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

Результати аналізу даних за допомогою критерію Кохрена демонструють однорідність дисперсій на рівні довіри 95%:  $G_{(10)} = 0,1349$ ,  $G_{(11)} = 0,1160$ ,  $G_{(12)} = 0,1031$ , що менші за табличне значення  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для кожного з рівнянь також менші за табличне значення  $F_{(0,05,8,30)} = 2,27$ , а саме:  $F_{(10)} = 1,56$ ,  $F_{(11)} = 2,22$ ,  $F_{(12)} = 2,15$ . Це підтверджує адекватність отриманих рівнянь. Графічна інтерпретація рівнянь регресії (10)–(12) зображена на **рис. 5**.

Мінімізація споживаної потужності  $N$  досягається за зменшення частоти обертання ротора до 1500 об/хв, а також за збільшення тривалості змішування до 60 хв. У випадку використання статора з діаметром вхідного отвору 0,04 м спостерігається найменше значення споживаної потужності  $N$ , а за збільшення діаметра вхідного отвору з 0,04 м до 0,06 м, споживана потужність збільшується на 0,43–0,51 кВт. Якщо подрібнювати сою чи ячмінь, то споживана потужність збільшується на 15,2–17,5%. При подрібненні пшениці споживана потужність має найвище значення в

інтервалі від 0,62 кВт до 1,51 кВт. Це спричинено властивостями зерна, зокрема, густиною, розміром та міцністю.

Після проведення аналізу даних експериментальних досліджень та відкидання незначущих коефіцієнтів за допомогою критерію Стюдента, були отримані рівняння регресії другого порядку для витрат енергії:

- для пшениці:

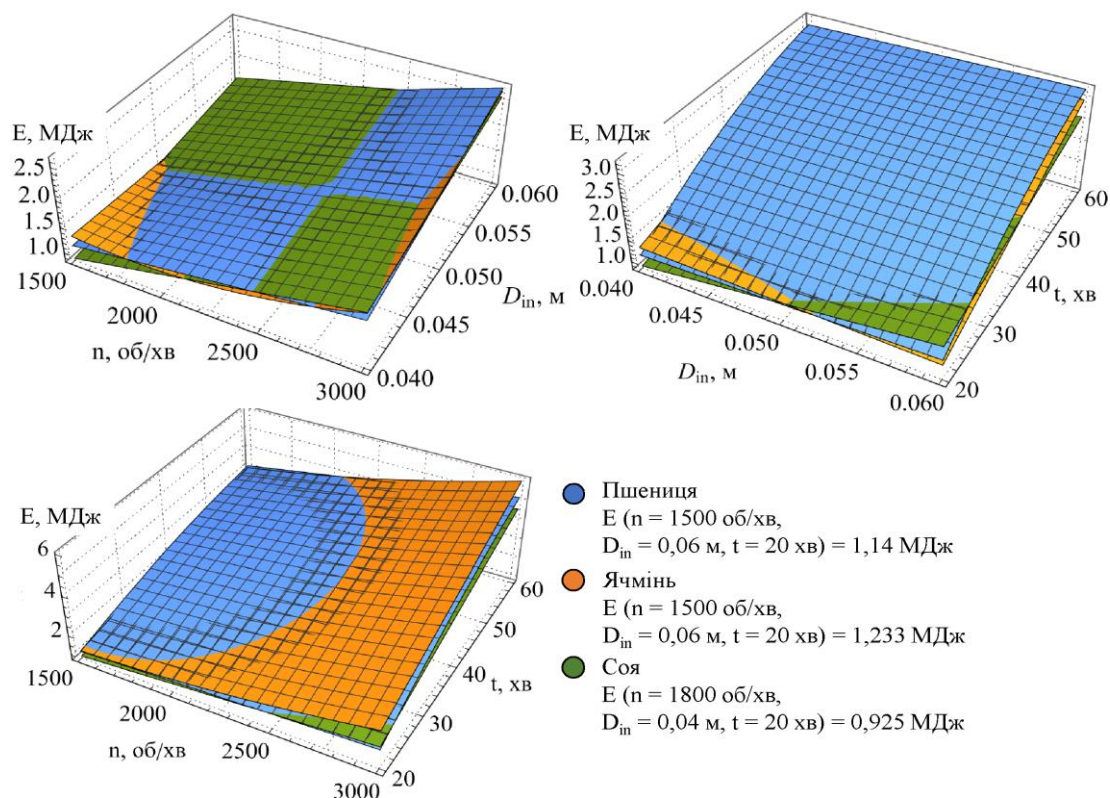
$$E = 5,7478 + 4,70578 \cdot 10^{-7} n^2 - 0,0035578n + 0,00002478tn - 69,765D_{in} + 0,0328nD_{in} + 0,6375tD_{in} - 0,02985t; \quad (13)$$

