

УДК 621.365: 621.785

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ
НА ОСНОВЕ ЧИСЛЕННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
НАГРЕВА ФЕРРОМАГНИТНЫХ ЗАГОТОВОК В ИНДУКЦИОННОМ
НАГРЕВАТЕЛЕ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ****С.В. Князев**ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект»
Россия, 443086, г. Самара, ул. Складенко, 26

E-mail: sknyaz86@mail.ru

Рассматривается методика постановки и численного расчета электромагнитных и тепловых полей в установившемся и переходных режимах функционирования индукционных нагревателей непрерывного и дискретно-непрерывного действия с ферромагнитной загрузкой для нагрева до температур пластической деформации. Решение краевых задач для электромагнитного и теплового полей выполнено методом конечных элементов. Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем координата этого перехода в неустановившемся режиме работы изменяется в широком диапазоне. В этом случае существенно изменяется сопротивление системы, что приводит к изменению распределения мощности по длине индуктора. Кроме того, изменяется и полная мощность, подводимая к индуктору, и коэффициент мощности.

Ключевые слова: индукционный нагрев, численная математическая модель, метод конечных элементов, электромагнитные и тепловые поля.

Предметом исследования является нагревательная установка для индукционного дискретно-непрерывного нагрева стальных цилиндрических заготовок перед обработкой на деформирующем оборудовании. Односекционный нагреватель рассчитан на нагрев цилиндрических заготовок диаметром 22–40 мм. Температура нагрева – 1200–1300 °С. Столб из 22 заготовок движется по направляющим из жаропрочной стали. Очередная нагретая заготовка выталкивается в приемный лоток и транспортируется к обжимному устройству штампа или пресса. Загрузка холодных заготовок осуществляется автоматически из приемного бункера. Для перемещения заготовок по направляющим служит механизм возвратно-поступательного действия с электроприводом.

Особенностью расчета параметров индукционных нагревателей дискретно-непрерывного действия является сложный характер взаимосвязанных электромагнитных и тепловых процессов, ярко выраженная неравномерность пространственного распределения внутренних источников тепла при нагреве ферромагнитных заготовок в нагревателе дискретно-непрерывного действия, зависимость мощности внутреннего тепловыделения нагревателя от температуры нагреваемых заготовок.

Сергей Валерьевич Князев (к.т.н.), инженер ООО «Красноярскгазпром нефтегазпроект».

В связи с этим для создания методики расчета индукционной системы, оптимизации переходных режимов в работе рассматривается численная математическая модель, учитывающая специфические особенности распределения внутренних источников тепла по длине нагревателя, а также существенные нелинейности, обусловленные потерей магнитных свойств металла при переходе через точку Кюри. Исходя из физической сущности рассматриваемой задачи при моделировании процесса дискретно-непрерывного нагрева был принят ряд общепринятых допущений, позволивших получить удовлетворительную точность описания температурного поля с помощью численного метода:

- электромагнитные процессы принимаются безынерционными;
- электрофизические и теплофизические характеристики материала заготовки для каждого интервала дискретности остаются неизменными, изменяясь лишь при переходе на следующую позицию.

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейной взаимосвязанной системой уравнений Максвелла и Фурье соответственно для электромагнитного и теплового полей с соответствующими краевыми условиями [1, 2].

Система уравнений дополняется граничными условиями для электромагнитной задачи: используются условия равенства функции нулю на бесконечно удаленной границе S_1 (ГУ1) и условие симметрии на осевой линии S_2 , которое заключается в равенстве нулю производной от функции. Решение краевых задач для электромагнитного и теплового полей выполнено методом конечных элементов (МКЭ), который дает возможность достаточно точно учитывать все нелинейности путем изменения всех нелинейных величин с каждым шагом по времени.

