



УДК 665.33.001.73

## СИСТЕМА ІНДУКЦІЙНОГО НАГРІВАННЯ РІПАКОВОГО ЗЕРНА В ТЕХНОЛОГІЧНОМУ ПРОЦЕСІ ВИРОБНИЦТВА ОЛІЇ

Лисенко В. П., д.т.н.,

Комарчук Д. С., к.т.н.

*Національний університет біоресурсів і природокористування України*

Тел. (068)129-36-47

**Анотація** - розроблено методику розрахунку параметрів індукційного нагрівача як окремого вузла теплової обробки для розміщення його безпосередньо на корпусі прес-екструдера. Досліджено розподіл електромагнітного поля індуктора за діаметром та довжиною зернового каналу, завантаженого пучком феромагнітних стрижнів. Розроблено алгоритм використання нечітких нейронних мереж для визначення енергоефективних режимів функціонування індукційного нагрівача та створено поновлювальну базу знань режимів роботи вдосконаленого обладнання.

**Ключові слова** – математичне моделювання, прес-екструдер, тепловий процес, індукційний нагрів, еквівалентний діаметр, ріпак, олія.

*Постановка проблеми.* Широка сфера застосування продуктів переробки ріпакового зерна у побутово-технічних галузях та використання його як сировини, що підвищує екологічність виробництва дизельного пального, стимулює пошук шляхів збільшення ефективності технологій переробки зерна ріпака. Важливим у технологічному процесі перероблення ріпака є температурний режим. Способи, що використовуються нині для теплового оброблення зерна, не дають змоги ефективно виконувати цю операцію без погіршення технологічних характеристик обладнання. Нерівномірність температурного поля, що його створюють традиційні нагрівачі та стислий термін їх експлуатації, спонукає до пошуку альтернативних способів теплової обробки ріпакового зерна.

Заслуговує на увагу індукційне нагрівання, котре здатне ефективно забезпечити відповідні температурні режими технологічного обладнання. Екологічність, малий час розгону, можливості інтенсифі-



кації теплообміну між дисперсним матеріалом та теплообмінною поверхнею сприяє впровадженню електротехнологічних комплексів з індукційним способом передачі енергії в операції теплового оброблення дисперсних матеріалів.

Незважаючи на достатню кількість вже проведених досліджень, можливості вдосконалення індукційних нагрівачів дисперсних матеріалів ще не вичерпані. Тому розроблення електротехнологічних комплексів із системою автоматичного керування обробленням зерна ріпака, що забезпечує ефективні режими роботи прес-екструдера, є актуальною науково-практичною задачею.

*Аналіз останніх наукових досліджень.* Загальні теоретичні і практичні основи теплової обробки дисперсних матеріалів базуються на фундаментальних наукових працях О. В. Ликова, А. С. Гінзбурга, наукові основи і практичні методи удосконалення способів і технічних засобів індукційного способу передачі енергії знайшли розвиток у роботах М. Г. Лозинського, Г. І. Бабата, Н. М. Родигіна, І. П. Кондратенка.

Проаналізовані літературні джерела з питань сучасних технологій і технологічних засобів теплового оброблення дисперсних матеріалів [4] свідчать, що існуючі методи і технічні засоби теплового оброблення малоефективні, енергоємні, а можливості їх енергетичного і технологічного вдосконалення майже вичерпані. Застосування електротехнологічного комплексу з індукційним способом підведення енергії дає змогу найпростіше і більш ефективно реалізувати прогресивні режими теплового оброблення дисперсних матеріалів і суттєво підвищити продуктивність процесу та зменшити питомі витрати енергії.

Проте використання такого типу електротехнологічних комплексів стримується недостатньою вивченістю технологічних показників процесу і конструкцій поверхні теплообміну.

*Формулювання мети статті.* Метою цієї наукової роботи є вдосконалення процесу теплового оброблення зерна ріпака, обґрунтування принципів підвищення ефективності процесу отримання олії та дослідження впливу конструктивно-режимних параметрів індукційного нагрівача на показники ефективності роботи промислового обладнання переробки ріпака.

