

теплицы зимнего типа, построенной по современным голландским типовым проектам.

Математическая модель, теплица, микроклимат, температура, влажность.

The temperature modelling results in greenhouse, which are based on heat and mass transfer equations using MATLAB are synthesized. Coefficients of multi-parameter mathematical models for Netherlands greenhouses are determined.

Mathematical model, greenhouse, climate, temperature, humidity.

УДК 665.33.001.73

ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКВІВАЛЕНТНИХ ГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ЦИЛІНДРИЧНИХ ІНДУКТОРІВ НЕКРУГОВОГО ПЕРЕРІЗУ

І.П. Кондратенко, доктор технічних наук

В.П. Лисенко, кандидат технічних наук

Д.С. Комарчук, аспірант*

Розглянуто методи еквівалентування циліндричних об'єктів, що мають некругову форму, круговими циліндрами. Визначено корегуючі коефіцієнти, які дозволяють зменшити похибку розрахунків енергетичних параметрів індукторів для нагріву металевих елементів некругового перерізу.

Індуктор, еквівалентний діаметр, індукційний нагрів, експеримент, активний опір індуктора.

Індукційний нагрів – це ефективний засіб забезпечення температурних режимів технологічного обладнання. Часто використання саме індуктора як джерела теплової енергії замість традиційних ніхромових нагрівачів чи ТЕНів дозволяє суттєво підвищити енергоефективність теплової обробки, надійність нагрівального обладнання, а також спростити способи підтримки заданої температури в об'єкті нагріву через безінерційність індукційного нагріву.

У пресах для переробки олійного матеріалу 75 % загальної кількості енергії витрачається на підтримання необхідної температури корпусу та сировини. Для нагріву технологічного обладнання використовують резистивні нагрівачі з ніхромового дроту. Нерівномірність температурного поля та короткий строк служби нагрівачів такого типу спонукає до пошуку альтернативних джерел теплової енергії, котрі можуть застосовуватись в олійно-жировій галузі. Екологічність та малий час виходу на задані температурні режими в порівнянні з резистивними нагрівачами спонукає до впровадження індукційних способів нагріву у переробці олійних матеріалів.

* Науковий керівник – кандидат технічних наук, професор В.П. Лисенко

© І.П. Кондратенко, В.П. Лисенко, Д.С. Комарчук 2013

Нагрівачі на корпусі екструдера (рис. 1) розташовуються в трьох зонах. Потужність кожного із них становить 3 кВт, а сам індуктор встановлюється в штатне місце нагрівачів на корпусі. Корпус екструдера, де виконується нагрівання, має овальну форму, довжина ділянки 0,32 м, периметр корпуса 0,444 м.

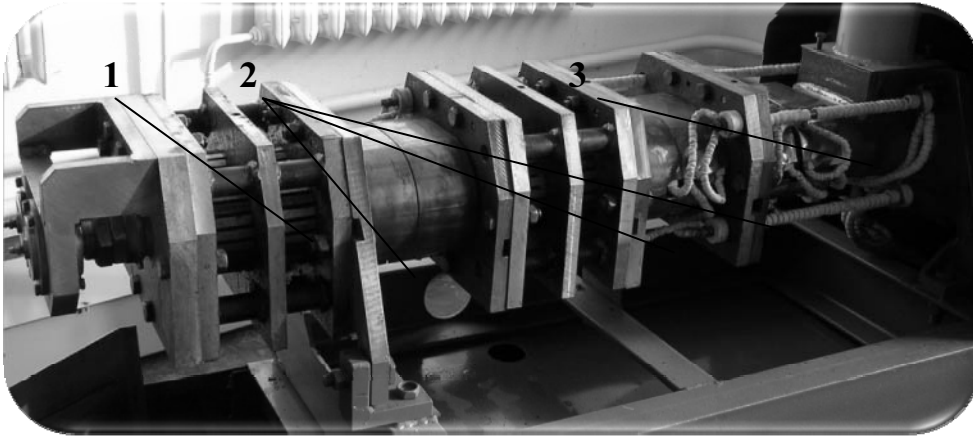


Рис. 1. Зовнішній вигляд корпуса екструдера ЕК 75/1200:

1 – корпус екструдера; 2 – зони нагріву корпуса; 3 – вхідна горловина преса

Розрахунок енергетичних характеристик індукційного нагрівача виконують для його овальної форми. Для застосування простих методів розрахунку вводять поняття еквівалентного діаметра виробу, який нагрівається. У літературі відсутня однозначна інформація щодо визначення еквівалентного діаметра. Так, у [5] еквівалентний діаметр завантаження з прямокутним перерізом визначається як:

$$D_{ек} = \frac{2(a+b) - 4\Delta_k}{\pi}, \quad (1)$$

де a , b – сторони прямокутника, м; Δ_k – глибина проникнення струму на частоті джерела живлення, м, $\Delta_k = \sqrt{\frac{2}{\mu\sigma\omega}}$; μ – магнітна проникність сталі; σ – питома електропровідність сталі, См/м; ω – кутова швидкість, рад/с.