- для ячменю:

$$E = -0,916517 - 37,07D_{in} + 0,0294267nD_{in} - 0,00127713n + 0,0000250533tn + 0,0686008t - 0,000717917t^2; \quad (14)$$

- для сої:

$$E = -1,20842 + 35,51D_{in} + 0,000095n + 0,0000286467tn - 0,0175925t. \quad (15)$$



**Рис. 6** – Залежності зміни витрат енергії ( $E$ , МДж) на виконання процесу від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

Результати проведеного аналізу даних за допомогою критерію Кохрена вказують на однорідність дисперсій на рівні довіри 95%:  $G_{(13)} = 0,1559$ ,  $G_{(14)} = 0,1264$ ,  $G_{(15)} = 0,1217$ , що менші за табличне значення  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для кожного з рівнянь також менші за табличне значення  $F_{(0,05,7,30)} = 2,33$ , а саме:  $F_{(13)} = 2,21$ ,  $F_{(14)} = 2,12$ ,  $F_{(15)} = 1,76$ . Це свідчить щодо адекватності отриманих рівнянь. Графічну інтерпретацію рівнянь регресії (13)–(15) подано на **рис. 6**.

Показник витрати енергії  $E$  на виконання процесу залежить від таких факторів як тривалість роботи обладнання  $t$ , частота обертання  $n$  та діаметр вхідного отвору у статорі  $D_{in}$  диспергатора-гомогенізатора. Спостерігається значне збільшення витрат енергії  $E$  від 0,9 МДж до 6,1 МДж за збільшення тривалості змішування з 20 хв до 60 хв, при цьому зростання має лінійний характер. Збільшення витрат енергії  $E$  зі зміною діаметра вхідного отвору  $D_{in}$  у статорі майже не спостерігається. За збільшення частоти обертання ротора з 1500 об/хв до 3000 об/хв відбувається збільшення витрат енергії з 0,9 МДж до 1,8 МДж упродовж 20 хв роботи

обладнання. Це спричинено збільшенням циркуляції рідини у процесі диспергації та збільшенням навантаження на двигун.

Обґрунтуємо раціональні технологічно-конструктивні параметри установки, а для цього визначимо питомі витрати енергії  $E_Q$ . Обробивши експериментальні дані, отримали залежності у вигляді рівнянь регресії другого порядку питомих витрат енергії  $E_Q$ :

- для пшениці:

$$E_Q = 2,13427 + 380,642D_{in}^2 + 9,12781 \cdot 10^{-8}n^2 - 0,000734367n + 4,20929 \cdot 10^{-6}tn - 50,9548D_{in} + 0,00678296nD_{in} + 0,134669tD_{in} - 0,00460813t; \quad (16)$$