*Основна частина.* За результатами аналізу теплового балансу в прес-екструдері, котрий є основною ланкою для виробництва ріпакової олії, сформовано диференційні рівняння – теплофізичну модель [5, 6, 7, 8], розв'язок яких дозволяє отримати статичні і динамічні характеристики цього об'єкта дослідження. Результат рішення рівнянь теплового балансу для граничних умов  $x=0$ ,  $\Theta_m = \Theta_1$ ,  $P(x) = P = const$  має вигляд



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

де  $a = \frac{P(x) + \alpha_3 f_3 t_3}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 f_6}$ ;  $b = \frac{\alpha_6 f_6}{\alpha_3 f_3 + \alpha_6 f_6}$ ;  $T_m = \frac{c_m GL}{\alpha_6 f_6 + \alpha_3 f_3}$ ;  $P$  – потужність нагрівальних елементів,  $Вт$ ;

$\alpha_3$  – тепловіддача від зовнішньої поверхні екструдера,  $Вт/(^{\circ}С \cdot м^2)$ ;

$\alpha_6$  – тепловіддача від внутрішньої поверхні екструдера,  $Вт/(^{\circ}С \cdot м^2)$ ;

$f_3$  – площа зовнішньої поверхні екструдера,  $м^2$ ;

$f_6$  – площа внутрішньої поверхні екструдера,  $м^2$ ;

$\Theta_m$  – температура матеріалу,  $^{\circ}С$ ;

$t_3$  – температура зовнішнього середовища,  $^{\circ}С$ ;

$c_m$  – теплоємність матеріалу,  $Дж/(кг \cdot град)$ ;

$G$  – подача матеріалу в корпусі (середня продуктивність преса),  $кг/с$ ;

$L$  – довжина робочої зони пресу,  $м$ .

Аналіз виразу (1) виявляє можливості підвищення ефективності роботи прес-екструдера шляхом збільшення зони пресу з рекомендованими технологічними температурними параметрами, а застосування індукційного нагрівача для виходу на такі параметри забезпечить ефективне використання енергії. Конструктивні особливості індукційного нагрівача мають важливе значення, оскільки геометрія індуктора суттєво впливає на його енергетичні характеристики.

При розрахунках енергетичних характеристик індукційного нагрівача, який має овальну форму і відповідає формі корпусу преса, застосовують методи розрахунку, котрі передбачають використання поняття еквівалентного діаметра завантаження індуктора.

Еквівалентний діаметр некругового циліндра з урахуванням режимів роботи індукційного нагрівача визначається на основі проведення чисельних експериментів, що виконуються із використанням програмного продукту COMSOL Multiphysics [1, 2].

Розподіл в просторі електромагнітного поля визначається за результатами розв'язку таких диференціальних рівнянь [2]

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 H_{xm}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{xm}}{\partial y^2} - i\sigma\mu\omega H_{xm} = 0, \\ \frac{\partial^2 H_{ym}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 H_{ym}}{\partial y^2} - i\sigma\mu\omega H_{ym} = 0, \end{cases} \quad (2)$$



де  $H_m$  – комплексна амплітуда вектора напруженості магнітного поля, А/м;  $x, y$  – просторові координати.

Розв'язок системи (2) знаходиться за умови, що значення складової напруженості магнітного поля на зовнішній границі корпусу  $H_z$  задано

$$H_z|_{\Gamma} = H_{z0}. \quad (3)$$

Розв'язок системи (2) виконувався із використанням програмного пакета COMSOL Multiphysics. Еквівалентний діаметр розраховувався за периметром некругової моделі з урахуванням уточнень при зміні значень напруженості магнітного поля і частоти живлення

$$D_{ек} = \frac{1}{k} \frac{\Pi}{\pi}, \quad (4)$$

де  $\Pi$  – периметр деталі, м;  
 $k$  – коригуючий коефіцієнт.

За результатами експерименту отримано регресійне рівняння залежності коригуючого коефіцієнта  $k$  від напруженості електромагнітного поля та частоти джерела живлення

$$k(H, f) = 0,955 + 4,468 \cdot 10^{-7} H - 8,1 \cdot 10^{-6} f - 2,63 \cdot 10^{-11} Hf - 1,23 \cdot 10^{-12} H^2 + 6,56 \cdot 10^{-10} f^2. \quad (5)$$

де  $H$  – напруженість магнітного поля, А/м;  $f$  – частота, Гц.

Отримані рівняння дозволяють з достатньою точністю виконати розрахунок геометричних та енергетичних характеристик індукторів, котрі можуть бути розміщені безпосередньо на корпусі пресекструдера, заміщуючи традиційні ніхромові нагрівачі. Однак різноманіття конструкцій промислових пресів із переробки олійного матеріалу спонукає до синтезу універсального технічного рішення, яке дозволить використовувати переваги індукційного нагріву в поєднанні з методами інтенсифікації процесів теплової обробки дисперсних матеріалів.