Аналитические методы решения взаимосвязанной системы уравнений Максвелла и Фурье, несмотря на их быстрое действие, компактность и другие преимущества, имеют существенные ограничения по области применения. Такие методы применяются для моделирования одномерных и пространственно-двумерных полей при индукционном нагреве геометрически простых систем или частей сложной системы, как правило, в линейной постановке. В рассматриваемой ситуации технологического нагрева ферромагнитных заготовок под обработку на деформирующем оборудовании необходимо учитывать ряд изменяющихся в функции температуры заготовок факторов и существенных нелинейностей:

- в процессе нагрева теплофизические и электрофизические свойства материала заготовки существенно изменяют свои значения с ростом температуры;

- в связи с изменением свойств материала заготовки изменяются интегральные электрические параметры нагревателя, что приводит в процессе выхода на установившийся режим к изменению координат «холодного» и «горячего» режимов и, как следствие, к перераспределению удельной мощности нагрева по длине нагревателя;

- учет этих факторов приводит к необходимости решать нелинейную задачу с зависящими от температурного распределения источниками тепла.

Достаточно точно эти зависимости могут быть получены только численными методами.

При построении сетки наибольший интерес представляет поведение электромагнитного поля в непосредственной близости к загрузке и катушке индуктора. В этих областях плотность сетки должна быть максимальной. Плотность сетки можно уменьшать по мере удаления к границе области. В настоящей работе для разбиения исследуемого пространства выбран треугольный тип элементов.

Специфической особенностью исследуемого процесса является переход нагреваемой заготовки через точку магнитных превращений, причем осевая координата этого перехода в переходных режимах работы изменяется в широком диапазоне. В этом случае существенно изменяется сопротивление системы, что приводит к изменению распределения мощности по длине индуктора. Кроме того, изменяется и полная мощность, подводимая к индуктору. При построении конечно-элементной тепловой модели такие сложные процессы, как теплообмен на границе двух твердых тел, заменяются комбинацией соседних элементов с различными свойствами.

Решение краевой задачи расчета магнитного поля численным методом основывается на минимизации энергетического функционала.

Мощность внутренних источников тепла, характеризующих нагрев проводящих тел индукционной системы, вычисляется для каждого элемента по закону Джоуля – Ленца.

Для практического использования предлагаемого алгоритма решения электромагнитной задачи в работе применяется программный пакет ELCUT, который при некоторых допущениях позволяет решать нелинейные задачи гармонического анализа. Так, при значительном превышении длины индуктора по отношению к диаметру, что имеет место для исследуемых систем, можно не учитывать влияние краевых эффектов на торцах индуктора.

Конечно-элементная методика электромагнитного расчета, описанная в работе, реализована в виде программного пакета на персональном компьютере.

Как показывают результаты расчета, участок загрузки с ферромагнитными заготовками составляет примерно пятую часть от всей загрузки (на долю ферромагнитного участка приходится пять заготовок, в то время как на долю горячих (немагнитных) заготовок приходится 17 заготовок). Анализ графиков электромагнитных характеристик позволяет сделать вывод о том, что переход от ферромагнитного состояния металла в немагнитное занимает незначительную часть длины загрузки, составляющую меньше длины одной заготовки, поэтому ее влияние на температурное распределение можно не учитывать. Это полностью согласуется с выводами, полученными ранее рядом авторов [3, 4].

Полученные в результате численного расчета электромагнитной задачи внутренние источники тепла используются далее при решении задачи расчета температурного поля заготовок в процессе дискретного перемещения через нагреватель.

В тепловой модели мощность внутренних источников на каждом интервале задается в соответствии с расчетной мощностью, определенной при решении электромагнитной задачи. В исследуемой индукционной нагревательной установке процесс моделирования происходит поэтапно. Вначале производится расчет температурных полей в каждой заготовке нагревателя. При расчете свойства металла цилиндрической загрузки, такие как удельная проводимость, теплоемкость, теплопроводность, задаются в соответствии с изменяющейся на каждом интервале постоянства температурой.

Для решения проблемы применяются конечные элементы более высоких порядков, что позволяет обеспечивать нелинейные законы изменения функции между узлами внутри элемента. Тем не менее иногда для ускорения процесса вычисления приходится увеличивать допустимую погрешность, чтобы получить приемлемое число итераций и общее время счета.

