

8. De Groot S.K., Mazur P. Non – Equilibrium Thermodynamics. – Amsterdam: North Holland, 1969.
9. Emseley I. The Elements. – Oxford: Oxford University Press, 1989.
10. Gibbs J.W. Elementary Principles in Statical Mechanics – New – Hawen: Yale University Press, 1902.
11. Gibbs J.W. On the equilibrium of hetere.
12. Kett T. K., Anderson D. K., Ternary isothermal dissusion and the validity of the Onsager reciprocal relations. // I. Phys. Ehem, 73, 1968. – P. 1268 – 1274.
13. Petrosky T. , Prigogine I. Chaos Solution and Fractals. 7. (1996) – P. 445 – 495.
14. Prigogine I. Etude Thermodynamique des Proceses Irreversibles. – Liege Desover, 1947.
15. Prigogine I. Introduction in Thermodynamics of Inreversible Proceses. – N. Y.: Jon Wiley. – 1967.

*Наведена загальна характеристика ентропії з позиції класичної термодинаміки. Викладено основи вільної енергії Гіббса та вільної енергії Гельмгольца, хімічного потенціалу. Виконано аналіз локальної ентропії, мінімуму виробництва ентропії, балансу ентропії на основі положень нерівноважної термодинаміки.*

***Ентропія, незворотні процеси, ізобарно-термічний потенціал, ізохорно-термічний потенціал, термодинамічні сила та потоки.***

*The general characteristics of the entropy from the perspective of classical thermodynamics. The foundations of the Gibbs free energy and Helmholtz free energy, chemical potential. The analysis of the local entropy production minimum entropy, entropy balance on the basis of non-equilibrium thermodynamics.*

***Entropy, irreversible processes, isobaric-thermal potential, isochoric-thermal potential, the thermodynamic force and flow.***

УДК 621.365

## **ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ ТЕМПЕРАТУРИ В ЗАВАНТАЖЕННІ ЦИЛІНДРИЧНОГО ІНДУКТОРА**

***І.П. Кондратенко, доктор технічних наук  
В.П. Лисенко, кандидат технічних наук  
Д.С. Комарчук, аспірант\****

*Запропоновано методику розрахунку завантаження індуктора в установці для термообробки насіння ріпаку. Досліджено розподіл температурного поля завантаження по довжині індуктора. Значення температури завантаження вздовж та по радіусу індуктора практично однаково. Це свідчить про рівномірність розподілу магнітної індукції по*

---

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

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

діаметру каналу, а різний час нагріву завантаження у верхніх та центральних точках пояснюється «кінцевим» ефектом електромагнітного поля індуктора.

**Індуктор, стержні, індукційний нагрів, теплообмінні процеси, ріпак, термообробка.**

Циліндричні індуктори для нагріву осесиметричних виробів (труб та стержнів кругового перетину) найширше використовують при індукційному нагріві. Такі індуктори створюють магнітне поле, яке при достатньо великій довжині індуктора рівномірно розподіляється по внутрішньому периметру.

Іноді циліндричні індуктори називають індукторами поздовжнього магнітного поля через те, що напрямок магнітного поля збігається з поздовжнього віссю індуктора, вздовж якої розміщується виріб, що нагрівається.

Індуктори як теплообмінні агенти широко використовують при нагріві рідких середовищ (вода, молоко тощо). При цьому фізичні властивості рідин дозволяють знімати з теплообмінної поверхні значний тепловий потік. При застосуванні індукційного нагріву для термообробки сипких матеріалів таких як пісок, щебінь, сільськогосподарська продукція (зерно, олійне насіння) необхідно створювати розгалужену поверхню теплообміну.

Відоме використання циліндричного однофазного індуктора для нагріву повітря при пропусканні останнього через феромагнітні труби, які є завантаженням індуктора та теплообмінним апаратом [2]. Застосовуючи таку схему завантаження можна значно збільшити поверхню теплообміну та використовувати індукційний нагрів для термообробки дисперсного матеріалу, збільшуючи тепловіддачу через створення обертального руху багатостержневого завантаження циліндричного індуктора.

Параметри та геометричні розміри теплообмінного агрегату необхідно визначати з урахуванням розподілу температури по перерізу теплообмінного апарату. Літературні джерела [1,5] описують рівномірний розподіл індукції магнітного поля та наведених вихрових струмів у поздовжньому перерізі завантаження, але конкретних даних розподілу фізичних полів (електромагнітного та температурного) досі не наведено.

