

Dmytro Makarenko Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Oleksii Derkach**, Assoc. Prof., PhD tech. sci., **Yevhen Muranov**, post graduate, **Mykola Ivashkovych**

Dnipro State Agricultural and Economic University, Dnipro, Ukraine

Influence of Lubricants on the Durability of Tribocouples

The aim of the research is to determine the influence of motor oils on operating modes, durability of tribocouples and substantiation of expediency of use of motor oils of corresponding brands.

A study of the tribological properties of motor oils from different manufacturers. Characteristic features of friction moment change during lubrication with ZIC and Xado oils have been studied. During friction in the ZIC oil environment, significant oppositely directed changes in the moment of friction (oscillation) were recorded, which indicates an unstable friction mode. At the beginning of the experiment, a gradual increase in the friction moment when lubricating tribocouples with Xado oil was recorded. Studies of the dynamics of temperature in the friction zone depending on the lubricating medium are performed. It was found that the maximum temperature in the friction zone was when using Xado and ZIC engine oil - 90.0 °C and 84.5 °C, respectively. The value of wear intensity of steel-steel tripods depending on the engine oil of different manufacturers is determined. An analysis of micrographs of surfaces before and after the experiment was performed. It is established that the amount of damage to the surface friction as a whole without drastic changes. Unidirectional light lines are the places of direct contact between two friction bodies. After the experiment with lubrication with Xado engine oil on the friction surface of the pad recorded minor accumulations in the grooves and on their peripheries.

It was found that the moment of friction when using the selected motor oils for the selected modes of friction of the tribocouples differs slightly, 1.13 N · m and 1.15 N · m, respectively, for ZIC X5 and Xado. At the same time, it should be noted that when lubricating with Xado engine oil, a higher constancy of the friction moment was recorded, compared to working in ZIC oil environment. It is established that the dynamics of temperature rise is gradual. The intensity of linear wear when using Xado oil is 17.7% lower compared to lubrication with ZIC oil. Thus, it can be concluded that the use of Xado motor oil can increase the durability of tribocouples.

lubricants, durability of tribocouples, engine oil, wear intensity, friction moment

Одержано (Received) 10.05.2022

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2022

Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022

УДК 631.36

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5\(36\).2.176-185](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2022.5(36).2.176-185)

Е. Б. Алієв, проф., д-р техн. наук, ст.досл., **М. О. Лінко**, асп.

Дніпровський державний аграрно-економічний університет, м. Дніпро, Україна

e-mail: niklinko21@gmail.com

О. Ю. Алієва, наук. співр.

Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України, м. Запоріжжя, Україна

e-mail: aliev@meta.ua

Симуляція процесу експандованого приготування кормів

Процес формування експандатів в експандері з точки зору фізики процесу зводиться до пресування суміші твердої (зернові компоненти), рідкої (у вигляді вологи) і газоподібної (пар) фаз шнековим робочим органом крізь формуючу насадку під дією зовнішнього джерела тепла. З точки зору математичного описання, зазначений процес є складним і тому його можна описати комп'ютерними методами моделювання. Проведена симуляція процесу експандованого приготування кормів в програмному пакеті Star CCM+ дає передумови для обґрунтування діапазону раціональних параметрів експандера.

корм, експандати, моделювання, симуляція, тиск, швидкість, щільність

© Е.Б. Алієв, М.О. Лінко, О.Ю. Алієва, 2022

Постановка проблеми. Експандоване приготування кормів здійснюється на відповідному високотемпературного короткочасного обладнанні сімейства HTST – експандерах, які здатні виконувати завдання приготування харчових продуктів і кормів під високим тиском. Окрім хімічних процесів, які відбуваються під час експандування (денатурації білків, амінокислот, вітамінів, крохмалю і ферментів), спостерігається зміна фізико-механічних властивостей компонентів корму і перетворення їх у експандати [1]. Так фізико-технологічні аспекти, як теплопередача, масообмін, передача імпульсу, тиск, час дії температури мають сильний вплив на властивості харчових продуктів і кормів під час експандованого приготування та можуть суттєво вплинути на якість кінцевого продукту [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання експандерів на лінії переробки кормових гранул має багато переваг, найважливішими з яких є [3]:

- покращення поживності корму (краща конверсія корму);
- більш ефективне використання сировини низької якості або навіть відходів;
- стерилізація бактеріологічно заражених матеріалів;
- кращий контроль подачі рідких добавок;
- зниження енергоспоживання pelletного преса;
- підвищення продуктивності pelletного преса;
- розширення асортименту продукції;
- можливість використання волокнистих матеріалів;
- зниження викидів пилу та втрат під час гранулювання.

Недоліком вищезгаданого рішення є подвійні витрати пари та більші витрати енергії у порівнянні із застосуванням простого гранулювання.