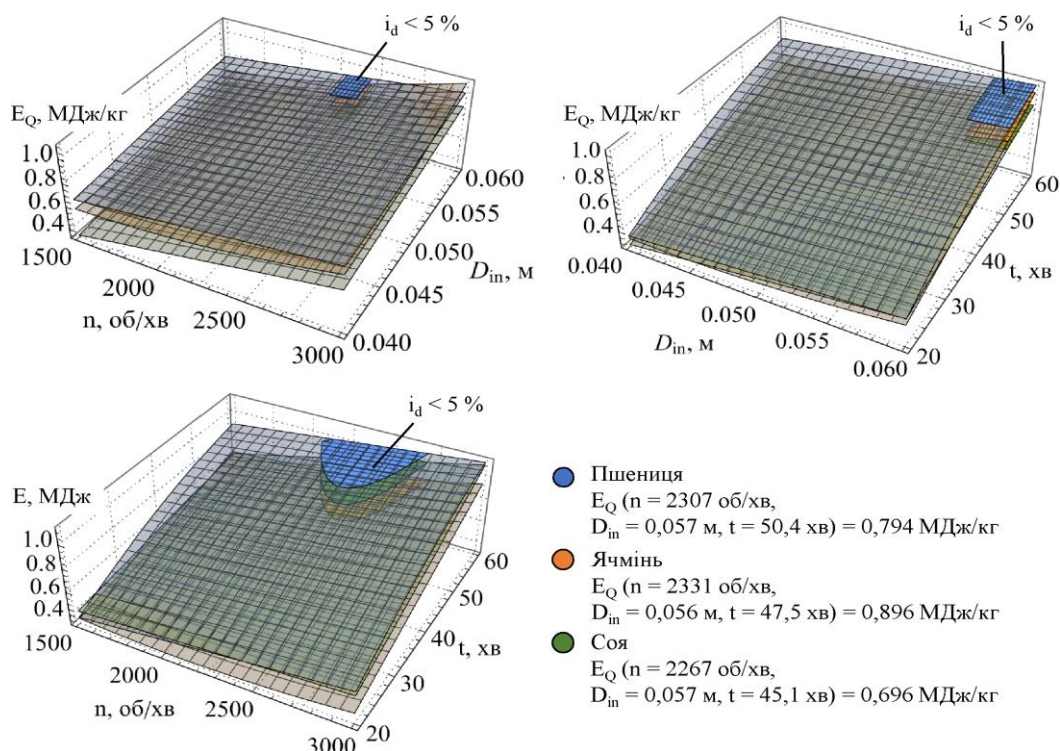
- для ячменю:

$$E_Q = -0,745819 + 6,89807D_{in} + 0,000149674n + 0,0269918t - 0,000169362t^2; \quad (17)$$

- для сої:

$$E_Q = -0,267809 + 10,535D_{in} - 0,0000278195n + 5,8242 \cdot 10^{-6}tn - 0,00364775t. \quad (18)$$





**Рис. 7** – Залежності питомих витрат енергії ( $E_Q$ , МДж/кг) на виконання процесу від частоти обертання ротора ( $n$ , об/хв), діаметра вхідного отвору статора ( $D_{in}$ , м) та тривалості роботи обладнання ( $t$ , с)

Результати аналізу даних за допомогою критерію Кохрена підтверджують однорідність дисперсій на рівні довіри 95%:  $G_{(16)} = 0,2097$ ,  $G_{(17)} = 0,2412$ ,  $G_{(18)} = 0,3139$ , що менші за табличне значення  $G_{(0,05,2,15)} = 0,3346$ . Значення критерію Фішера для кожного з рівнянь також менші за табличне значення  $F_{(0,05,7,30)} = 2,33$ , а саме:  $F_{(16)} = 1,63$ ,  $F_{(17)} = 2,12$ ,  $F_{(18)} = 2,13$ . Це підтверджує адекватність отриманих рівнянь.

Мінімізуючи питомі витрати енергії  $E_Q$  за умови дотримання показника розшарованості суміші  $i_d < 5\%$  (Dickey, 2015) побудовано графічну інтерпретацію залежностей (16)–(17) з урахуванням (4)–(6) (рис. 7).

Мінімізація питомих витрати енергії  $E_Q$  за умови, що показник розшарованості  $i_d < 5\%$ , відбувається внаслідок зменшення діаметру вхідного отвору у статорі  $D_{in}$  диспергатора-гомогенізатора до розміру 0,056–0,057 м, що, у свою чергу, спричинено зменшенням потоку рідини в середині установки. За збільшення частоти обертання ротора  $n$  з 1500 об/хв до 3000 об/хв відбувається збільшення питомих витрат енергії  $E_Q$  в межах 0,5 МДж/кг. Однак, за умови  $i_d < 5\%$  раціональна частота обертання  $n$  для різної сировини буде в межах 2267–2331 об/хв. Більш значний вплив на

питому витрату енергії має тривалість роботи обладнання  $t$ . Зокрема, за збільшення тривалості роботи обладнання  $t$  з 20 хв до 60 хв, показник питомих витрат енергії  $E_Q$  збільшується на 0,8 МДж/кг у випадку сталої частоти обертання  $n$ .