**Мета досліджень** – розробка методики розрахунку геометричних параметрів завантаження індуктора в установці для термообробки насіння ріпаку, дослідження розподілу температурного поля завантаження в індукторі.

**Матеріали та методика досліджень.** Для розрахунку установки температурної обробки олійного матеріалу необхідно визначити геометричні параметри теплообмінної поверхні. Поверхня складається з розрізеного пучка феромагнітних стержнів, які не мають електричних контактів між собою по всій довжині індуктора. Розташування стержнів у пучці вибираємо з умови самовільного витікання дисперсного матеріалу. Для

сипких матеріалів найменший діаметр отвору для самовільного витікання визначається як [6]:

$$A \geq (3 \div 6)a' \quad (1)$$

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

Максимальний розмір зерна ріпаку становить 2,14 мм [2], отже відстань між стержнями повинна бути в межах:

$$6.42 < A < 12.84.$$

Приймаючи діаметр каналу установки для попереднього нагріву зерна ріпаку  $D$ , розраховуємо кількість стержнів у каналі. Пропонується визначати кількість стержнів за принципом побудови рівномірного ряду. Тоді кількість діаметральних рядів у каналі за умов дотримання відстані між стержнями, що визначається за виразом (1), буде:

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

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

Кількість стержнів у кожному діаметральному ряді визначаємо так:

$$m_i = \frac{\pi d_i}{A_{\max} + d_{cm}} \quad (3)$$

де  $d_i$  – діаметр  $i$  – того ряду стержнів, мм.

Діаметр каналу доцільно вибрати з міркувань приєднання нового обладнання до діючих установок. Так, для обладнання виробництва олії ріпаку у Навчально-науковій-виробничій лабораторії дизельного біопалива, що розташована у ВП НУБіП України „Агрономічна дослідна станція”, найприйнятніший діаметр каналу становить 152 мм. Для такого каналу кількість рядів стержнів на основі виразу (2) буде  $n=5$ , кількість стержнів у ряді –  $m_1=5$ ;  $m_2=11$ ;  $m_3=16$ ;  $m_4=21$ ;  $m_5=27$ . Довжину каналу з завантаженням приймемо рівною 1000 мм. При цьому враховується, що буде виконуватись умова довгого індуктора. Тобто довжина індуктора буде більшою за три діаметри індуктора

$$L_{\text{інд}} > 3D_{\text{інд}} \quad (4)$$

Кількість витків, перетин провідників та виконання багатовиткового індуктора визначено за методикою [3] при кількості стержнів  $m_{1-5}=80$ , діаметрі стержнів 6 мм. Матеріал стержнів – вуглецева сталь, що характеризується такими електрофізичними властивостями як питома електропровідність та основна крива намагнічування, за якою визначається магнітна проникність. Розрахунок питомої електропровідності виконувалось за формулою [4]:

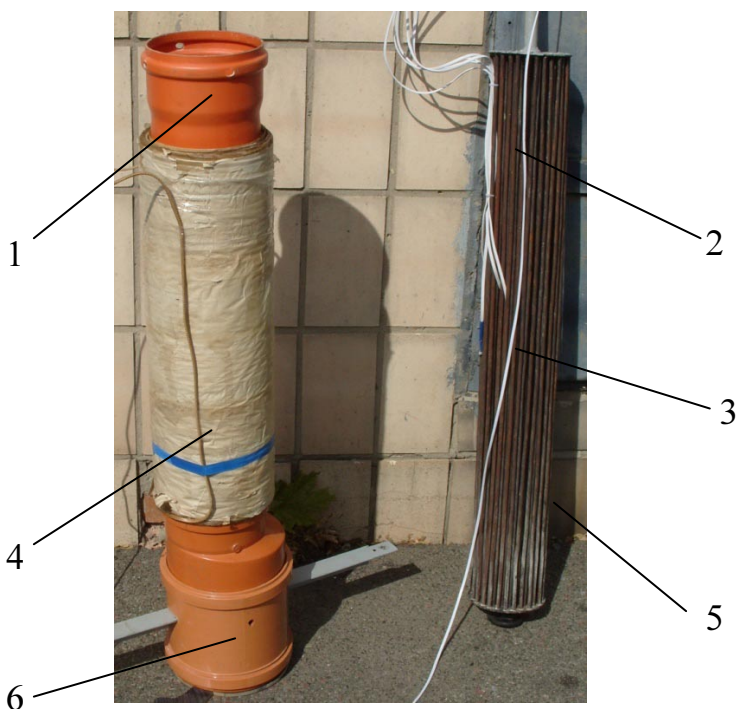
$$\sigma = \frac{S}{lR}$$

де  $S$  – площа провідника, мм<sup>2</sup>;  $l$  – довжина провідника, мм;  $R$  – опір провідника, Ом.