Застосування експандерів, як автономного пристрою може дати наступні результати [1]:

- більша модифікація крохмалистих інгредієнтів;
- знижені антихарчові фактори в продукті;
- можлива агломерація продукту;
- підвищення харчової цінності переробленої сировини.

Процес формування експандатів в експандері з точки зору фізики процесу зводиться до пресування суміші твердої (зернові компоненти), рідкої (у вигляді вологи) і газоподібної (пар) фаз шнековим робочим органом крізь формуючу насадку під дією зовнішнього джерела тепла. З точки зору математичного описання, зазначений процес є складним і тому його можна описати комп'ютерними методами моделюванням.

Найбільш відомі програмні пакети, для розрахунків за допомогою чисельних методів моделювання є AMBER, CHARMM, GROMACS, GROMOS, NAMD, Chute Maven (Hustrulid Technologies Inc.), PFC2D і PFC3D, EDEM (DEM Solutions Ltd.), GROMOS 96, ELFEN, MIMES, PASSAGE, Star CCM+ [4-5].

Аналізуючи можливості зазначених програмних пакетів для поставленої задачі симуляції формування агломератів (експандатів) в експандері було обрано Star CCM+. Star CCM+ – перший продукт, в якому реалізований спільний DEM-CFD функціонал, включено безліч опцій для моделювання мультифазної течії, з високим ступенем точності моделювати всі види теплопереносу в рідких і твердих середовищах з використанням спеціальних моделей конвекції, теплопровідності і випромінювання [6-7].

Постановка завдання. Метою досліджень є розробка і апробація методики симуляції процесу експандованого приготування кормів в програмному пакеті Star CCM+¹.

¹ В дослідженнях використовувалося програмне забезпечення «Simcenter STAR-CCM+ Academic Pack»,

Виклад основного матеріалу. Узагальнена конструктивно-технологічна схема експандера приведена на рис. 1. Основними елементами експандера є: циліндр, гвинт, горловина для подачі, формуюча насадка, нагрівач, патрубки для подачі пару. Експандер працює наступним чином. Компоненти корма подаються у горловину для подачі і потрапляють в порожнину між гвинтом і циліндром. Гвинт виконаний із змінним кроком і діаметром спіралі. В процесі руху компоненти корма ущільнюються, обробляються паром через відповідні патрубки і нагріваються з використанням нагрівача. Після ущільнення корм проходить крізь отвори формуючої насадки утворюючи відповідні агломерати – експандати. Коли експандати виходять з формуючої насадки, вони розширюються в результаті швидкого випаровування води, через різке падіння тиску. Час перебування всередині експандера становить 5–10 с при температурі 130–170 °С, при виході з матриці температура швидко зменшується до 90 °С. Після завершення цього процесу суміш поміщають в горизонтальну сушарку-охолоджувач на 10 хв, протягом яких температуру знижують до 20–24 °С відповідно до температури навколишнього середовища.