Исследуемая в численных расчетах математическая модель процесса теплопроводности с внутренними источниками тепла в цилиндрических координатах имеет вид [5, 6, 7]

$$\frac{\partial T(r, x, t)}{\partial t} = a(T) \left[\frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + \frac{1}{c(T)\gamma} W(r, x, t, \xi(T)) \quad (1)$$

с краевыми условиями

$$T(r, x, 0) = T_0(r, x); \quad \frac{\partial T(R, x, t)}{\partial r} = \alpha(T) [T(R, x, t) - T_{\text{вн}}(R, x)], \quad \lambda \frac{\partial T(0, x)}{\partial r} = 0, \quad (2)$$

здесь $T(r, x, t)$ – температурное распределение по объему цилиндра; a – коэффициент температуропроводности; r, x – радиальная и аксиальная координаты соответственно; $W(r, x, t, \xi(T))$ – функция распределения внутренних источников тепла; t – время процесса; $T_{\text{вн}}(R, x)$ – температура внешней среды; α – коэффициент теплообмена.

Следуя методу конечных элементов [8], дифференциальному уравнению (1) ставим в соответствие вариационную формулировку о минимизации энергетического функционала, характеризующего тепловое состояние тела.

Исследуемая область аппроксимируется совокупностью элементов с конечным числом узловых точек. Полученный функционал заменяем суммой отдельных вкладов элементов, определяя таким образом функциональные соотношения относительно узловых неизвестных.

Решение тепловой задачи методом конечных элементов реализовано в среде FemLab 3.5.

Приведены результаты расчетов электромагнитных и тепловых полей (рис. 1–3) в стационарном режиме. Анализ полученных численных экспериментов показал, что перепад температуры между поверхностью и центром загрузки при любых реальных значениях мощности индуктора в течение всего времени нахождения заготовки в индукторе не выходит за пределы допустимых значений, поэтому при решении задачи оптимизации переходных режимов в качестве выходного параметра можно рассматривать среднюю по сечению температуру заготовки.

Ввиду того, что нагреваемое тело является ферромагнитным, необходимо учитывать переход его через точку магнитных превращений. Используемый программный пакет не позволяет отразить зависимость магнитной проницаемости среды от температуры, поэтому решение задач производится итерационно, заготовка рассматривается как многослойное тело, по мере прогрева цилиндра пересчитывается распределение внутренних источников тепла и полученные данные переносятся в задачу теплового расчета для заготовки.

Геометрическая модель тепловой задачи полностью повторяет модель электромагнитной задачи, источником тепла является мощность тепловыделения в заготовках.