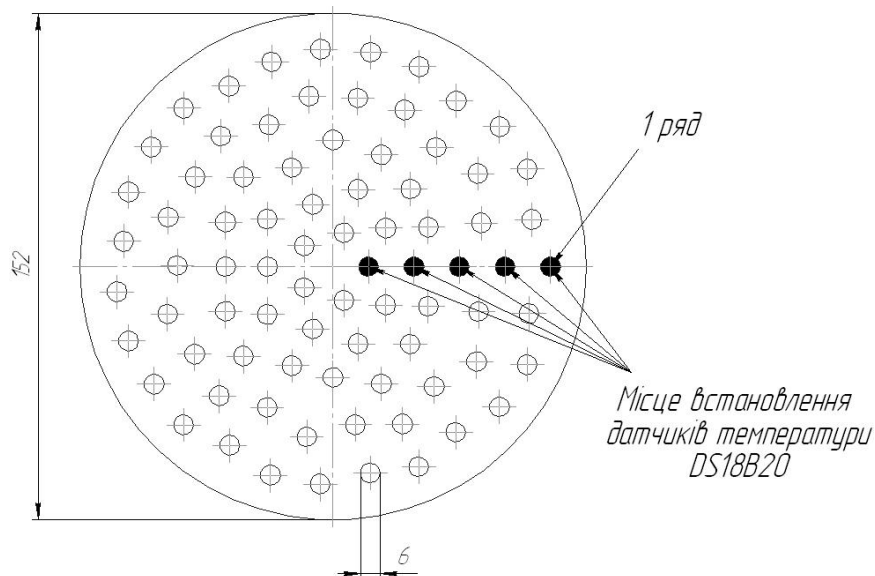
Вимірювання опору стержня проводилось із використанням мосту постійного струму МО-62 та приладу RLC-метр серії BR2876. Отримане значення питомої електропровідності становить  $\sigma = 9,8 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ , що значно перевищує довідкові дані. Означене свідчить про недотримання виробником рекомендованого хімічного складу сталі при виготовленні стержнів. Виконуючи вищезазначені умови, у науково-дослідній лабораторія «Інтелектуальні управляючі системи в АПК» кафедри «Автоматики та робототехнічних систем ім. акад. І.І. Мартиненка» виготовлено установку для термообробки насіння ріпаку, основні складові якої зображено на рис 1.

Завантаження у вигляді феромагнітних стержнів 5 поміщується в зерно у текучий канал 7. Навколо каналу розміщений багатовитковий індуктор. Електромагнітне поле, яке створює індуктор, не взаємодіє з каналом проходження зерна, оскільки канал виготовлений з полівінілхлориду, який не є феромагнетиком.

Феромагнітні стержні розміщені рівномірно по каналу (рис. 2) та закріплені з обох боків феромагнітними пластинами. Розрахункова відстань розсіювання електромагнітного поля, що створює індуктор, – 10 см [1]. Оскільки утримуючі пластини розміщені на відстані 20 см від краю індуктора, вони не взаємодіють з електромагнітним полем. Для встановлення датчиків вибрано стержні, температура яких найбільш залежала від нерівномірності розподілу фізичних полів. Зовнішній ряд стержнів та ряд в центральній частині позначимо відповідно 1...5 ряд.

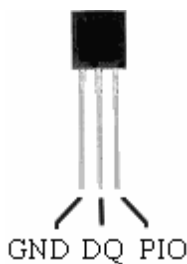


**Рис 1. Установка для термообробки зерна ріпаку:**  
 1 – вхідний отвір; 2 – з'єднувальні шини; 3 – датчики температури; 4 – індуктор;  
 5 – феромагнітні стержні; 6 – вихідний отвір



**Рис. 2. Розміщення стержнів по об'єму каналу**

Для вимірювання температури застосовувались температурні датчики DS18B20 фірми Dallas Semiconductor. Загальний вигляд DS18B20 показано на рис 3.