У формулі (1) береться до уваги, що вихрові струми на високій частоті живлення ($f > 1000$ Гц) замикаються на поверхні виробу.

У роботі [4] автор визначає еквівалентний діаметр за умови рівності площ поперечних перерізів еквівалентного циліндричного завантаження та характерного розміру квадрата.

Так, для квадрата зі стороною a еквівалентний діаметр буде розраховано як:

$$D_{ек} = \frac{2a}{\sqrt{\pi}}. \quad (2)$$

Для квадратного перерізу 100x100 мм та частоти 50 Гц порівняння результатів розрахунків за виразами (1) та (2) еквівалентного діаметра дає розбіжність на 1,5 %.

З одного боку, величина еквівалентного діаметра за виразом (1) залежить від режиму роботи індукційного нагрівача, яким визначається значення магнітної проникності, що в свою чергу визначає глибину активного шару. З другого боку вираз (2) такою залежністю нехтує.

Мета досліджень – визначення еквівалентного діаметра некругового циліндра з урахуванням режимів роботи індукційного нагрівача.

Матеріали та методика досліджень. Поставлену задачу будемо вирішувати, використовуючи чисельний експеримент, який виконаємо із використанням програмного продукту COMSOL Multiphysics.

Результати досліджень. COMSOL Multiphysics – це програмне середовище, яке забезпечує всі етапи моделювання: визначення геометричних параметрів, опис фізичних характеристик та візуалізація. Означене дозволяє моделювати процеси, які можуть бути подані у вигляді системи диференціальних рівнянь у часткових похідних. У нашому випадку для моделювання використаємо модуль *AC/DC Module* в розділі *Quasi-Static, Magnetic* в підрозділі *In-Plane Induction Current, Magnetic Field* з урахуванням гармонічного аналізу – *Time-harmonic analysis*.

На рис. 2 наведено переріз корпусу екструдера з кінцево-елементною сіткою в об'єкті моделювання. Розподіл електромагнітного поля визначається за результатами розв'язку такого диференційного рівняння[2]:

$$j\omega d\mu_0\mu_r H_z + \nabla \times d((\sigma + j\omega\epsilon_0\epsilon_r)^{-1}(\nabla \times H_z - \bar{J}^e) - \bar{v} \times \mu_0\mu_r H_z) = 0, \quad (3)$$

де j – густина струму, A/m^2 ; d – товщина корпусу, м; μ – магнітна проникність вакууму; μ_r – магнітна проникність матеріалу корпусу; H_z – напруженість магнітного поля, A/m ; ∇ – оператор Набла; ϵ_0 – діелектрична проникність вакууму; ϵ_r – відносна діелектрична проникність матеріалу корпусу; $\bar{J}^e$ – густина струму, A/m^2 ; $\bar{v}$ – швидкість, м/с.

Рівняння (3) може бути розв'язаним за умови задавання значень потужності магнітного поля на границі зовнішньої області геометрії деталі. Для визначення еквівалентних параметрів некругового циліндричного індуктора будемо проводити порівняння двох геометрій некругового та кругового перерізів (рис. 3). Умовами еквівалентності приймаємо рівність потужності магнітного поля на поверхні моделей і досягнення однакових енергетичних втрат за обома геометріями. Електрофізичні параметри середовища при цьому – однакові.

Пропонується еквівалентний діаметр розраховувати за периметром некругової моделі з урахуванням уточнень при зміні значень напруженості магнітного поля і частоти живлення. Отже, еквівалентний діаметр будемо визначати так:

$$D_{ek} = \frac{1}{k} \frac{\Pi}{\pi}, \quad (5)$$

де Π – периметр деталі, м; k – корегуючий коефіцієнт.

