

## Электротехника

УДК 621.365

### ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ПЛАСТИЧЕСКИХ МАСС

*Л.С. Зимин, А.Г. Сорокин*

Самарский государственный технический университет  
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

*Проведен анализ методов моделирования электромагнитных и тепловых полей. С помощью метода конечных элементов, реализованного программно, смоделирована электротепловая модель системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья и исследованы электромагнитные и тепловые поля. Приведены результаты расчета на численной модели. Представленная математическая модель системы индукционного нагрева может быть использована при проектировании технологических комплексов производства пластмассы. Предложена оригинальная система индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале.*

**Ключевые слова:** *производство пластмассы, литьевая машина, электротепловая модель, методы моделирования, энергетические параметры.*

За последнее время перспектива применения изделий из пластических масс очень возросла. Это наблюдается в автомобилестроении и при производстве электротехнической продукции. Производство большинства таких материалов является сложным технологическим процессом, который экономически целесообразен только при осуществлении его в промышленном масштабе. Высокая техническая сложность и значительные капиталовложения послужили стимулом для поиска способов повышения энергоэффективности процесса производства пластических масс.

Индукционный нагрев по сравнению с другими видами нагрева обеспечивает более высокую точность поддержания температуры нагрева и возможности полной автоматизации, а также, что не менее важно, более высокие санитарно-гигиенические условия и возможности проведения технологических процессов на более высоком уровне. Кроме этого при использовании индукционного нагрева имеется возможность получения избирательного и равномерного нагрева и существенно снижается пожарная опасность.

---

*Лев Сергеевич Зимин (д.т.н., проф.), профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий».*

*Алексей Григорьевич Сорокин (к.т.н.), доцент кафедры «Теоретическая и общая электротехника».*

Поэтому целесообразно для нагрева пластмассы использовать индукционный нагреватель, устанавливаемый непосредственно на литьевой машине (рис. 1).

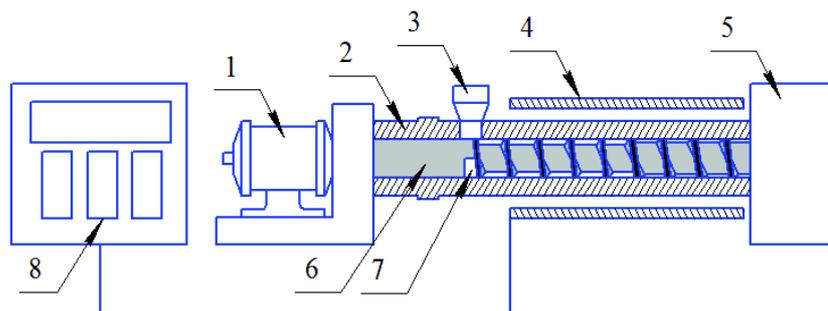


Рис. 1. Комплекс индукционного нагрева для производства пластической массы

Принцип работы заключается в следующем: двигатель (1) приводит во вращение шнек (6) с помощью которого осуществляется распределение исходного материала (7), поступившего из приемного бункера (3) по длине цилиндра (2) и через сопло выливается в пресс-форму штамповочного устройства (5). С помощью рабочей станции (8) осуществляется управление индуктором (4).

Установки индукционного нагрева предназначены для выполнения определенных технических операций и при их проектировании технологические требования являются определяющими. Задача проектирования это создание системы индукционного нагрева, которая обеспечивает данный технологический процесс с максимальным использованием возможности технологической линии и минимальные приведенные затраты, создает условия для наибольшей производительности труда обслуживающего персонала, соответствует правилам техники безопасности и правилам устройства и эксплуатации электроустановок.

При всем многообразии схем индукционного нагрева в данном случае выбрана схема, при которой индуктор (4) охватывает цилиндр плакировки (2), находящийся в нем исходный материал (7) и шнек (6). Аппарат прост в исполнении (рис. 2).

