

УДК 665.33.001.73

**МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ
ДВОХШНЕКОВОГО ПРЕС-ЕКСТРУДЕРА З ІНДУКЦІЙНИМ
НАГРІВАННЯМ**

Д. С. Комарчук, кандидат технічних наук

Національний університет біоресурсів і природокористування України

E-mail: dmitruyk@gmail.com

Анотація. Удосконалено математичну модель теплових процесів при переробці ріпаку на двошнековому прес-екструдері з індуктором який забезпечує заданий технологічними умовами переробки температурний режим при рівномірному та диференційованому розподілі підведеної потужності. За результатами роботи отримано графічну характеристику розподілу температури в робочій зоні прес-екструдера та цільову теоретичну графічну залежність, що забезпечуватиме ефективніше використання енергії.

Теплофізичні явища, що виникають під час процесу підігріву зерна ріпаку, представлені наступним чином: теплова енергія, вироблена нагрівальними пристроями, витрачається на нагрівання корпусу преса (збільшення його теплоємності), частково переноситься на матеріал, що рухається в корпусі преса, кондуктивною теплопередачею та тепловою конвенцією передається в навколишнє середовище з рухомого матеріалу, тепло переноситься на поверхню шнеку і витрачається на його нагрівання.

В результаті математичного моделювання з'являються можливості підвищення ефективності прес-екструдера шляхом використання диференційованих режиму нагрівання корпусу, графічної характеристики розподілу температури в робочій зоні преса та цільової теоретичної графічної залежності, яка забезпечить більш ефективне використання енергії. Згідно з попереднім дослідженням, збільшення ширини зони тіла для преса з температурою 115 °С призводить до зниження споживання енергії екструдера на 16% за рахунок зміни фізичних характеристик насіння рапсу при підвищенні температури.

Ключові слова: *математичне моделювання, індукційний нагрів, індуктор, прес-екструдер, тепловий процес, диференційований режим, ріпак, олія*

Актуальність. Широкі межі застосування олійних матеріалів змушують збільшувати посівні площі під такими культурами як: рапс; соя; соняшник; льон. Збільшення обсягів олійного насіння створює зону енерговитрат при переробці

останнього на олію та звертає увагу науковців на пошук варіантів оптимізації щодо енергетичних витрат.

Насіння різних олійних культур переробляється на одношнекових та двошнекових прес-екструдерах [4,5]. Цей тип машин складається з: корпусу, у середині якого розміщений гвинт, та фільтруючий елемент. Тиск на насіння регулюється за допомогою зміни ширини вихідного отвору. Такий тип обладнання використовується як для остаточної, так і для попередньої переробки олійного насіння перед екстракцією. В олії, що зібрана з екструдера, містяться тверді частини, що пройшли через фільтр. Вони видаляються декантуванням та центрифугуванням, після чого в олії досягається 0,1% вмісту твердих домішок. Продуктивність пресів складає 70–80 %, але може бути підвищена до 98 % за рахунок обробітку вихідного шроту гексаном. Проте така олія міститиме багато домішок (від 6 до 8 мг КОН / г олії та фосфору близько 600 частин на мільйон) і вимагатиме якісної фільтрації перед подальшим використанням [3,5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження розподілу температури в шнекових машинах при виробництві олії в літературі практично відсутні. Теплові процеси при нагріванні самого преса і матеріалу в ньому розглядають тільки для сталого режиму і зводять до визначення потужності нагріву.

Проведений [1,2] порівняльний аналіз динамічних властивостей шнекової (черв'ячної) машини з електроелементним і індукційним нагрівом підтвердив, що індукційні системи мають більш високий ККД і в порівнянні з електроелементним нагрівом забезпечують заданий тепловий режим з меншою питомою потужністю (встановлена потужність зменшується на 30...40%).

В останній час з'явилась чітка тенденція попереднього нагрівання олійної сировини перед подачею на пресування [6]. Перевагою такої технології є рівномірність нагрівання дисперсного матеріалу в шарі при постійному перемішуванні. Але технічне виконання і апаратурна реалізація кондуктивного

способу нагріву на дисковій тепловиділяючій поверхні знижує енергетичну ефективність процесу завдяки наявності теплових втрат шляхом природної конвекції і випромінювання в оточуюче середовище та стінки апарату. Крім того присутні всі недоліки елементного електронагріву робочої поверхні.