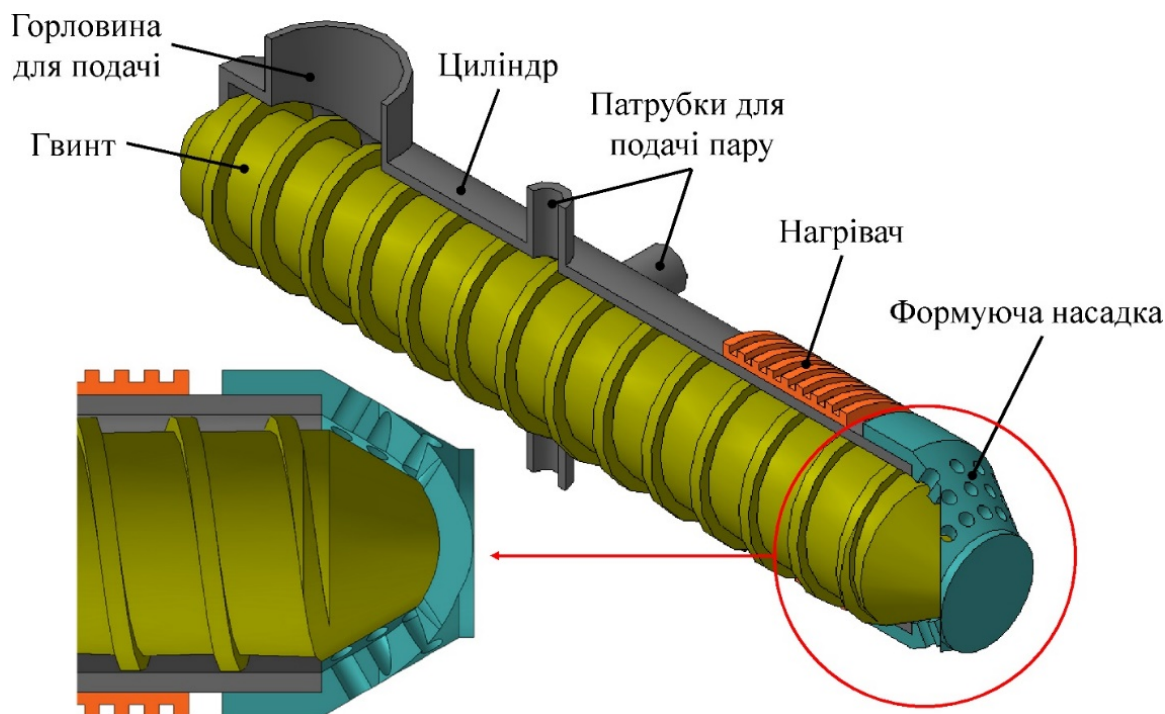


Рисунок 1 – Узагальнена конструктивно-технологічна схема експандера

Джерело: розроблено авторами

Для проведення моделювання була побудована сітка 3D моделі експандера з використанням генератора поверхневої сітки, багатограних комірок і екструдера комірок. Геометричні розміри і згенерована сітка із базовим розміром комірки 0,005 м приведено на рис. 2. Геометричні розміри елементів експандера обрані з праведного аналізу існуючих конструкцій [8-9] з урахування їх мінімізації для відтворення малогабаритного лабораторного обладнання.

Моделювання проводилися із застосуванням градієнтів у тривимірному просторі, моделі руху розділеної течії багатофазної ейлерової суміші (ММР) з використанням допустимої двошарової k-ε-моделі турбулентності і багатофазного рівняння стану.

власником ліцензії якої є Дніпровський державний аграрно-економічний університет.

Симуляція є нестационарною неявною. Теплопровідні процеси підпорядковувалися моделі розділеної багатозфазної температури. Моделювання проводилося в полі сили тяжіння. Вектор сили тяжіння є наступним – $(0; 0; -9,81) \text{ м/с}^2$.

Компоненти корма були прийняті у трьох фазах: тверде (суцільне), рідина (вологість), газ (пар). Тверда фаза була представлена вкрапленням твердих (суцільних частинок) з наступними фізичними властивостями: щільність – 800 кг/м^3 ; коефіцієнт теплопровідності – $0,285 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт питомої теплоємності – $2404,6 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Рідка фаза мала фізичні властивості води, а саме: динамічна в'язкість – $8,88 \cdot 10^{-4} \text{ Па}\cdot\text{с}$; щільність – 997 кг/м^3 ; коефіцієнт теплопровідності – $0,620 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт питомої теплоємності – $4181,7 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Газоподібна фаза мала фізичні властивості пари, а саме: динамічна в'язкість – $1,267 \cdot 10^{-5} \text{ Па}\cdot\text{с}$; коефіцієнт теплопровідності – $0,025 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$; коефіцієнт питомої теплоємності – $1938,2 \text{ Дж/(кг}\cdot\text{К)}$. Співвідношення об'ємних часток були прийняті постійними: тверда фаза – 0,5, рідка фаза – 0,45, газоподібна фаза – 0,05. Початкова температура компонентів кормів – 25°C . Абсолютний тиск навколишнього середовища – $101,325 \text{ кПа}$. Фазова взаємодія реалізована на основі моделі MMR-MMP.