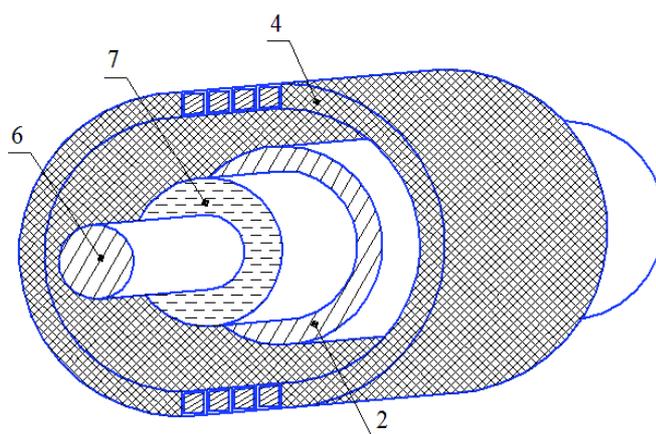


Рис. 2. Общий вид теплообменного аппарата

На основании этой электротепловой модели, которая учитывает соблюдение температурного режима, проводится анализ процессов теплообмена в системе «индуктор – металл – пластическая масса».

Эскиз такой модели показан на рис. 3. Такие модели дают исчерпывающую характеристику индукционного устройства с точки зрения потребления энергии от внешнего источника питания и выделения ее в нагрузку. Тепловой расчет проводят с целью определения технических данных установок (мощности, температуры, интенсивности теплоотдачи), которые обеспечивают технологические требования. Электрический расчет очень тесно связан с тепловым расчетом и состоит в выборе напряжения питания, рода тока, частоты, в определении геометрических параметров нагревателя, электрического к.п.д. и коэффициента мощности, разработке схемы управления и способа регулирования.

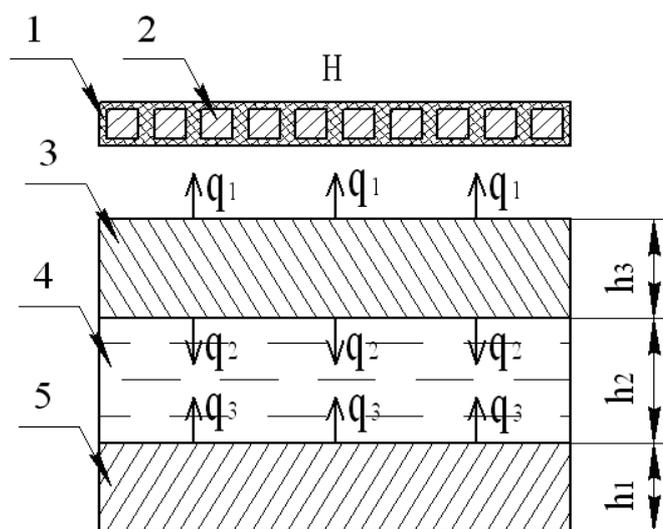


Рис. 3. Эскиз электротепловой модели :  
1 – изоляция витков индуктора; 2 – индуктор;  
3 – стенка цилиндра плакикации; 4 – пластическая масса; 5 – шнек

С помощью программы, построенной на основе метода конечных элементов, составляется геометрическая модель системы, которая содержит все объекты, имеющие тепловой контакт.

Следующим шагом является задание условий теплообмена, величины плотности внутренних источников тепла и времени нагрева.