Для виключення вказаних недоліків і підвищення енергетичної ефективності процесу в роботі пропонується новий спосіб термообробки дисперсного матеріалу з індукційним способом підведення енергії до поверхонь нагріву.

Мета дослідження – розробка математичної моделі теплових процесів у двохшнековому прес-екструдері та визначення ефективності запропонованого методу диференційованого підводу потужності до нагрівача.

Матеріали і методи дослідження. Дослідження проведено з використанням методів математичного моделювання та теорії тепломасообміну.

Результати досліджень та їх обговорення. Робоча зона преса (рис. 1) складається із корпусу, двох шнеків і нагрівальних елементів індукційного типу [1, 2, 6]. Продуктивність преса і вихід готової продукції залежить від початкової температури оброблюваної рослинної маси та температури зовнішнього середовища.

Теплофізичні явища, які відбуваються в процесі пресування, можна представити так [6]. Теплова енергія, яка генерується нагрівальними пристроями, витрачається на нагрівання корпусу преса (підвищення його теплоємності), частково передається матеріалу, що рухається в корпусі преса, кондуктивною теплопередачею та тепловою конвенцією передається в навколишнє середовище (зовнішнє повітря). Від матеріалу, що рухається, тепло передається поверхні шнека і витрачається на його нагрівання. Складність процесу полягає в тому, що інтенсивність процесу нагрівання рослинної маси змінюється як у часі, так і за координатами в напрямку руху матеріалу.

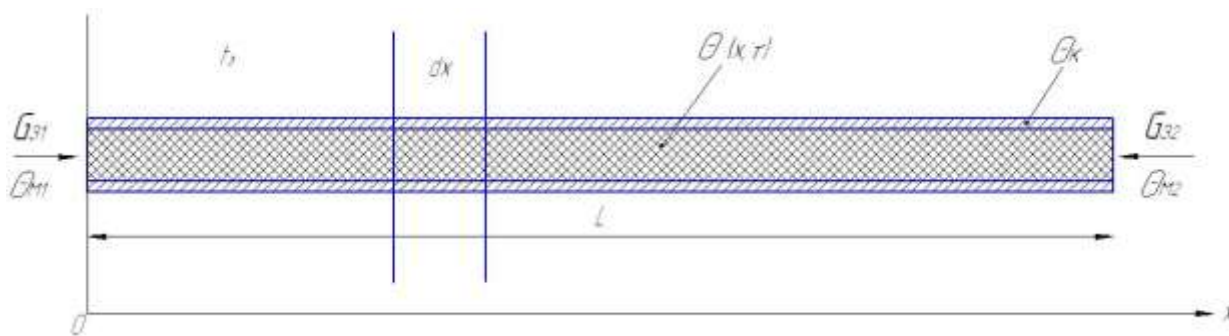


Рис.1. Розрахункова схема двохшнекового преса

Для одержання математичного опису динаміки процесу нагрівання рослинної маси у шнековому пресі приймемо такі припущення:

- градієнт температури в радіальному напрямку відсутній із врахуванням того, що корпус нагрівається за рахунок індукційного нагріву;
- теплофізичні характеристики матеріалу і конструктивних елементів процесів не змінюються в часі за координатою x і не залежать від температури;
- нехтуємо нагріванням маси за рахунок теплоти, еквівалентної механічної енергії, що витрачається на пресування і переміщення матеріалу; коефіцієнти теплообміну і теплопередачі не залежать від температури і в часі не змінюються;
- не беремо до уваги градієнт температур при теплопередачі теплопровідністю в радіальному і осьовому напрямках в корпусі та потоці матеріалу;
- приймемо також одномірний розподіл теплоти в напрямку руху матеріалу(вісь x).

Для зменшення порядку рівнянь віднесемо теплоємність шнека до теплоємності матеріалу.