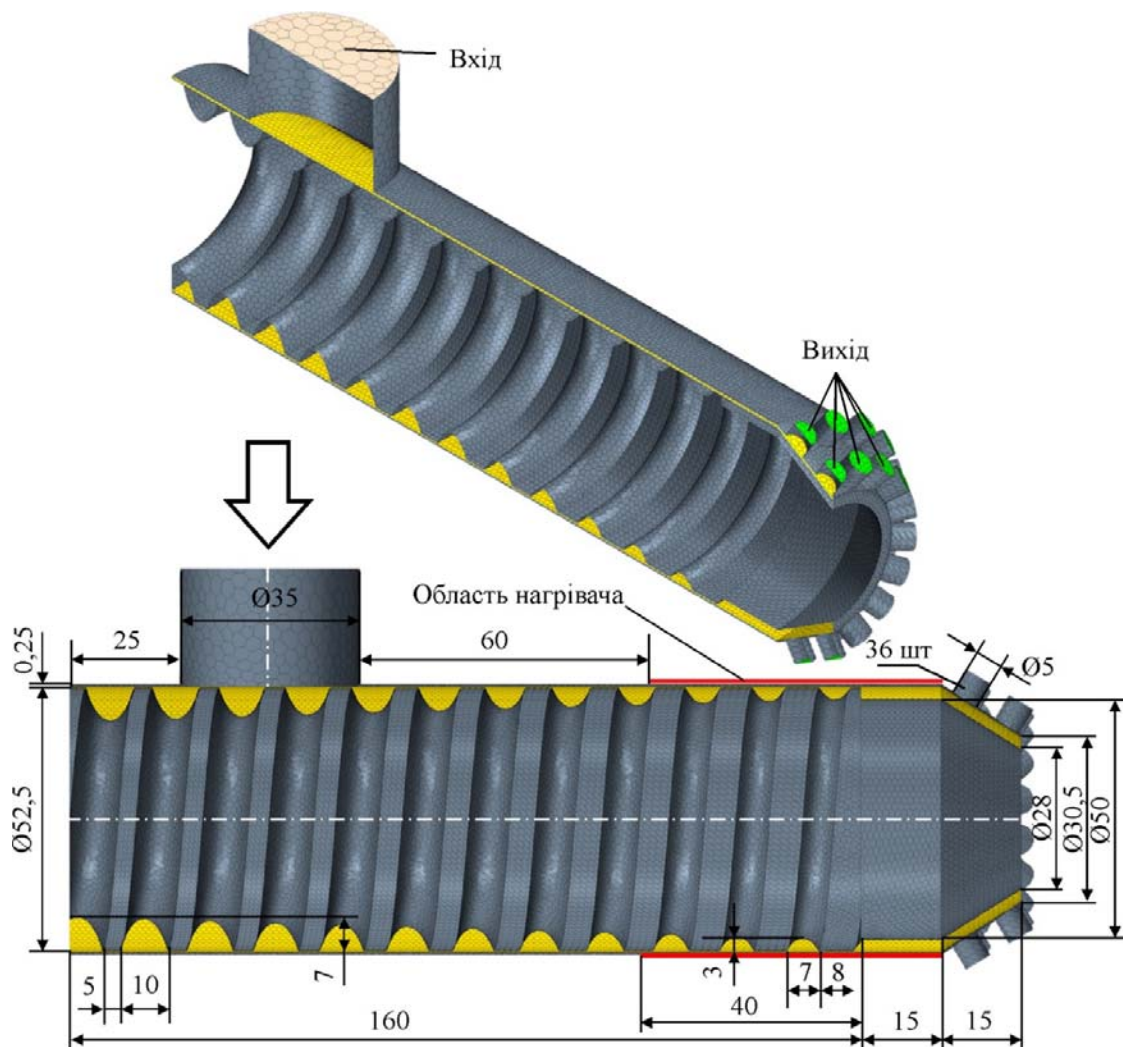


Рисунок 2 – Сітка 3D моделі експандера в Star CCM+

Джерело: розроблено авторами

Граничні параметри обрані наступні. Верхня площина горловини (вхід) для подачі представлена моделлю масового потоку суміші, яка поступає до гвинта самопливом під дією сили тяжіння. Отвори формуючої насадки (вихід) представлені вільним потоком суміші, фізичні параметри якого формуються як результат моделювання. Область нагрівача має постійну температуру 200 °С.

Гвинт обертається навколо власною осі з постійною частотою – 60 об/хв.

Вирішувач в Star CCM+ обрано нестационарний неявний із кроком за часом – 0,01 с. Дискретизація за часом першого порядку. Максимальне число ітерацій за одиницю часу – 10, що забезпечую необхідну збіжність результату. Час симуляції – 60 с.

В результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 3). З рис. 3 наочно видно, що тиск збільшується по осі гвинта в напрямку переміщення багатофазної суміші. Збільшення тиску пояснюється зменшенням об'єму порожнини вздовж осі гвинта. На виході з отворів формуючої насадки значення тиску складає $3,82 \pm 0,06$ МПа.