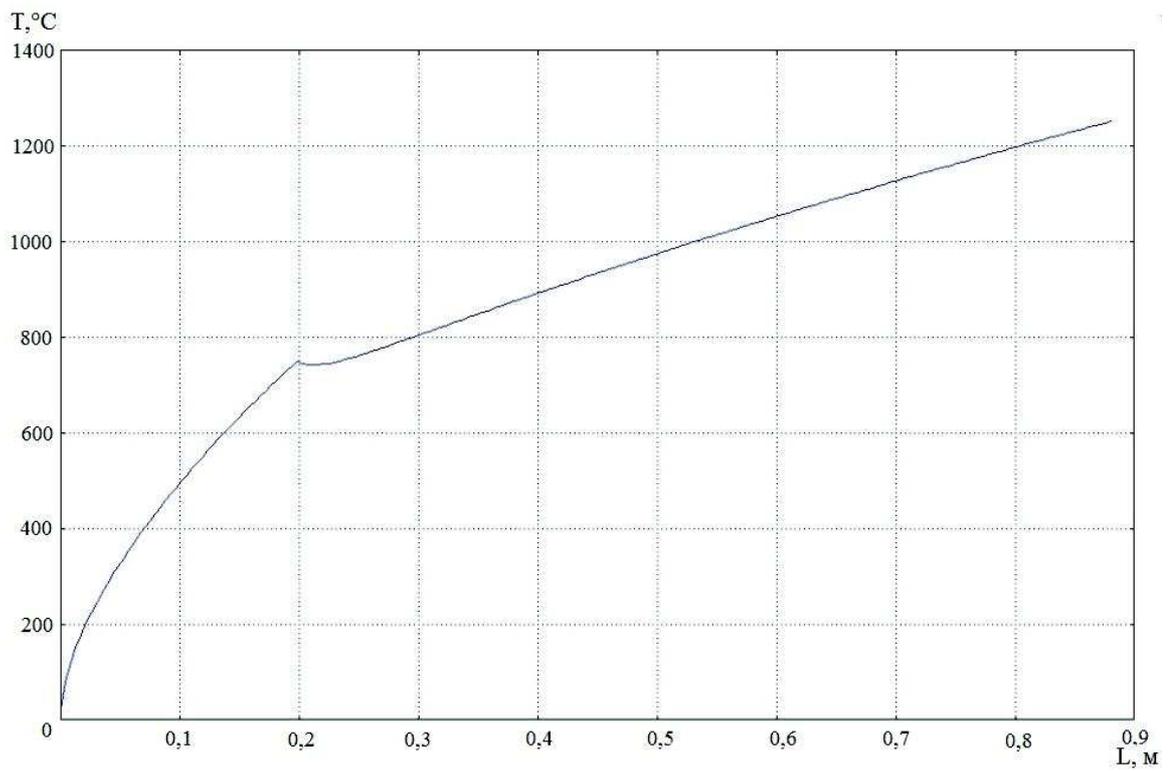


Рис. 1. Распределение температуры по длине на поверхности загрузки в установившемся режиме