Пропонується нова установка для теплового оброблення дисперсного матеріалу [9], що не потребує внесення змін у конструкцію преса та живиться від електричної мережі промислової частоти. Вважається, що дисперсний матеріал контактуватиме з розосередженою по об'єму каналу теплообмінною поверхнею у вигляді феромагнітних стрижнів з можливістю радіального обертання, а сам матеріал рухатиметься вздовж поверхні під дією гравітаційних сил. Енергія до поверхні стрижнів передається розміщеним ззовні індуктором.

Для визначення раціональних конструктивних характеристик установки температурного оброблення дисперсного матеріалу необхідно визначити геометричні параметри теплообмінної поверхні. Ця поверхня являє собою пучок феромагнітних стрижнів, які не мають електричних контактів між собою за довжиною індуктора. Розміщення стрижнів в об'ємі зернового каналу виконується з урахуванням умови самовільного витікання, а відстань між ними визначається як

$$A \geq (3 \div 6) a', \quad (6)$$

де  $a'$  – максимальний розмір частинок сипучого матеріалу, мм.

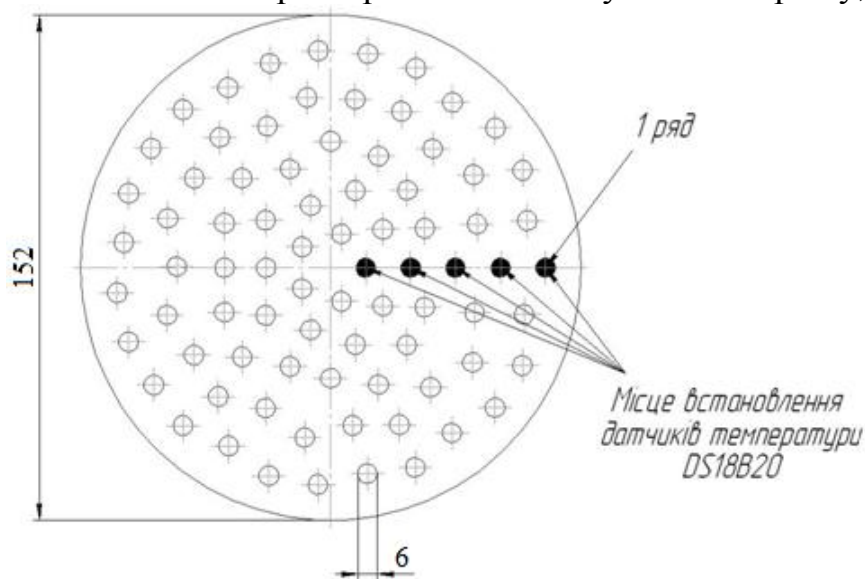


Рис. 1. Схема розміщення феромагнітних стрижнів у каналі

Діаметр зернового каналу установки  $D$  має відповідати діаметру вхідної горловини преса. Кількість стрижнів каналу визначено за принципом побудови рівномірного ряду, кількість діаметральних рядів дорівнює

$$n = \frac{\frac{D}{2} - \bar{A}}{A + d_{cm}}, \quad (7)$$

де  $d_{cm}$  – діаметр стрижнів, мм;  $\bar{A}$  – середня допустима відстань між стрижнями, мм.

Кількість стрижнів у кожному діаметральному ряді визначається співвідношенням

$$m_i = \frac{\pi d_i}{A_{\max} + d_{cm}}, \quad (8)$$

де  $d_i$  – діаметр  $i$ -того ряду стрижнів, мм.

Для визначення основних закономірностей перебігу процесу теплового оброблення та кінетики нагрівання теплообмінної поверхні виготовлено лабораторну установку - досліджувався розподіл темпе-

ратури за довжиною та радіусом теплообмінної поверхні, що дало змогу визначити тривалість і рівномірність нагрівання стрижнів. При цьому феромагнітні стрижні поміщались у зернопрохідний канал, навколо котрого розміщувався багатовитковий індуктор.