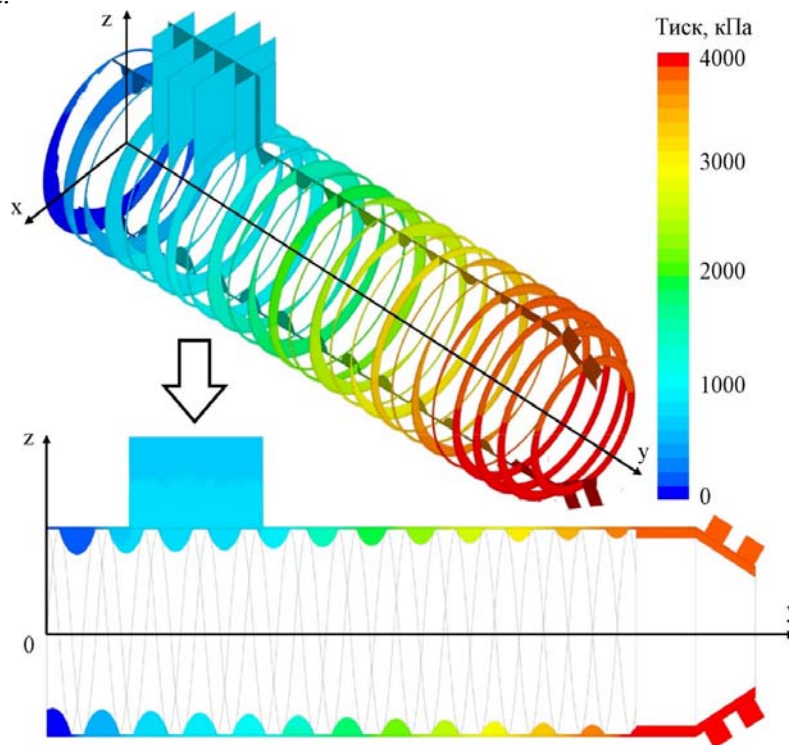


Рисунок 3 – Розподіл тиску (відносно атмосферного) в порожнині між гвинтом і циліндром експандера
Джерело: розроблено авторами

В результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл щільності суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 4). Ущільнення багатофазної суміші пропорційне збільшенню тиску в порожнині між гвинтом і циліндром експандера. Так на виході з отворів формуючої насадки значення щільності суміші є найбільшою і складає 892 ± 5 кг/м³.

В результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано векторне поле (рис. 5) і лінії потоку багатофазної суміші в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 6). Дані візуалізації наочно показують рух багатофазної суміші під дією обертання гвинта. Найбільша швидкість складає $0,157 \pm 0,005$ м/с, середня швидкість – $0,113 \pm 0,005$ м/с. З рис. 6 видно, що швидкість виходу сформованих експандатів

зменшується до $0,021 \pm 0,003$ м/с. Враховуючи загальну площу отворів ($36 \text{ шт.} \cdot 3,14 \cdot (0,005 \text{ м}/2)^2 = 0,0007065 \text{ м}^2$) отримуємо теоретичну об'ємну продуктивність $0,021 \text{ м/с} \cdot 0,0007065 \text{ м}^2 = 0,0007065 \text{ м}^3/\text{с} = 0,0534114 \text{ м}^3/\text{год}$, або в перерахунку на теоретичну масову продуктивність (враховуючи щільність згідно рис. 4) $892 \text{ кг/м}^3 \cdot 0,0534114 \text{ м}^3/\text{год} = 47,64 \text{ кг/год}$.

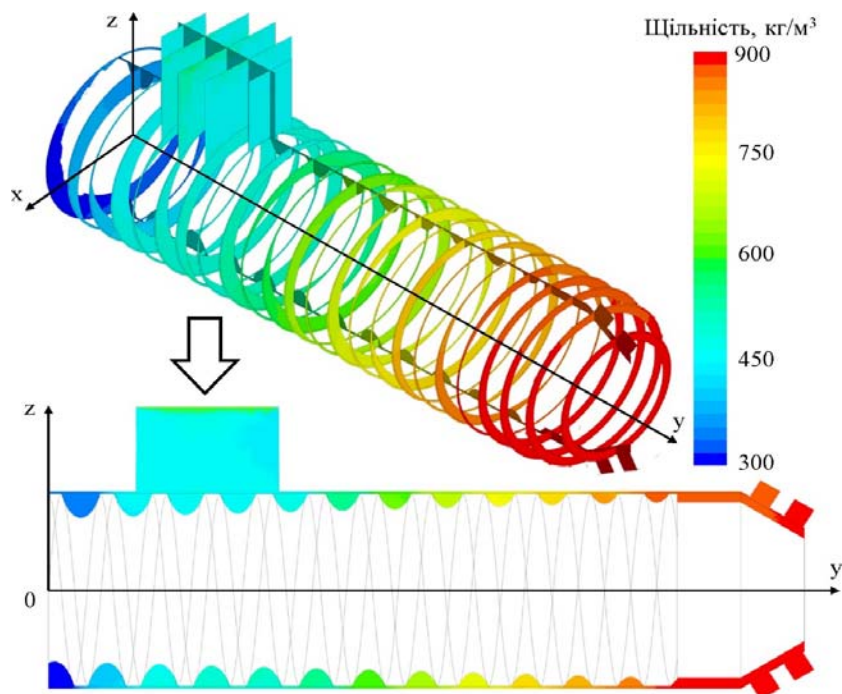


Рисунок 4 – Розподіл щільності суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром експандера
Джерело: розроблено авторами