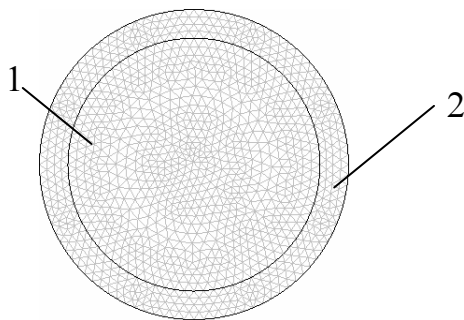


Рис 2. Геометрія корпусу екструдера з кінцево-елементною сіткою:

1 – сталевий корпус;
2 – повітря

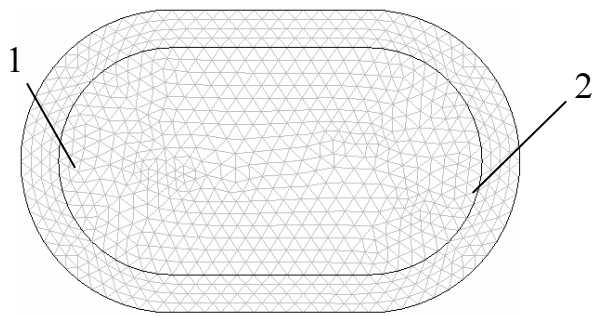


Рис 3. Геометрія з кінцево-елементною сіткою еквівалентна корпусу екструдера:

1 – сталевий корпус; 2 – повітря

Для визначення коригуючого коефіцієнта k проведемо двофакторний експеримент. Досліджуватимемо взаємодію напруженості електромагнітного поля та частоти джерела живлення. Результуючою величиною експерименту буде значення коефіцієнта k , при якому кількість енергії, виділеної в об'ємі еквівалентної та реальної деталей будуть однаковими.

Межі варіювання факторів впливу H та f визначимо на основі літературних даних та результатів аналітичного розрахунку. Так H варіюється в межах від 10000 до 100000 А/м, f змінюємо від 50 до 8000 Гц.

Для детального вивчення ділянок поверхні відгуку k при зміні значення напруженості магнітного поля та частоти струму може бути використаний поліном другого порядку, отриманий за результатами проведення числового повнофакторного експерименту другого порядку [1].

Плани 2-го порядку дозволяють отримати математичний опис процесу у вигляді повної квадратичної моделі, яка містить, крім основних ефектів b_i , всі парні взаємодії b_{ij} і квадратичні ефекти b_{ii} .

На основі аналізу наявних даних вибираємо такі рівні та інтервали варіювання факторів (табл. 1).

1. Інтервали варіювання факторів впливу

Фактор		Рівні				
		-1	0	+1	+ α	- α
Напруженість магнітного поля, H	x_1	23175	55000	86825	100000	10000
Частота, f	x_2	1213.8	4025	6836.2	8000	50

Значення зіркового плеча $\pm\alpha$ для планів другого порядку становить 2,828 [1]. Величину енергетичних втрат, які виникають у корпусі екструдера та еквівалентної конструкції, вимірюємо за допомогою вбудованої функції програми Comsol Multiphysics 3.5a, Subdomain Integration. На основі прийнятих параметрів складаємо матрицю планування експерименту (табл. 2).

2. Матриця планування двофакторного експерименту

Номер досліджу в матриці	Фактори в умовних одиницях		Фактори в натуральному масштабі	
	x_1	x_2	$H, A/m$	$f, Гц$
1	-1	-1	23175	1213,8
2	-1	+1	23175	6836,2
3	+1	-1	86825	1213,8
4	+1	+1	86825	6836,2
5	0	0	55000	4025,0
6	-a	0	10000	4025,0
7	+a	0	100000	4025,0
8	0	-a	55000	50,0
9	0	+a	86825	8000,0

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

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

Використовуючи рівняння (6) визначимо розрахункові та експериментально отримані значення коригуючого коефіцієнта для визначення похибки експерименту (табл. 3).

3. Експериментальний та розрахунковий коригуючий коефіцієнт

№ досліджу	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$k_{\text{експ}}$	0,9556	0,9346	0,9837	0,9434	0,9453	0,9342	0,9593	1	0,9413
$k_{\text{розрах}}$	0,9551	0,9358	0,9727	0,9438	0,9479	0,9364	0,9544	0,9754	0,9430

Визначимо абсолютну похибку вимірювань:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{\sum_i (k_{\text{експ}_i} - k_{\text{розрах}_i})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

де n – кількість дослідів.

Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\epsilon}{\sum k_{\text{експ}}}. \quad (8)$$

За результатами розрахунків отримуємо, що абсолютна похибки $\epsilon=0,00978$; відносна похибка $\delta=1,024\%$.

На рис 4. наведено графічне зображення поверхні відгуку коригуючого коефіцієнта в межах інтервалів варіювання H та f .