Результати досліджень показали, що динаміка приросту температури зовнішніх та внутрішніх рядів стрижнів вирізняється. Різниця температур у різних радіальних зонах свідчить про нерівномірність електромагнітного поля у зернопрохідному каналі, що може бути пов'язано з «кінцевим» ефектом індуктора. При переміщенні датчиків температури до центру індуктора розбіжність вимірених значень температури зменшується.

У центральній частині індуктора температура стрижнів зростає рівномірно, оскільки індуктор і завантаження виконані симетричними щодо осі абсцис тому розподіл температури за довжиною також є симетричним (рис. 2).

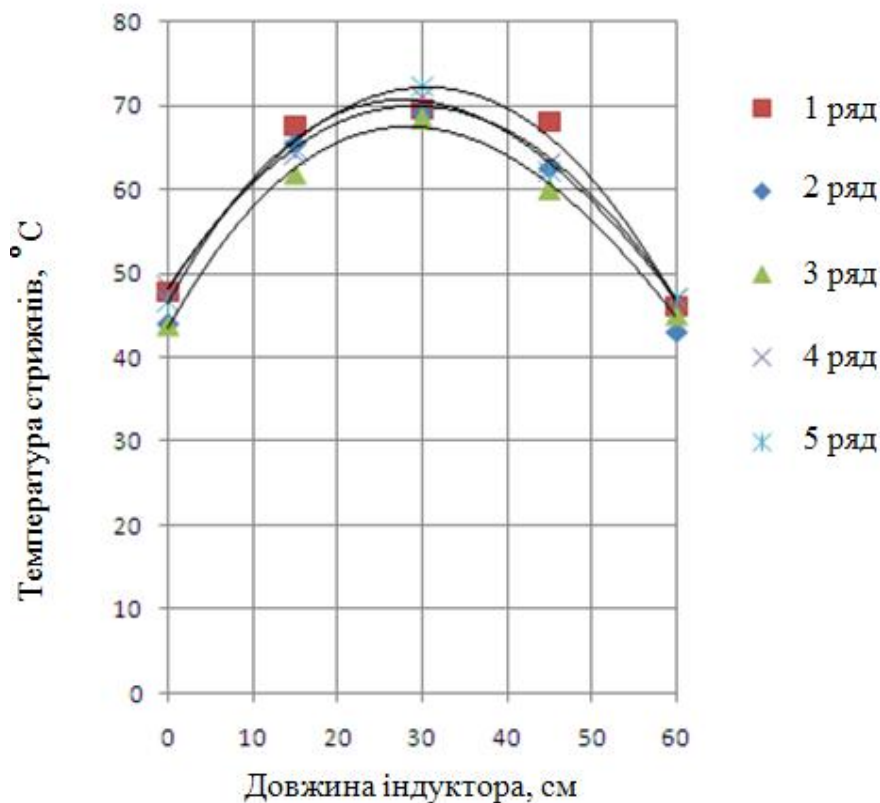


Рис. 2. Залежність температури в рядах стрижнів від довжини індуктора

У цілому розбіжність значень температури теплообмінної поверхні не перевищувала 4 %.

Вищенаведене свідчить про достатньо високу рівномірність розподілу магнітної індукції у діаметрі каналу, а різний час нагрівання стрижнів за довжиною індуктора пояснюється «кінцевим» ефектом електромагнітного поля. Отже запропонована теплообмінна поверхня може використовуватись для теплової обробки дисперсних матеріалів.

Створюючи систему автоматичного управління для індукційного нагріву в процесах виробництва ріпакової олії, необхідно врахувати режими роботи такого обладнання в сільській місцевості, де падіння напруги на вході може коливатись в межах  $\pm 20\%$ . Окрім того, важливими параметрами для підтримки рекомендованих виробником пресів режимів є початкова температура сировини та температура навколишнього середовища. Найкращим способом врахувати фактори в умовах невизначеності є використання в складі системи автоматичного управління апарату нечітких нейронних мереж.

Налаштування параметрів нейромережевої системи на регулювання напруги живлення індуктора здійснювали шляхом ітераційного навчання системи на набори вхідних експериментальних даних, діапазони зміни котрих відповідають умовам технологічного процесу на виробництві: коливання напруги в мережі (200-240 В), зовнішня температура та початкова температура дисперсного матеріалу (0-30 °С), вихідний коефіцієнт напруги (0,5-1).