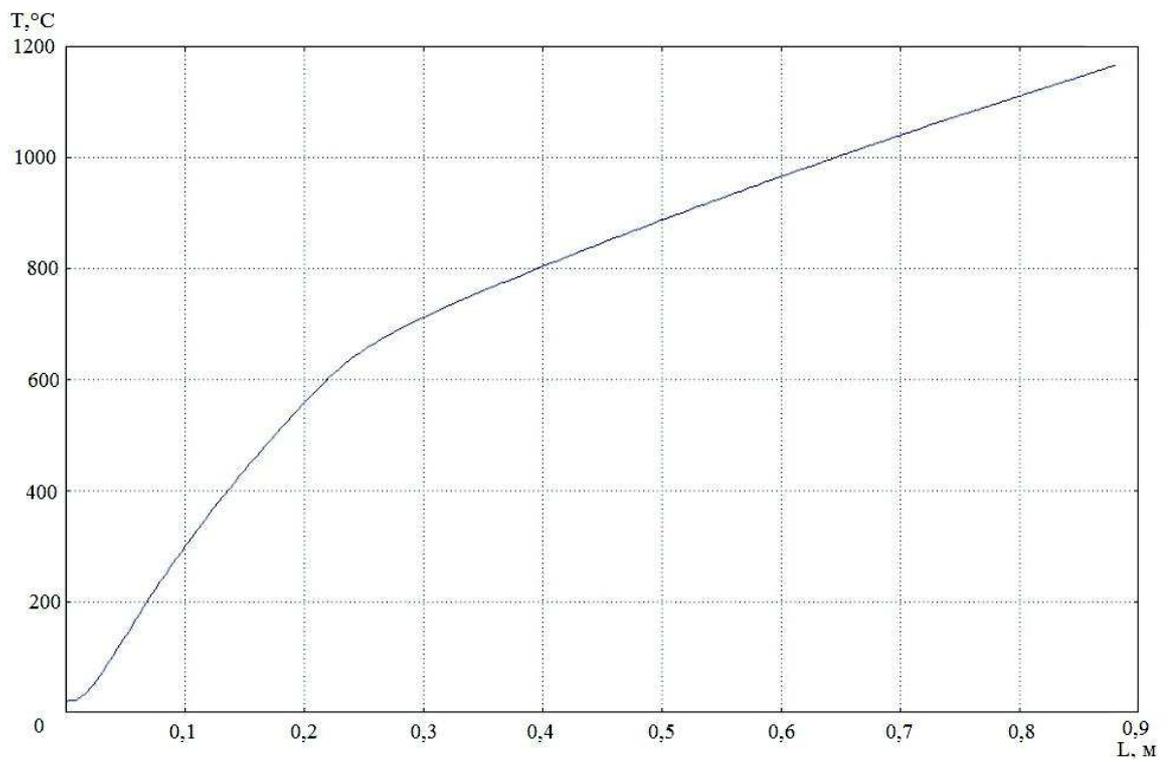


Рис. 2. Распределение температуры по длине на оси загрузки в установившемся режиме

Параметры индуктора

Наименование	Условное обозначение	Величина
Производительность, кг/ч	П	200
Диаметр заготовки, мм	D_2	28
Длина заготовки, мм	l_2	40
Плотность заготовки, кг/м ³	ρ	7800
Масса заготовки, кг	m	0,192
Материал заготовки	Ст3Х15	–
Температура поверхности на выходе, °С	T_2	1250
Перепад температуры по радиусу на выходе, °С	ΔT	100
Размер трубки индуктора, мм	–	2×15
Диаметр индуктора, мм	D	48
Длина индуктора, мм	L	880
Число витков индуктора	–	59
Частота, Гц	f	8000
Напряжение питания, В	U	538,34
Полезная мощность, кВт	P_2	72,64
Полная активная мощность, кВт	P_i	90,1
КПД электрический	η	0,8
Коэффициент мощности	$\cos\varphi$	0,118

После проверки результатов на соответствие накладываемых ограничений решение задачи нагрева для системы «индуктор – заготовка» считается законченным. Заключительным этапом расчета является определение интегральных параметров системы – расчет и выбор числа витков и сечения проводов катушки индуктора в соответствии с выбранным напряжением источника питания и расчет системы охлаждения.

На основе численной модели процесса определены интегральные параметры индуктора (данные приведены в таблице), реализующего в стационарном режиме основное технологическое требование, предъявляемое к нагревательной установке, – минимизацию абсолютного отклонения температуры на выходе из нагревателя от заданного значения.