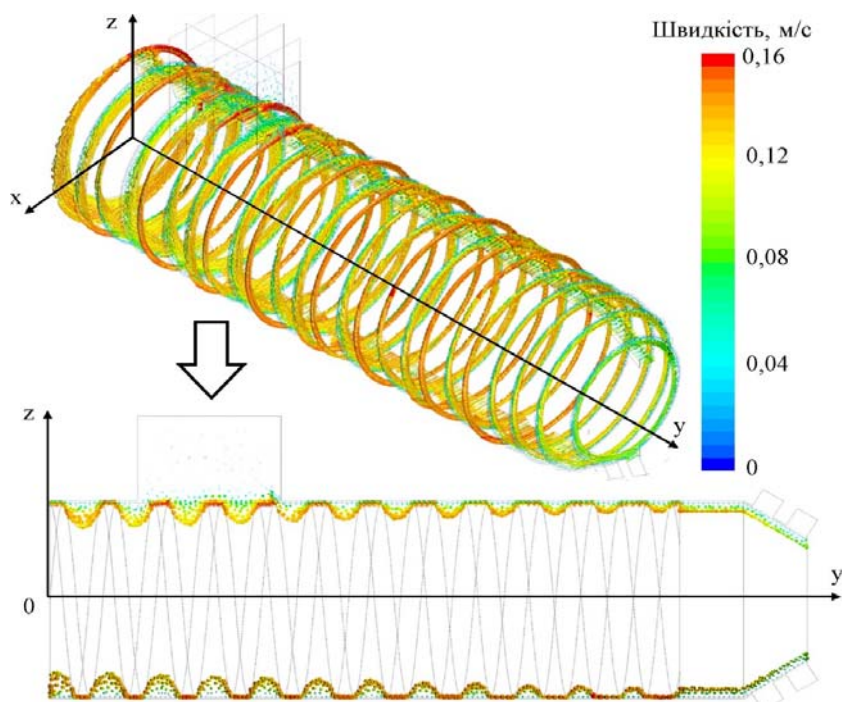


Рисунок 4 – Векторне поле суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром експандера
Джерело: розроблено авторами

Рис. 6 демонструє лінії потоку багатофазної суміші. Турбулентний потік створюється за рахунок обертання гвинта навколо власної осі. Поступове ущільнення багатофазної суміші призводить до зменшення швидкості переміщення через збільшення сил опору і в'язкого тертя.

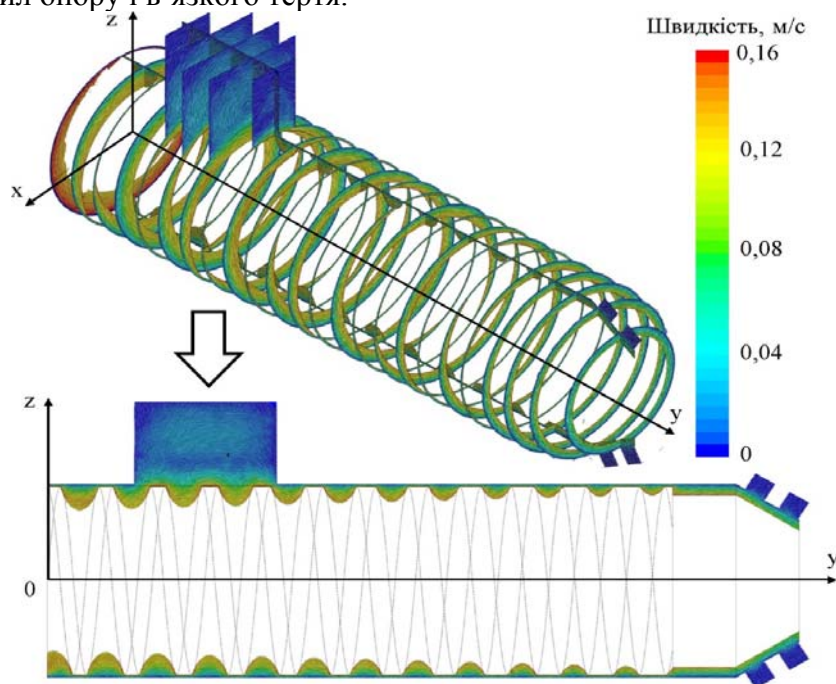


Рисунок 6 – Лінії потоку суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром експандера
Джерело: розроблено авторами

В результаті проведеної симуляції роботи експандера отримано розподіл температури суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром (рис. 7).