Аналізуючи отриману гібридну мережу, можемо справедливо констатувати її адекватність. Поверхню відгуку мережі зображено рис. 3, при коливаннях  $t_0$  у межах від 0 до 30 °С та діючої напруги мережі  $U_m$  від 200 до 240 В. Навчена ANFIS забезпечує необхідну точність визначення коефіцієнта напруги  $m$  та може використовуватися для керування електротехнічним комплексом температурного оброблення зерна ріпака.

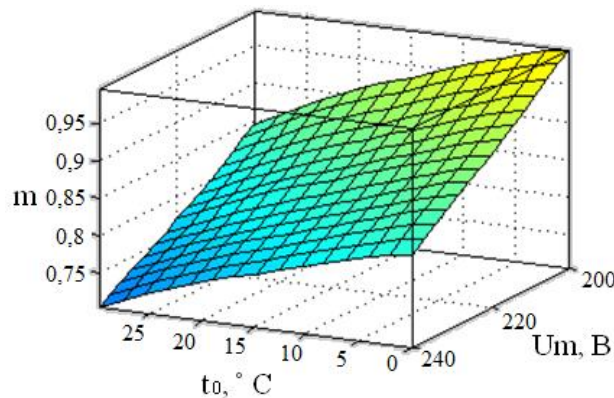


Рис. 3. Графічна залежність коефіцієнта напруги  $m$  від початкової температури  $t_0$ , °С, та діючої напруги мережі  $U_m$ , В

Для перевірки функціонування розробленої системи керування установкою для температурного оброблення зерна ріпака створено імітаційну модель у пакеті Simulink середовища MatLab (рис. 4).

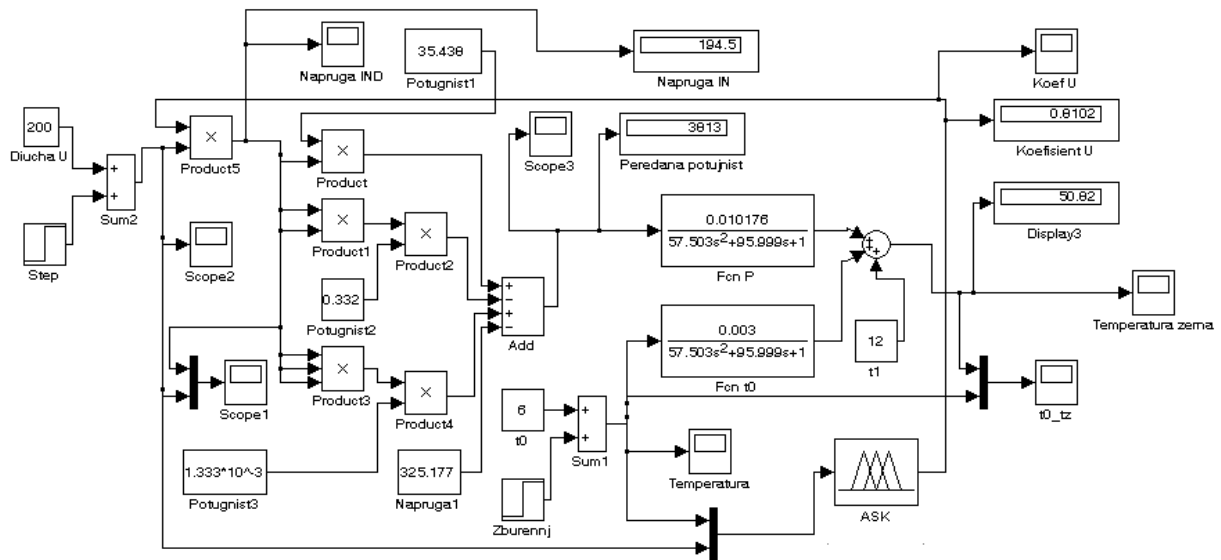


Рис. 4. Імітаційна модель роботи АСК температурної обробки зерна ріпака

Робота автоматичної системи керування установкою температурного оброблення зерна ріпака на основі гібридних нейронних мереж характеризується такими кількісними показниками:

- швидкодія – 0,5–1 с;
- перерегулювання – 0,5 %;
- максимальне динамічне відхилення – 1,5 °С.