Приймемо такі позначення: $\Theta_m(\tau, x)$ – температура оброблюваного матеріалу, °C; $\Theta_k(x)$ – температура корпусу, °C, t_c – температура зовнішнього середовища,

$^{\circ}\text{C}$; $c_k m_k$ – теплоємність корпусу, Дж/град ; c_m – питома еквівалентна теплоємність матеріалу, Дж/град , $c_m = c_m m_m + c_u m_u$, (m_m, m_u – маса матеріалу в об'ємі преса і шнека, кг); c_m, c_u, c_k – питома теплоємність матеріалу, шнеків та корпусу, $\text{Дж/кг}\cdot\text{град}$; α_{3m}, α_{8m} – коефіцієнти теплопередачі від корпусу до зовнішнього середовища і матеріалу, що рухається, $\text{Вт/м}^2\cdot\text{град}$; f_3, f_6 – зовнішня та внутрішня поверхня корпусу, м^2 ; L – довжина робочої зони преса, м ; G – подача матеріалу в корпусі (середня продуктивність преса), кг/с ; P – потужність нагрівальних елементів, Вт ; $q = P/L$ – питома виділення теплоти, Вт/м . Розглянемо елемент робочої зони преса довжиною dx . Відповідно до теплофізичної моделі процесу рівняння теплового балансу, що описує зміну температури буде мати вигляд для корпусу преса:

$$c_k S_k \rho_k dx d\Theta_k = P(x) dx d\tau - \frac{\alpha_6 f_6}{L} (\Theta_k - \Theta_m) - \frac{\alpha_3 f_3}{L} (\Theta_k - t_3) dx d\tau; \quad (1)$$

для оброблюваного матеріалу:

$$c \rho_m S_m dx d\Theta_m = \frac{\alpha_6 f_6}{L} (\Theta_k - \Theta_m) dx d\tau; \quad (2)$$

де c_k – теплоємність корпусу екструдера, $\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{град})$; S_k, S_m – площа перетину корпусу та матеріалу, м^2 ; ρ_k, ρ_m – густина корпусу екструдера та матеріалу, г/м^3 ; $P(x)$ – прикладена потужність нагрівачів, Вт ; L – довжина шнека, м ; α_6 – тепловіддача від внутрішньої поверхні екструдера, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2)$; f_6 – площа внутрішньої поверхні екструдера, м^2 ; α_3 – тепловіддача від зовнішньої поверхні екструдера, $\text{Вт}/(^{\circ}\text{C}\cdot\text{м}^2)$; f_3 – площа зовнішньої поверхні екструдера, м^2 ; Θ_c – температура корпусу, $^{\circ}\text{C}$; Θ_m – температура матеріалу, $^{\circ}\text{C}$.

Розкриваючи повні диференціали $d\Theta = \frac{d\Theta}{\partial\tau} \partial\tau + \frac{d\Theta}{\partial x} dx$ температур корпусу і матеріалу з урахуванням, що $\frac{dx}{\partial\tau} = V$ (V – швидкість руху для корпусу, $V=0$), а

$S\rho = \frac{G}{V}$, $m = S\rho L$. Після перетворень одержимо математичний опис теплових процесів у вигляді системи рівнянь:

$$\begin{cases} m_k c_k \frac{d\Theta_k}{d\tau} = P(x) - \alpha_6 f_6 (\Theta_k - \Theta_m) - \alpha_3 f_3 (\Theta_k - t_3); \\ m_m c_m \frac{d\Theta_m}{d\tau} + GcL \frac{d\Theta_m}{dx} = \alpha_6 f_6 (\Theta_k - \Theta_m). \end{cases} \quad (3)$$

Система рівнянь (3) аналітичного розв'язку відносно $\Theta_k(\tau)$ і $\Theta_m(\tau)$ не має, тому динамічні температурні режими будемо визначати наближеним методом [4].

Розглянемо статичні характеристики об'єкта за умови $\frac{d\Theta_k}{d\tau} = 0$; $\frac{d\Theta_m}{d\tau} = 0$. Система рівнянь (3) при цьому буде описувати сталий (встановлений) режим. Визначимо розподіл температури матеріалу за довжиною робочої зони преса.