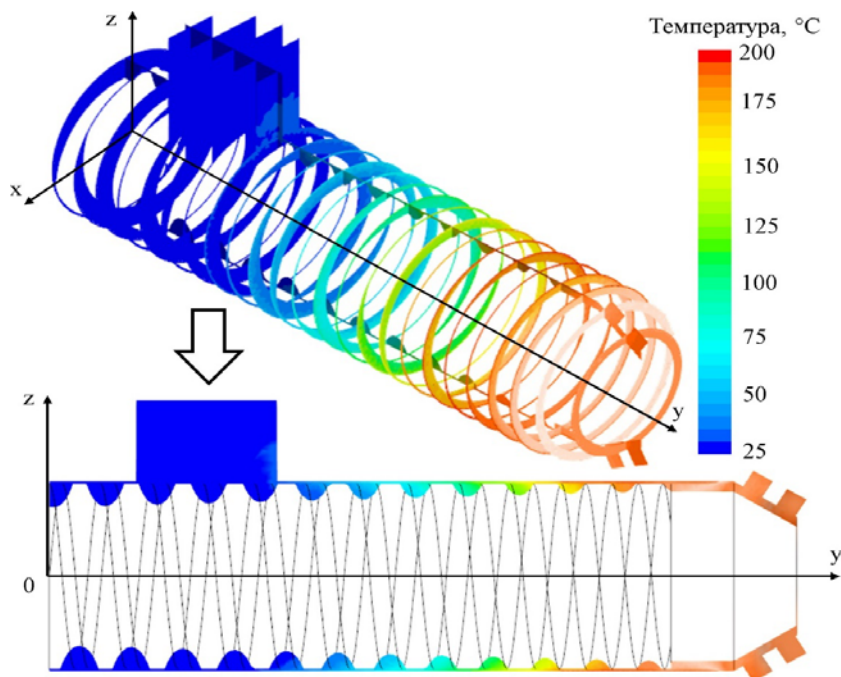


Рисунок 7 – Розподіл температури суміші фаз в порожнині між гвинтом і циліндром експандера
Джерело: розроблено авторами

Температурне поле багатофазної суміші виникає внаслідок тертя суміші о стінки циліндри і його стискання. Окрім цього в зоні нагрівача спостерігається значне підвищення температури в наслідок явища теплопровідності. Середня температура багатофазної суміші складає 154 ± 5 °С. Температура сформованих експандатів на виході складає 146 ± 4 °С.

Висновки. Проведена симуляція процесу експандованого приготування кормів в програмному пакеті Star CCM+ дає передумови для обґрунтування діапазону раціональних параметрів експандера. Симуляція роботи експандера дає змогу визначати в якості критеріїв досліджень: тиск в порожнині між гвинтом і циліндром експандера, щільність отриманих експандатів, продуктивність експандера, температурне скалярне поле і векторне поле швидкостей багатофазної суміші. В якості факторів досліджень слід обрати: співвідношення фаз багатофазної суміші, частоту обертання гвинта, температуру нагрівача, діаметр, довжину і крок гвинта.

Список літератури

1. Huimin, Li The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: Master's Thesis. Department of Animal and Aquacultural Sciences Faculty of Biosciences, 2021. 40 p.
2. Guy, R (2001). Extrusion Cooking. Technologies and Applications. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 2001. 206 p.
3. Moscicki, L., Mitrus, M., Wojtowicz, A. Technika ekstruzjiw przetworstwie rolno-spo zywczym (in Polish). PWRiL. Warszawa, 2007. 222 p.
4. Aliev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering*. 2018. Vol. 54, Nr. 1. P. 95-104.
5. Алієв Е. Б., Лабатюк Ю. М. Чисельне моделювання механіко-технологічних процесів агропромислового виробництва. Сучасні проблеми вдосконалення технічних систем і технологій у тваринництві: *Вісник Харківського Національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2017. Вип. 180. С. 67-71.
6. Алієв Е. Б., Пацула О. М., Гриценко В. Т. Технологія комплексної безвідхідної переробки макухи з насіння олійних культур з одержанням високоякісних повноцінних протеїнових добавок у вигляді пелет та твердого біопалива: Науково-методичні рекомендації. Інститут олійних культур Національної академії аграрних наук України. Електронний аналог друкованого видання (електронна книга). Запоріжжя: СТАТУС, 2017.
7. Алієв Е. Б. Фізико-математичні моделі процесів прецизійної сепарації насіннєвого матеріалу соняшнику: монографія. Запоріжжя: СТАТУС, 2019. 196 с.
8. Moscicki L. Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. *Teka Commission of Motorization Power Industry in Agriculture*. 2003. Vol. III. P. 182–186.
9. Сапа В. Ю. Совершенствование конструктивно-режимных параметров экспандера. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность: 05.20.01 - Технологии и средства механизации сельского хозяйства. ФГОУ ВПО «Оренбургский государственный аграрный университет», 2009. 161 с.