За умови  $i_d < 5\%$  та  $E_Q \rightarrow \min$  раціональне значення тривалості роботи обладнання  $t$  для різної сировини є в межах 45,1–50,4 хв. Також спостерігається незначна зміна показника питомих витрат енергії  $E_Q$  залежно від виду зернових культур. Зокрема, найменші питомі витрати енергії були: для сої – 0,696 МДж/кг, для пшениці – 0,794 МДж/кг; для ячменю – 0,896 МДж/кг.

## ВИСНОВКИ

Під час досліджень отримані залежності: зміни вмісту частинок розміром 0–0,5 мм у суміші  $k_{fr}$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ ; зміни показника розшарованості суміші  $i_d$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ ; зміни температури суміші  $T$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного

отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ ; зміни споживаної потужності  $N$  від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ ; зміни витрат енергії  $E$  на виконання процесу від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ ; зміни питомих витрат енергії  $E_Q$  на виконання процесу від частоти обертання ротора  $n$ , діаметра вхідного отвору статора  $D_{in}$  та тривалості роботи обладнання  $t$ .

Якщо параметр  $i_d$  менший за 5% та питомі витрати енергії  $E_Q$  є мінімальними, тоді оптимальне значення тривалості роботи обладнання  $t$  для різних видів сировини знаходиться у межах 45,1–50,4 хв. Найменші питомі енерговитрати становлять: для сої – 0,696 МДж/кг, для пшениці – 0,794 МДж/кг, для ячменю – 0,896 МДж/кг.