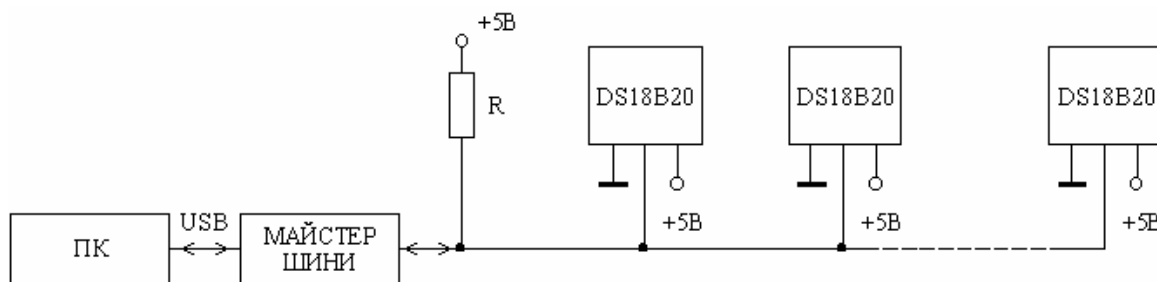
**Рис 3. Зовнішній вигляд температурного датчика DS18B20**

PIO – порт уведення/виводу; DQ – уведення/вивід даних;

GND – «земля»

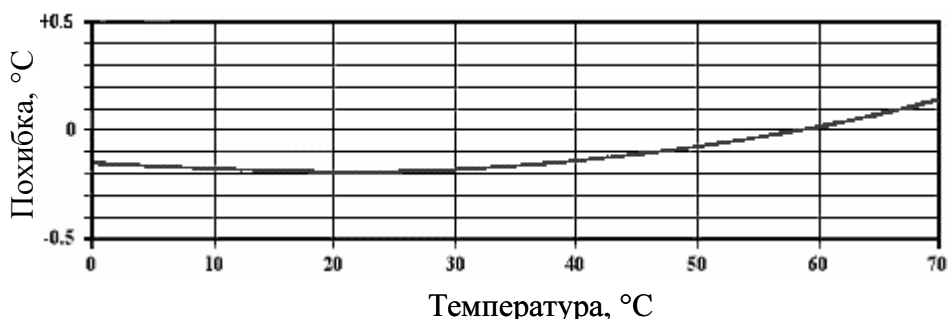
Інтелектуальні температурні датчики DS18B20 являють собою спеціалізовані мікропроцесори, що вимірюють температуру середовища та перетворюють її значення в послідовний двійковий код. Кожний датчик індивідуально маркований, тобто містить ідентифікаційний номер, за яким керуючий комп'ютер може розпізнати цей датчик у мережі.

Для з'єднання датчиків використовувалась мікролокальна мережа (Miniature Local Area Network – MicroLAN). В основу роботи MicroLAN покладена організація зв'язку процесора з периферійними пристроями через однодротову шину. Однодротова шина – це система, що складається з одного майстра шини DS9490R (пристрій, керуючий роботою шини) та декількох датчиків температури DS18B20 (рис 4).



**Рис 4. Схема підключення датчиків температури до ПК**

Термодатчик DS18B20 забезпечує вимірювання температури в діапазоні  $-55..+125$  °С. Гарантована точність не перевищує  $\pm 0,5$  °С у діапазоні  $-(10..+85)$  і  $\pm 2$  °С. Типова крива похибки вимірювання температури наведена на рис 5.



**Рис 5. Типова крива похибки термодатчика DS18B20**

Незважаючи на обмежену абсолютну точність, мала дискретність представлення температури є дуже бажаною. Для цього датчик DS18B20 може бути запрограмований на визначену дискретність перетворення температури.

Для синхронізації апаратних та програмних частин використовувався пакет «OWFS», операційна система Linux Ubuntu 12.04LTS. Програмне забезпечення для зчитування температури розроблено на основі використання командного процесора Bash та інтерпретатора команд shell.