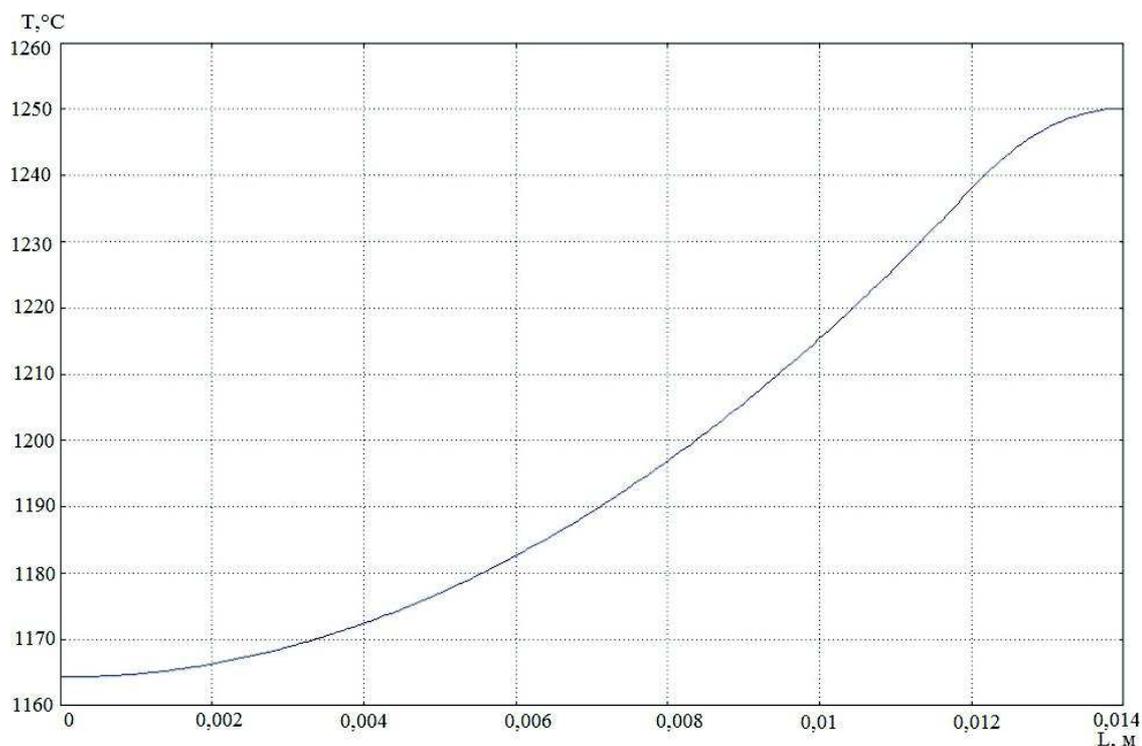


Рис. 3. Распределение температуры по радиусу загрузки на выходе из нагревателя в установившемся режиме

Разработаны алгоритм и программа расчета электромагнитных и температурных полей в установившемся режиме работы нагревателя дискретно-непрерывного действия. Определено, что для получения удовлетворительного по точности описания температурного поля, наиболее удобного для последующего решения задач оптимизации, необходимо использовать численную электро-тепловую модель процесса непрерывного нагрева.

Полученные в результате расчета параметры для одной конкретной реализации процесса могут быть применимы для решения задачи оптимизации переходных режимов индукционного нагревателя дискретно-непрерывного действия для нагрева ферромагнитных цилиндрических заготовок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Вайнберг А.М.* Индукционные плавильные печи. – М.: Энергия, 1967. – 415 с.
2. *Лыков А.В.* Теория теплопроводности. – М.: Высш. школа, 1967. – 599 с.
3. *Немков В.С., Демидович В.Б.* Теория и расчет устройств индукционного нагрева. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 280 с
4. *Слухоцкий А.Е., Рыскин С.Е.* Индукторы для индукционного нагрева машиностроительных деталей. – Л.: Энергия, 1975. – 183 с.
5. *Данилушкин А.И., Осипов О.О., Фрыгин И.В.* Аналитическая модель процесса непрерывного индукционного нагрева заготовок подшипниковых колец // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Физико-математические науки. – 2000. – Вып. 9. – С. 200–203.
6. *Коломейцева М.Б.* Методология и опыт применения цифрового моделирования для оптимизации процессов промышленного нагрева металла: Автореф. ... дис. доктора техн. наук. – М., 1986. – 37 с.
7. *Рапопорт Э.Я.* Оптимизация процессов индукционного нагрева металла. – М.: Metallургия, 1993. – 279 с.
8. *Зенкевич О.* Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир, 1975. – 541 с.

Статья поступила в редакцию 2 июля 2015 г.

RESEARCH OF THERMAL AND ELECTROMAGNETIC FIELDS ON THE BASIS OF NUMERICAL MATHEMATICAL MODEL OF HEATING OF FERROMAGNETIC PREPARATIONS IN THE INDUCTION HEATER OF DISCRETE AND CONTINUOUS ACTION

S.V. Knyazev

Krasnoyarskgazprom Neftegazproyekt
26, Skljarenko st., Samara, 443086, Russian Federation

E-mail: sknyaz86@mail.ru

The technique of statement and numerical calculation of electromagnetic and thermal fields in established and the transitional modes of functioning of induction heaters of continuous and discrete and continuous action with ferromagnetic loading for heating to temperatures of plastic deformation is considered. The solution of regional tasks for electromagnetic and thermal fields is executed by method of final elements. Specific feature of the studied process is transition of the heated preparation through a point of magnetic transformations, and, the coordinate of this transition in the unsteady operating mode changes in the wide range. In this case resistance of system that leads to change of distribution of power on inductor length significantly changes. Besides, also the full capacity brought to the inductor and power factor changes.

Keywords: *induction heating, numerical mathematical model, method of final elements, electromagnetic and thermal fields.*