У нашому випадку для корпусу екструдера периметром $\Pi=0,444$ м, напруженістю магнітного поля $H=24710$ А/м, частотою джерела живлення

$f=50$ Гц коригуючий коефіцієнт становитиме $k=0,982$. Розрахований еквівалентний діаметр з урахуванням k буде $D_{ek}=0,144$ м.

Окрім визначення еквівалентного діаметра завантаження індуктора, яке має форму, що відрізняється від круглої, слід зазначити важливість визначення еквівалентного діаметра індуктора. Оскільки еквівалентний діаметр індуктора визначає активний опір обмотки індуктора, а також реактивну складову опору, що вноситься в послідовну схему заміщення, тому його визначення будемо проводити з урахуванням площі незайнятої завантаженням, а також периметра нециліндричної намотки індуктора.

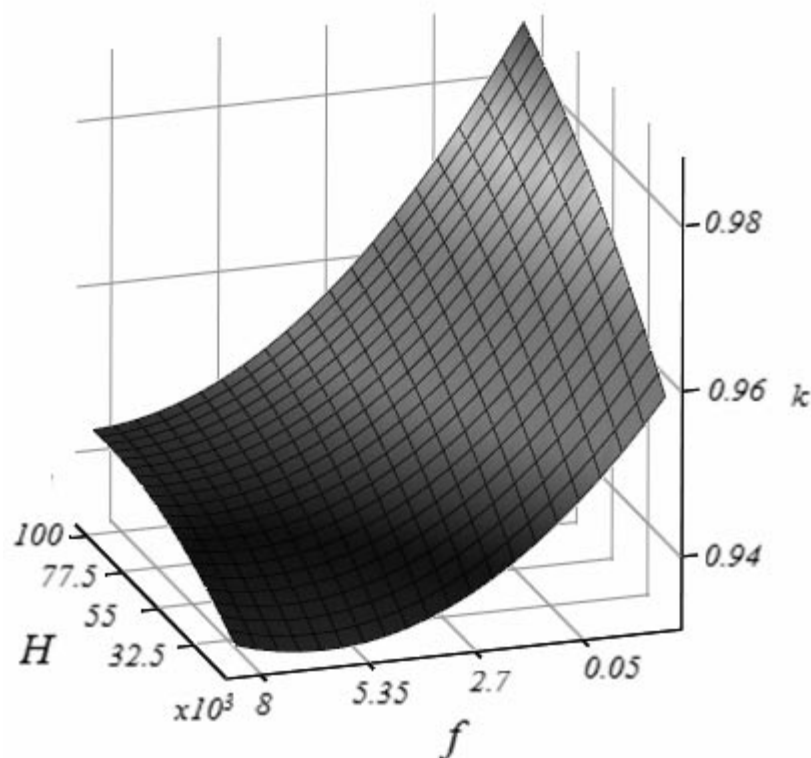


Рис 4. Поверхня відгуку k при зміні значення напруженості магнітного поля та частоти струму

Розрахунок активного опору індуктора є окремою проблемою, оскільки залежить від частоти живлення індуктора, конструкції обмотки (одношарова, багатошарова), і в роботі не розглядаються.

Утворення зазору між індуктором та завантаженням пов'язано з використанням теплоізоляційних матеріалів, що використовуються для підвищення ефективності нагріву та зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище. Саме товщина теплоізоляційного матеріалу визначає відстань між індуктором та деталлю, а отже і площу, незайняту завантаженням.

Для розрахунку еквівалентного діаметра некругового індуктора приймаємо, що площі, незайняті завантаженням в індукторі для корпуса преса та еквівалентної йому кругової геометрії, повинні бути рівними.

Розрахунок еквівалентного діаметра індуктора виконаємо, використовуючи класичну формулу визначення еквівалентування за периметром та порівняємо отриманий результат з виразом, в якому використовується площа теплоізоляційного матеріалу:

$$D'_{in} = \sqrt{\frac{4S}{\pi} + D_{ek}^2}, \quad (7)$$

де S – площа теплоізоляційного матеріалу, m^2 .

Товщину теплоізоляційного матеріалу h змінюємо в діапазоні від 5 до 20 мм. Результати розрахунків наведено в табл. 4.