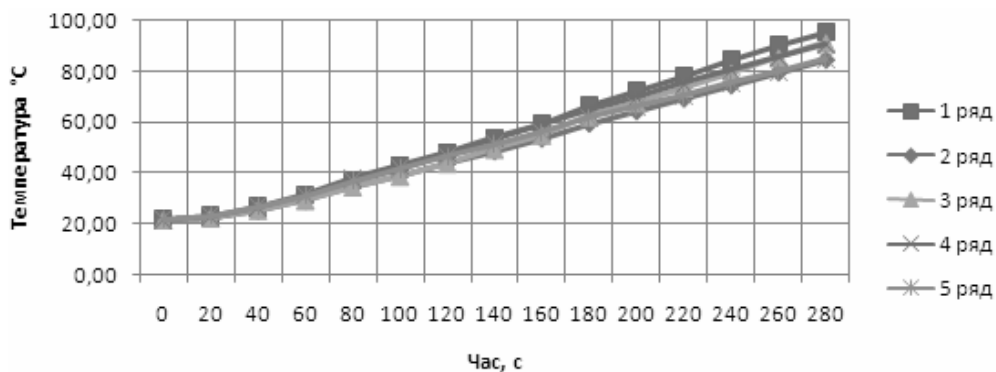
**Результати досліджень.** Датчики температури DS18B20 закріплювались на вертикально встановлених феромагнітних стержнях (рис 6). Для забезпечення надійного контакту використовувалась паста з високою теплопровідністю. Датчики температури налаштовувались на дискретність перетворювання температури в 1 с, покази температури зчитувались з всіх датчиків одночасно з періодичністю 5 с та заносились до бази даних.

Енергетичні показники індуктора контролювались за допомогою вимірювального комплексу K505 та трансформатора струму УТТ-5М і становили: напруга  $U=190$  В; струм  $I=53$  А; активна потужність  $P=4000$  Вт.



**Рис 6. Встановлення датчиків температури на стержні**

Для дослідження залежностей електромагнітних полів по довжині індуктора доцільно вимірювати температуру стержнів різних рядів в одному перерізі. Як видно на рис. 7 (датчики температури встановлені на стержнях у крайній зоні індуктора) динаміка приросту температури зовнішніх та внутрішніх рядів стержнів відрізняється. Різниця температур у цій зоні свідчить про нерівномірний розподіл електромагнітних полів, що може бути пов'язано з «кінцевим» ефектом індуктора. При переміщенні датчиків температури в напрямку до середини індуктора на відстані 150 мм від його краю (рис. 8) розбіжність виміряних значень зменшується. У центральній частині індуктора (рис. 9) температура стержнів зростає з однаковою динамікою. Оскільки індуктор і завантаження виконані симетричними щодо осі абсцис, то розподіл температури по довжині також виявився симетричним (рис. 10).



**Рис 7. Залежність температури рядів стержнів на кінці індуктора**

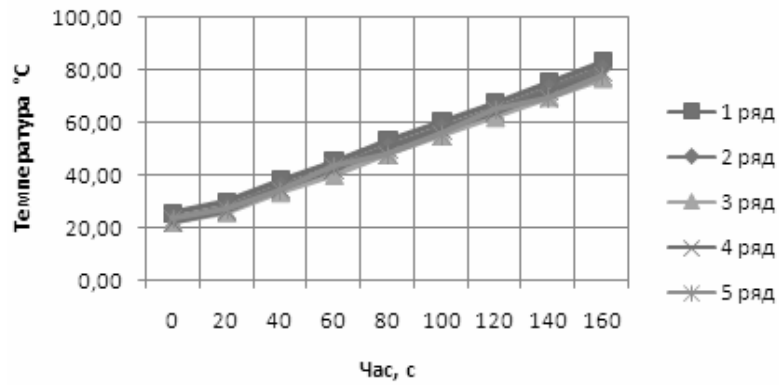


Рис 8. Залежність температури рядів стержнів на відстані 150 мм від краю індуктора