Визначимо з першого рівняння системи (3) значення температури корпусу Θ_k :

$$\Theta_k = a + b\Theta_m, \quad (4)$$

$$\text{де } a = \frac{P(x) + \alpha_3 f_3 t_3}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 f_6}; \quad b = \frac{\alpha_6 f_6}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 f_6}.$$

Підставляючи значення a та b у друге рівняння системи (3) одержимо:

$$T_m \frac{d\Theta_m}{dx} = \alpha(x) - (1-b)\Theta_m, \quad (5)$$

$$\text{де } T_m = \frac{cGL}{\alpha_6 f_6 + \alpha_3 f_3}.$$

Розв'язок рівняння (5) отримуємо для граничних умов: $x = 0$, $\Theta_m = \Theta_1$;

$P(x) = P = \text{const}$ у вигляді:

$$\Theta(x) = \frac{a}{1-b} - \left(\frac{a}{1-b} - \Theta_1 \right) e^{-\frac{x}{T_m}(1-b)} \quad (6)$$

Розподіл температури матеріалу в робочій зоні для сталого режиму наведено на рис. 2 для температури насіння ріпаку, що відповідає температурі

навколишнього середовища, 20 °С. Аналіз графічних залежностей $\Theta(x)$ показує, що третина робочої зони використовується не ефективно, що пояснюється незначною середньою температурою зернового матеріалу.

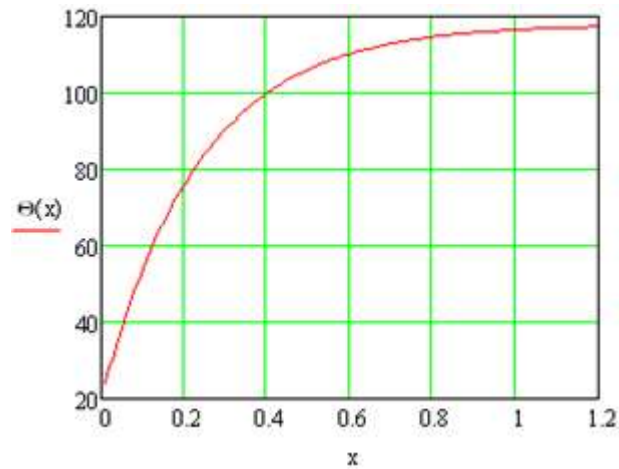


Рис. 2. Розподіл температури матеріалу в робочій зоні при сталому режимі P , $= 10 \text{ кВт}$ (Θ , °С; x , м.)

Для підвищення ефективності термообробки зерна ріпаку доцільно застосувати диференційований режим: збільшення потужності нагрівачів на початковій ділянці; зменшення потужності на ділянках виходу матеріалу з камери екструдера.

Для визначення можливості підвищення ефективності роботи преса приймемо, у першому наближенні, що потужність нагрівачів буде змінюватись експоненційно, тобто:

$$P(x) = P_1 \exp(-kx), \quad (7)$$

де P_1 – величина потужності у початковій зоні преса, Вт ; k – коефіцієнт, що визначає швидкість зміни потужності, м^{-1} .

З урахуванням залежності (7) рівняння (6) запишемо у вигляді:

$$T_m = \frac{d\Theta(x)}{dx} + B \cdot \Theta(x) = A_1 + A_2 \cdot e^{-k \cdot x}, \quad (8)$$

де $A_1 = \frac{\alpha_3 f_3 t_3}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 \alpha_6}$; $A_2 = \frac{P_1}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 f_6}$; $B = 1 - b$.

Розв'язок неоднорідного рівняння (8) за граничних умов $x=0$; $\Theta=\Theta_M$ одержано у вигляді:

$$\Theta(x) = \Theta_1 e^{-\frac{B}{T_m} x} + \frac{A_2}{B} \left(1 - e^{-\frac{B}{T_m} x} \right) + \frac{A_1}{B - kT_m} \left(e^{-kx} - e^{-\frac{B}{T_m} x} \right) \quad (9)$$

На рис. 3 наведено графічні залежності температури матеріалу за довжиною преса за умови використання диференційованого режиму нагрівання та підвищення вхідної температури матеріалу. Як впливає з аналізу графіків при експоненційній зміні потужності нагрівачів темп нагрівання матеріалу у початковій зоні зростає. Отже використання цього методу регулювання потужностей нагрівачів ефективно.