*Висновки.* На основі аналізу результатів досліджень існуючих технологій і технічних засобів встановлено, що найбільш поширені шнекові гвинтові прес-екструдери з елементним обігрівом, інтенсивність передачі теплоти до матеріалу в яких обмежено самим принципом дії, практично досягли межі вдосконалення, тому перспективним напрямом є застосування попереднього нагрівання індукційним нагрівачем з розгалуженою теплопередавальною поверхнею, що рухається з азимутальною швидкістю. Розроблено алгоритм використання нечітких нейронних мереж для визначення енергоефективних режимів функціонування електротехнологічного комплексу теплового оброблення зерна ріпака в лінії виробництва олії, створено поновлювальну базу знань режимів функціонування вдосконаленого обладнання.

#### Список літератури

1. Кондратенко І. П. Індукційна установка для термообробки зерна ріпаку / І. П. Кондратенко, В. П. Лисенко, А. О. Березюк, Д. С. Комарчук // Вісник аграрної науки. – 2012. – № 12. – С. 55–58.
2. Кондратенко І. П. Обґрунтування еквівалентних геометричних параметрів для розрахунку циліндричних індукторів некругового





перерізу/ І. П. Кондратенко, В. П. Лисенко, Д. С. Комарчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2013. – № 184, Ч. 2. – С. 128–135.

3. Комарчук Д. С. Розбка та дослідження електротехнічного комплексу для збільшення виходу олії при переробці зерна ріпаку / Д. С. Комарчук // Глобальні та регіональні проблеми інформатизації в суспільстві та природокористуванні 2013: міжнар. наук.-техн. конф., 13–14 черв. 2013 р.: тези доп. – К., 2013. – С. 151–154.

4. Лисенко В. П. Запровадження енергоефективних комплексів в виробництві олії (стан питання) / В. П. Лисенко, Д. С. Комарчук // Біоресурси і природокористування. – 2011. – Т. 3 № 1–2. – С. 153–157.

5. Лисенко В. П. Математичне моделювання теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом / В. П. Лисенко, Б. І. Котов, Д. С. Комарчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2011. – № 166, Ч. 4. – С. 113–119.

6. Лисенко В. П. Ідентифікація процесу нагріву зерна ріпаку / В. П. Лисенко, Р. А. Калініченко, Д. С. Комарчук // Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. – 2012. – № 174, Ч. 1. – С. 98–100.

7. Лисенко В. П. Математичне моделювання нестационарних теплових процесів прес-екструдера з індукційним обігрівом як об'єкта з розподіленими параметрами / В. П. Лисенко, Б. І. Котов, Д. С. Комарчук Р. А. Калініченко // Праці Таврійського державного агротехнологічного університету. – 2012. – Т. 2, № 12. – С. 165–169.

8. Лисенко В. П. Математичне моделювання процесу температурної обробки зерна ріпаку в шільному шарі з індукційним нагрівом / В. П. Лисенко, Д. С. Комарчук // Біоресурси і природокористування. – 2013. – № 5–6. – С. 119–129.

9. Пат. 66838 UA, МПК F26B 11/00 (2011) Установка для термообробки насіння / Комарчук Д. С., Лисенко В. П.; заявник і патентовласник Національний університет біоресурсів і природокористування України. – № u201106029; заявл. 16.05.2011; опубл. 25.01.2012, Бюл. № 2.



## СИСТЕМА ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВАТЕЛЯ РАПСОВОГО ЗЕРНА В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ ПРОЦЕССЕ ПРОИЗВОДСТВА МАСЛА

Лысенко В.Ф., Комарчук Д.С.

*Аннотация* - разработана методика расчета параметров индукционного нагревателя как отдельного узла тепловой обработки для его размещения непосредственно на корпусе пресс-экструдера. Исследовано распределение электромагнитного поля индуктора по диаметру и длине зернового канала, загруженного пучком ферромагнитных стержней. Разработан алгоритм использования нечетких нейронных сетей для определения энергоэффективных режимов функционирования индукционного нагревателя, создано обновляемую базу знаний режимов работы усовершенствованного оборудования.

## INDUCTION HEATER SYSTEM OF THE RAPESEED GRAIN IN THE OIL PRODUCTION PROCESS

V. Lisenko, D. Komarchuk

### *Summary*

In the article predstvalena method of calculating the parameters of the induction heater as a separate unit for the thermal treatment of its location directly on the body of the extruder press. The distribution of the electromagnetic field of the inductor on the diameter and length of the grain channel loaded beam ferromagnetic rods. The algorithm using fuzzy neural networks to identify energy-efficient modes of operation of the induction heater, created to-date knowledge base modes of advanced equipment