4. Результати розрахунку еквівалентного діаметра індуктора

$h, \text{мм}$	$\Pi, \text{м}$	$S, \text{м}$	$D_{in}, \text{м}$	D'_{in}	$S', \text{м}$	$\Delta, \%$
5	0,476	0,00229	0,151	0,154	0,00228	1,56
10	0,507	0,00475	0,161	0,164	0,00475	1,40
15	0,538	0,00736	0,171	0,173	0,00736	1,21
20	0,570	0,01014	0,181	0,183	0,01014	1,12

Позначення: Π – периметр теплоізоляційного матеріалу, м; D'_{in} – еквівалентний круговий діаметр індуктора, м; S' – площа еквівалентної теплової ізоляції, m^2 ; Δ – похибка розрахунку визначення діаметра індуктора, використовуючи класичну формулу та формулу, в якій враховується площа теплоізоляційного матеріалу.

Визначення еквівалентного діаметра індуктора з використанням площі теплоізоляційного матеріалу зменшує похибку розрахунку геометричних параметрів індуктора на 1,5 % в порівнянні з класичною формулою.

Висновки

Геометричні параметри деталей некругового перерізу доцільно розраховувати за периметром з урахуванням отриманого коригуючого коефіцієнта.

Діаметр еквівалентного індуктора розраховується із умови рівності площ, незайнятих завантаженням у некруговому та еквівалентному круговому індукторі.

В інженерних розрахунках для зменшення похибки доцільно використовувати коригуючий коефіцієнт для визначення еквівалентного діаметра корпусу некругової деталі, а діаметр індуктора – з використанням площі теплової ізоляції.

Список літератури

1. Грачев Ю.П. Математические методы планирования экспериментов / Ю.П. Грачев. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – 196 с.
2. Егоров В.И. Применение ЭВМ для решения задач теплопроводности (Comsol Multiphysics) / В.И. Егоров. – СПб: ГУ ИТМО, 2006. – 77 с.
3. Кондратенко І.П. Енергетичні характеристики і електричні параметри індукторів для нагріву пучка феромагнітних труб / І.П. Кондратенко, А.П. Ращепкін, А.О. Березюк // Вісник КДУ ім. Михайла Остроградського. – 2010. – №3, ч. 2. – С.62.
4. Слухоцкий А.Е. Индукторы / А.Е. Слухоцкий. – Л.: Машиностроение, 1989. – 69 с.
5. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие для вузов / А.Е. Слухоцкий, В.С. Немков, Н.А. Павлов, А.В. Бамунер. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.

Рассмотрены методы эквивалентирования цилиндрических объектов, имеющих некруговую форму, круговыми цилиндрами. Определены корректирующие коэффициенты, позволяющие уменьшить погрешность расчетов энергетических параметров индукторов для нагрева металлических элементов некругового сечения.

Индуктор, эквивалентный диаметр, индукционный нагрев, эксперимент, сопротивление индуктора.

Considers the methods to simplify calculation of cylindrical objects that are not circular shape, a circular cylinder. Definitely adjustment factors to reduce the error calculations of energy parameters inductors for heating metal elements are not circular section.

Inductor, Equivalent diameter of the inductors, induction heating, experiment, inductor resistance.

УДК 535:537:546

ВПЛИВ ЗМІНИ ВОЛОГОСТІ ҐРУНТУ НА КОЕФІЦІЄНТ ВІДБИТТЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ХВИЛЬ

***В.В. Бойко, Г.І. Булах, С.В.Шостак,
кандидати фізико-математичних наук***

Теоретично досліджено вплив вологості ґрунту на зміну діелектричної проникності ϵ , відповідно, на коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль від його поверхні. Визначено комплексні коефіцієнти відбиття для перпендикулярно і паралельно поляризованих електромагнітних плоских хвиль від шаруватого напівпростору. Обґрунтовано можливість практичного застосування безконтактних радіолокаційних методів зондування для визначення структури і вологості ґрунтів у системі точного землеробства.

Діелектрична проникність, коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль, вологість ґрунту, система точного землеробства.

Присутність води у ґрунтах змінює їх фізико-механічні характеристики, і, зокрема, їх діелектричну проникність. Пов'язано це з тим, що комплексна діелектрична проникність води в діапазоні надвисоких частот (НВЧ) радіовипромінювання суттєво відрізняється від діелектричної проникності ґрунтів, і тому ефективна діелектрична проникність зволоженого ґрунту буде відрізнятися від відповідної характеристики сухих ґрунтів. Ця зміна, зокрема, буде впливати на коефіцієнт відбиття електромагнітної хвилі від поверхні ґрунту. Оскільки вимірювання коефіцієнта відбиття є дослідженою експериментальною задачею [6], то це, в принципі, дозволяє за зміною коефіцієнта відбиття простежити за зміною