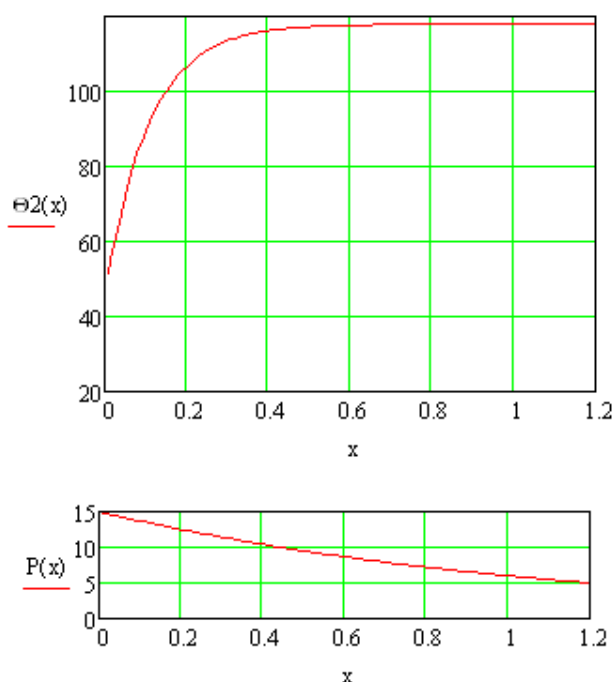


Рис. 3. Розподіл температури матеріалу в робочій зоні при диференційованому режимі нагрівання (Θ_2 , °C; P , кВт; x , м.)

Порівнявши отримані залежності розподілів температури в корпусі двохшнекового прес-екструдера рис. 2 та рис. 3 можна помітити що заданої

технологічним процесом температури олійний матеріал в середині корпусу досягає на відстані в 1 м від початку корпусу преса при постійному значенні переданої потужності (рис. 2) та на відстані в 0,6 м від початку корпусу преса при диференційованому режимі передачі потужності нагрівачу.

Висновки і перспективи. У результаті математичного моделювання виявлено можливості підвищення ефективності роботи прес-екструдера шляхом використання диференційованих режимів нагріву корпусу, одержану графічну характеристику розподілу температури в робочій зоні преса та цільову теоретичну графічну залежність, що забезпечуватиме ефективніше використання енергії. За попереднім дослідженням збільшення ширини зони корпусу преса з температурою 115 °С призводить до зниження споживаної потужності двигуна екструдера на 16 % за рахунок зміни фізичних характеристики олійного матеріалу при підвищенні температури.

Список літератури

1. Котов Б. І. Математичне моделювання електричного нагріву насіння при видавлюванні олії гвинтовим пресом // Б. І. Котов, Б. В. Хілініч. – Глеваха.: ІМЕСГ, 2005. – №89. – С. 56-62.
2. Лисенко В. П., Інтенсифікація температурної обробки олійного насіння / В. П. Лисенко, Д. С. Комарчук // Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 161. – С. 171–175.
3. Denise J. Le Raffinage des Corps Gras, Les Editions des Bep-frois, Westhoek Editions, Paris, 1984. – P. 45-46.
4. Lacaze-Dufaure, C, Z. Mouloungui, and J. Leyris, Method and Apparatus for Making Fatty Acid Esters from Oil-Containing Seeds, PCT WO 97/38069 (FR 96/4502) (1997).
5. C. Dufaure, J. Leyris, L. Rigal and Z. Mouloungui, Twin-Screw Extruder for Oil Extraction: I. Direct expression of oleic sunflower seeds, JAOCS, France, Vol.76, no. 9, 1999. – P. 1073-1079.
6. Лисенко В.П. Математичне моделювання теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом / В. П. Лисенко, Б. І. Котов, Д. С. Комарчук. – Науковий вісник НУБіП України. – 2011. – Вип. 166, ч. 4. – С. 113–119.

References

1. Kotov, B. I., Khilnich, B. V. (2005). Matematychnе modeliuвання elektrychnoho nahrivu nasinnia pry vydavliuvanni olii hvyntovym presom

[Mathematical modeling of electric heating of seeds when oil is pressed with screw press.] Hlevakha.: IMESH, 89, 56-62.

2. Lysenko, V. P., Komarchuk, D. S. (2011). Intensyfikatsiia temperaturnoi obrobky oliinoho nasinnia [Intensification of temperature treatment of oilseeds]. Naukovyi visnyk NUBiP, 161, 171–175.