Referencis

1. Huimin, Li (2021). The effect of expanded and extruded process on pellets physical properties and in sacco rumen degradability: Master's Thesis. Department of Animal and Aquacultural Sciences Faculty of Biosciences. 40 p. [in English].
2. Guy, R (2001). *Extrusion Cooking. Technologies and Applications*. CRC Press Inc. Boca Ration. FL. 2001. 206 p. [in English].
3. Moscicki, L., Mitrus, M., Wojtowicz, A. (2007). Technika ekstruzji w przetworstwie rolno-spożywczym (in Polish). PWRiL. Warszawa. 222 p. [in English].
4. Aliiev, E. B., Bandura, V. M., Pryshliak, V. M., Yaropud, V. M., Trukhanska, O. O. (2018). Modeling of mechanical and technological processes of the agricultural industry. *INMATEH – Agricultural Engineering. Vol. 54, Nr. 1*. P. 95-104. [in English].
5. Aliiev, E.B., Labatyuk, Yu. M. (2017). *Chysel'ne modelyuvannya mekhaniko-tekhnolohichnykh protsesiv ahropromyslovoho vyrobnytstva [Numerical modeling of mechanical and technological processes of agro-industrial production]*. Modern problems of improving technical systems and technologies in animal husbandry: Bulletin of Kharkiv National Technical University of Agriculture named after Petro Vasylenko. Kharkiv, 2017. Issue. 180. pp. 67-71. [in Ukrainian].
6. Aliiev, E. B., Patsula, O. M., Gritsenko, V.T. (2017). *Tekhnolohiya kompleksnoyi bezvidkhidnoyi pererobky makukhy z nasinnya oliynykh kul'tur z oderzhannyam vysokoyakisnykh povnotsinnykh proteyinovykh dobavok u vyhlyadi pelet ta tverdoho biopalyva: Naukovo-metodychni rekomendatsiyi. [Technology of complex waste-free processing of cake from oilseeds with obtaining high-quality full-fledged protein supplements in the form of pellets and solid biofuels: Scientific and methodological recommendations]*. Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Electronic analogue of the printed edition (e-book). Zaporozhye: STATUS. [in Ukrainian].
7. Aliiev, E.B. (2019). *Fizyko-matematychni modeli protsesiv pretsyziynoyi separatsiyi nasinnyevoho materialu sonyashnyku: monohrafiya [Physico-mathematical models of processes of precision separation of sunflower seed material: monograph]*. Zaporozhye: STATUS. [in Ukrainian].
8. Moscicki, L. (2003). Effect of screw configuration on quality and SME value of corn extrudate. *Teka Commission of Motorization Power Industry in Agriculture. Vol. III*. P. 182–186 [in English].
9. Sapa, V. Y. (2009). *Sovershenstvovaniye konstruktivno-rezhimnykh parametrov ekspandera [Improving the design and regime parameters of the expander]*. Candidate's thesis. FGOU VPO "Orenburg State Agrarian University" [in Russian].

Elchyn Aliiev, Prof., DSc. Senior Researcher, **Mykolay Linko**, post-graduate

Dnipro State Agrarian and Economic University, Dnipro, Ukraine

Olga Aliieva, Researcher

Institute of Oilseeds of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Zaporizhia, Ukraine

Simulation of the Process of Expanded Feed Preparation

Expanded feed preparation is carried out on the appropriate high-temperature short-term equipment of the HTST family - expanders, which are able to perform the task of cooking food and feed under high pressure. In addition to the chemical processes that occur during expansion (denaturation of proteins, amino acids, vitamins, starch and enzymes), there is a change in the physical and mechanical properties of feed components and their transformation into expands.

From the point of view of process physics, the process of expander formation in the expander is reduced to pressing a mixture of solid (grain components), liquid (in the form of moisture) and gaseous (vapor) phases by a screw working body through a forming nozzle under the action of an external heat source. From the point of view of mathematical description, this process is complex and therefore can be described by computer simulation. Analyzing the capabilities of these software packages for the task of simulating the formation of agglomerates (expanders) in the expander was chosen Star CCM +.

The simulation of the process of expanded feed preparation in the software package Star CCM + provides the prerequisites for justifying the range of rational parameters of the expander. The simulation of the expander operation allows to determine as research criteria: the pressure in the cavity between the screw and the cylinder of the expander, the density of the obtained expands, the performance of the expander, the temperature scalar field and the velocity field vector of the multiphase mixture. As research factors should be chosen: the

phase ratio of the multiphase mixture, the speed of rotation of the screw, the temperature of the heater, diameter, length and pitch of the screw.

feed, expands, modeling, simulation, pressure, speed, density

Одержано (Received) 10.05.2022

Прорецензовано (Reviewed) 18.05.2022

Прийнято до друку (Approved) 30.05.2022