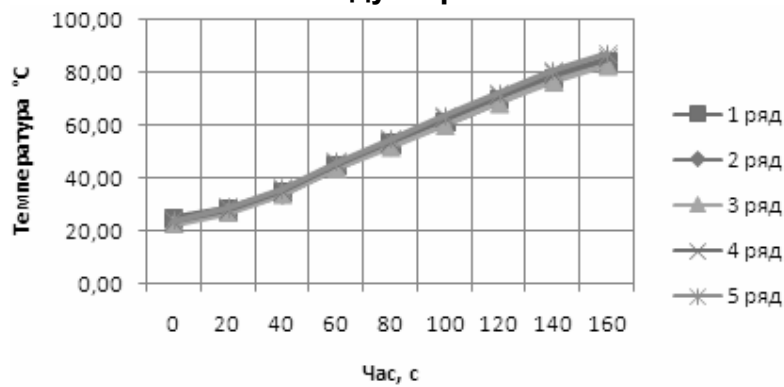


Рис 9. Залежність температури рядів стержнів на середині індуктора

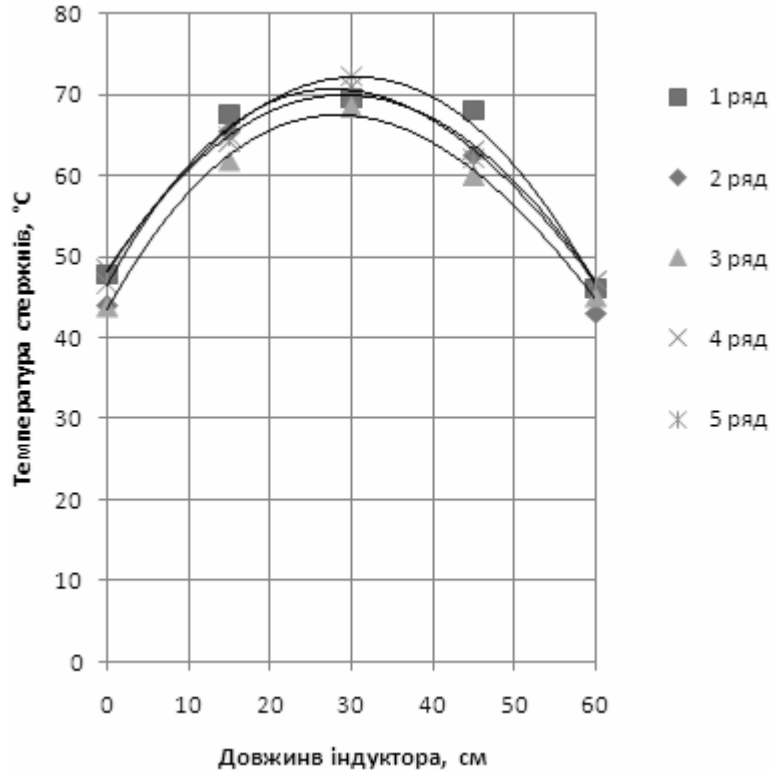


Рис 10. Залежність температури рядів стержнів від довжини індуктора



## Висновки

Значення температури стержнів, розташованих у різних радіальних рядах в середині індуктора, майже однаково. Розбіжність значень температури не перевищує 4 %. При дослідженні температури стержнів для отримання повної картини теплових розподілів датчики по чергово встановлювались на всіх стержнях у кожному з перерізів, однак виміряне значення температури варіювалось в межах 0,5 %. Це свідчить про рівномірність розподілу магнітної індукції по діаметру каналу, а різний час нагрівання стержнів у верхній та середній точках до температури 80 °С пояснюється «кінцевим» ефектом електромагнітного поля індуктора.

## Список літератури

1. Бабат Г.И. Индукционный нагрев металлов и его промышленное применение / Г.И. Бабат. – [2-е изд., перераб. и доп.] – М. - Л. : Энергия, 1965. – 552 с.
2. Васецкий Ю.М. Высокоэффективная универсальная индукционная установка нагрева газо-жидкосных теплоносителей / Ю.М. Васецкий, И.П. Кондратенко, В.А. Ращепкин // Новини енергетики. – 1999. – №4. – С. 34–37.
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. Копылов И.П. Проектирование электрических машин./ Копылов И.П.— М.: Энергия, 1980. — 495 с.
5. Немков В. С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева / В. С. Немков, В. Б. Демидович. – Л. : Энергоатомиздат, 1988. – 297 с.
6. Kawaguchi H., Enokizono M., Todaka T. Thermal and magnetic field analysis of induction heating problems // Journal of Materials Processing Technology. – 2005. – Vol. 161, № 2. – P. 193–198.

*Предложена методика расчета загрузки индуктора в установке для термообработки семян рапса. Исследовано распределение температурного поля загрузки по длине индуктора. Значение температуры загрузки вдоль и по радиусу индуктора практически одинаково. Указанное свидетельствует о равномерности распределения магнитной индукции по диаметру канала, а разное время нагрева загрузки в верхних и центральных точках объясняется «конечным» эффектом электромагнитного поля индуктора.*

**Индуктор, стержни, индукционный нагрев, теплообменные процессы, рапс, термообработка.**

*The method of calculating load inductor heating rapeseed are proposed. The experimental determination of thermal fields are conducted. The value of the temperature along the rod and rod coil located in different radial rows in the middle of the inductor are practically identical. It indicates the uniformity of distribution of magnetic induction in the channel.*

**Inductor, rod, induction heating, heat processing, rapeseed, heating.**