#### СПИСОК ПОСИЛАНЬ

- Aliiev, E., Maliehin, R., Ivliev, V., & Aliieva, O. (2021). Simulation of the process of cavitation treatment of liquid feed. *Scientific Horizons*, 24(2), 16-26. [https://doi.org/10.48077/scihor.24\(2\).2021.16-26](https://doi.org/10.48077/scihor.24(2).2021.16-26)
- Asaithambi, N., Singha, P., Dwivedi, M., & Singh, S. K. (2019). Hydrodynamic cavitation and its application in food and beverage industry: A review. *Food Process Engineering*, 42(5), e13144. <https://doi.org/10.1111/jfpe.13144>
- Askarniya, Z., Sun, X., Wang, Z., & Boczkaj, G. (2023). Cavitation-based technologies for pretreatment and processing of food wastes: Major applications and mechanisms – A review. *Chemical Engineering Journal*, 454(4), 140388. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140388>
- Atiemo-Obeng, V. A., & Calabrese, R. V. (2003). Rotor-stator mixing devices. In Edward L. Paul, Victor A. Atiemo-Obeng, & Suzanne M. Kresta (Eds.), *Handbook of Industrial Mixing: Science and Practice* (pp. 479-505). <https://doi.org/10.1002/0471451452.ch8>
- Camp Montoro, J., Pessoa, J., Solà-Oriol, D., Muns, R., Gasa, J., & Manzanilla, E. G. (2022). Effect of phase feeding, space allowance and mixing on productive performance of grower-finisher pigs. *Animals (Basel)*, 12(3), 390. <https://doi.org/10.3390/ani12030390>
- Delsart, M., Pol, F., Dufour, B., Rose, N., & Fablet, C. (2020). Pig farming in alternative systems: Strengths and challenges in terms of animal welfare, biosecurity, animal health and pork safety. *Agriculture*, 10(7), 261. <https://doi.org/10.3390/agriculture10070261>
- Dickey, D. S. (2015). Fundamentals of high-shear dispersers: Successful dispersion depends on a basic understanding of dispersion equipment and how dispersers should be used. *Chemical Engineering*, 122(2), 40-47.
- Everitt, B., & Hothorn, T. (2009). *A handbook of statistical analyses using R* (2nd ed.). Chapman and Hall/CRC.
- Jung, H., Lee, Y. J., & Yoon, W. B. (2018). Effect of moisture content on the grinding process and powder properties in food: A review. *Processes*, 6(6), 69. <https://doi.org/10.3390/pr6060069>
- Kim, J. S., Ingale, S. L., Baidoo, S. K., & Chae, B. J. (2016). Impact of feed processing technology on nutritional value of pig feed: A review. *Animal Nutrition and Feed Technology*, 16(2), 181-196. <https://doi.org/10.5958/0974-181X.2016.00017.2>
- Lesmes, U., Barchechath, J., & Shimoni, E. (2008). Continuous dual feed homogenization for the production of starch inclusion complexes for controlled release of nutrients. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 9(4), 507-515. <https://doi.org/10.1016/j.ifset.2007.12.008>
- Millet, S., Meyns, T., Aluwé, M., De Brabander, D., & Ducatelle, R. (2010). Effect of grinding intensity and crude fibre content of the feed on growth performance and gastric mucosa integrity of growing–finishing pigs. *Livestock Science*, 134(1-3), 152-154. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2010.06.123>
- Osorio-Arias, J. C., Vega-Castro, O., & Martínez-Monteaagudo, S. I. (2021). Fundamentals of high-pressure homogenization of foods. *Innovative Food Processing Technologies*, 2021, 244-273. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100596-5.23021-7>
- Romaniuk, W., Savinykh, P., Borek, K., Roman, K., Isupov, A. Y., Moshonkin, A., Wałowski, G., & Roman, M. (2021). The application of similarity theory and dimensional analysis to the study of centrifugal-rotary chopper of forage grain. *Energies*, 14(15), 4501. <https://doi.org/10.3390/en14154501>
- Shumway, R. H., & Stoffer, D. S. (2011). *Time series analysis and its applications: With R examples* (3rd ed.). New York: Springer.
- Sun, X., You, W., Wu, Y., Tao, Y., Yoon, J. Y., Zhang, X., & Xuan, X. (2022). Hydrodynamic cavitation: A novel non-thermal liquid food processing technology. *Frontiers in Nutrition*, 9, 843808. <https://doi.org/10.3389/fnut.2022.843808>
- van Klompenburg, T., & Kassahun, A. (2022). Data-driven decision making in pig farming: A review of the literature. *Livestock Science*, 261, 104961. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2022.104961>
- Zhou, P., Zhong, K., & Zhu, Y. (2024). Numerical study of hydrodynamic cavitation pretreatment of food waste: Effect of pressure drop on the



- cavitation behavior. *Processes*, 12(2), 300. <https://doi.org/10.3390/pr12020300>
- Zhu, X., Das, R. S., Bhavya, M. L., Garcia-Vaquero, M., & Tiwari, B. K. (2024). Acoustic cavitation for agri-food applications: Mechanism of action, design of new systems, challenges and strategies for scale-up. *Ultrasonics Sonochemistry*, 105, 106850. <https://doi.org/10.1016/j.ultsonch.2024.106850>
- Алієв, Е. Б. (2023). *Чисельне моделювання процесів агропромислового виробництва (Numerical simulation of agricultural production processes)*. Київ: Аграрна наука.
- Кисельов, О. В., Комарова, І. Б., Мілько, Д. О., & Бакарджиєв, Р. О. (2017). *Статистична обробка і оформлення результатів експериментальних досліджень (із досвіду написання дисертаційних робіт) (Statistical processing and design of the results of experimental studies (from the experience of writing dissertations))*. Інститут механізації тваринництва НААН. Запоріжжя: СТАТУС.
- Повод, М., Бондарська, О., Лихач, В., Жижка, С., Нечмілов, В., та ін. (2021). *Технологія виробництва і переробки продукції свинарства (Technology of production and processing of pig products)*. Київ: Науково-методичний центр ВФПО.