3. Denise, J., Le (1984). Raffinage des Corps Gras, Les Editions des Bef-frois, Westhoek Editions, Paris, 45-46.

4. Lacaze-Dufaure C., Mouloungui Z., Leyris J. (1997). Method and Apparatus for Making Fatty Acid Esters from Oil-Containing Seeds, PCT WO 97/38069 (FR 96/4502).

5. Dufaure C., Leyris J, Rigal L, Mouloungui Z. (1999). Twin-Screw Extruder for Oil Extraction:I. Direct expression of oleic sunflower seeds, JAOCS, France, 76 (9), 1073-1079.

6. Lysenko, V. P., Kotov, B. I., Komarchuk, D. S., (2011). Matematychni modeliuvannia teplovykh protsesiv pres-ekstrudera z induktsiinym obihrivom {Mathematical modeling of thermal processes of the press-extruder with induction heating}. Naukovyi visnyk NUBiP, 166 (4), 113-119.

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ДВОХШНЕКОВОГО ПРЕСС-ЭКСТРУДЕРА С ИНДУКЦИОННЫМ НАГРЕВОМ

Д. С. Комарчук

Аннотация. Усовершенствована математическая модель тепловых процессов при переработке рапса на двухшнековом пресс-экструдер с индуктором который обеспечивает заданный технологическими условиями переработки температурный режим при равномерном и дифференцированном распределении подведенной мощности. По результатам работы получено графическую характеристику распределения температуры в рабочей зоне пресс-экструдера и целевую теоретическую графическую зависимость, обеспечивать эффективное использование энергии.

Теплофизические явления, возникающие в процессе подогрева зерна рапса, представленные следующим образом: тепловая энергия, произведенная нагревательными устройствами, расходуется на нагрев корпуса пресса (увеличение его теплоемкости), частично переносится на материал, движется в корпусе пресса, кондуктивной теплопередачей и тепловой конвекции передается в окружающую среду с подвижного материала, тепло переносится на поверхность шнека и расходуется на его нагрев.

В результате математического моделирования появляются возможности повышения эффективности пресс-экструдера путем использования дифференцированных режима нагрева корпуса, графической характеристики распределения температуры в рабочей зоне пресса и целевой

теоретической графической зависимости, которая обеспечит более эффективное использование энергии. Согласно предыдущим исследованиям, увеличение ширины зоны тела для пресса с температурой 115 °С приводит к снижению потребления энергии экструдера на 16% за счет изменения физических характеристик рапсовых зерен при повышении температуры.

Ключевые слова: математическое моделирование, индукционный нагрев, индуктор, пресс-экструдер, тепловой процесс, дифференцированный режим, рапс, масло

MATHEMATICAL MODELING OF THERMAL PROCESSES OF A DOUBLE-STONE PRESS-EXTRUDER WITH INDUCTION HEATER

D. Komarchuk

Abstract. *The mathematical model of thermal processes during rapeseed oil processing on a two-screw extruder with an inductor has been improved, which provides the temperature regime specified by technological conditions for processing with a uniform and differentiated distribution of the power supplied. Based on the results of the work, a graphical characteristic of the temperature distribution in the working zone of the press extruder and the target theoretical graphical dependence is obtained, and the efficient use of energy is provided.*

The thermophysical phenomena that occur during the rape seed pressing process represented as follows: the heat energy generated by the heating devices is spent on heating the press body (increasing its heat content), partially transferred to the material moving in the body of the press, conductive heat transfer and thermal convection is transferred to the environment; from the moving material, the heat is transferred to the surface of the screw and spent on its heating.

As a result of mathematical modeling, the possibilities of increasing the efficiency of the press extruder through the use of differentiated heating modes of the case, the graphical characteristic of the temperature distribution in the working zone of the press and the target theoretical graphical dependence, which will ensure more efficient use of energy, have been identified. According to a preliminary study, an increase in the width of the press body zone with a temperature of 115 °C leads to a 16% reduction in the extruder engine power consumption by changing the physical characteristics of the rape's oil material when the temperature rises.

Key words: *mathematical modeling, induction heating, inductor, press extruder, thermal process, differentiated mode, rape, oil*