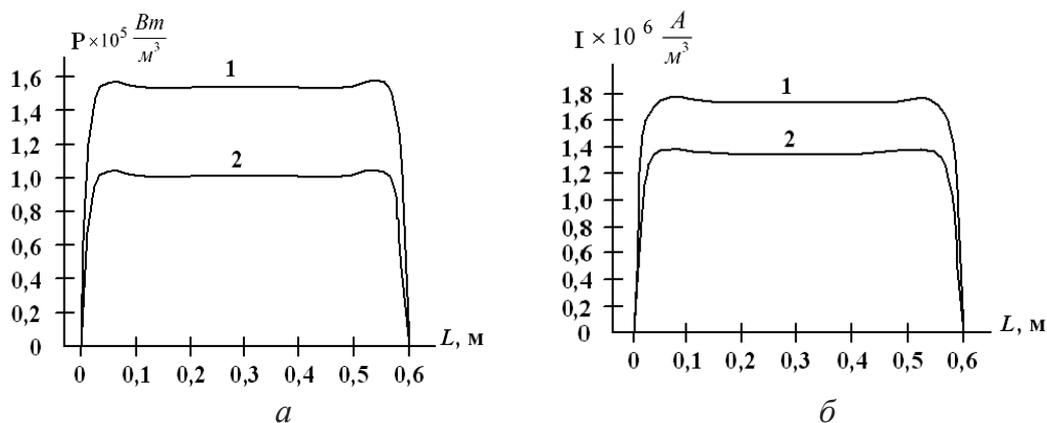


Рис. 4. Распределение удельной объемной мощности и тока по длине объекта:  
а – распределение удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2);  
б – распределение плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2)

В ходе моделирования получены решения электромагнитной задачи. Результаты расчета представлены на рис. 4: *a* – график распределения удельной объемной мощности по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2); *b* – график распределения плотности тока по длине цилиндра (кривая 1) и шнека (кривая 2).

Характер распределения удельной объемной мощности и тока по сечению объекта нагрева представлен на рис. 5.

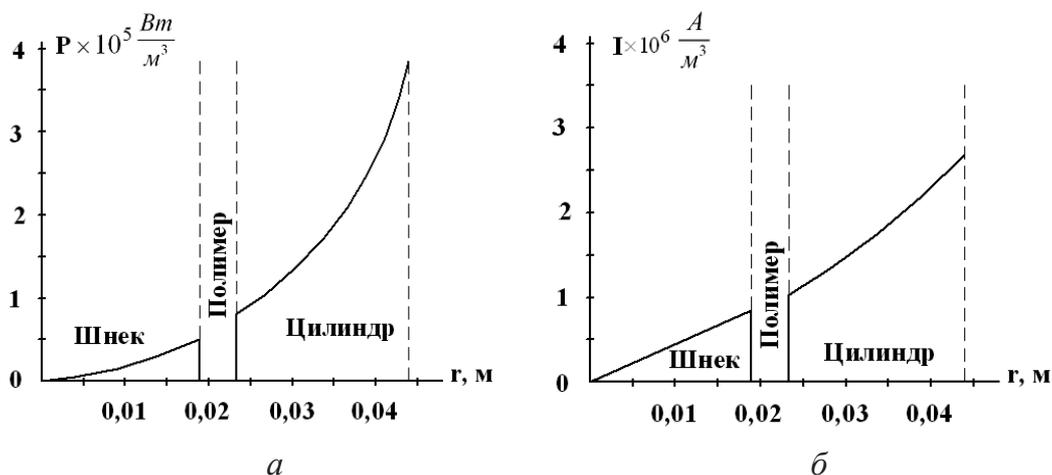


Рис. 5. Распределение удельной объемной мощности и тока по сечению объекта:  
*a* – распределение удельной объемной мощности по радиусу объекта нагрева;  
*b* – распределение плотности тока по радиусу объекта нагрева

Из представленных графиков, отчетливо наблюдается, что удельная объемная мощность по сечению максимальна на поверхности цилиндра и шнека, уменьшаясь по мере проникновения вглубь.

Алгоритм работы осуществляется следующим образом: производим разогрев балластного материала в течение 1800 с; затем его удаляем и производим уточненное догревание шнека до установленной температуры в течение 600 с;

Рабочий цикл состоит из последовательного нагрева трех порций сырья, время нагрева одной порции – 600 с, а после третьей порции происходит подогрев системы до заданной температуры.

Результаты расчета тепловой задачи на каждом из этапов представлены на рис. 6, 7.

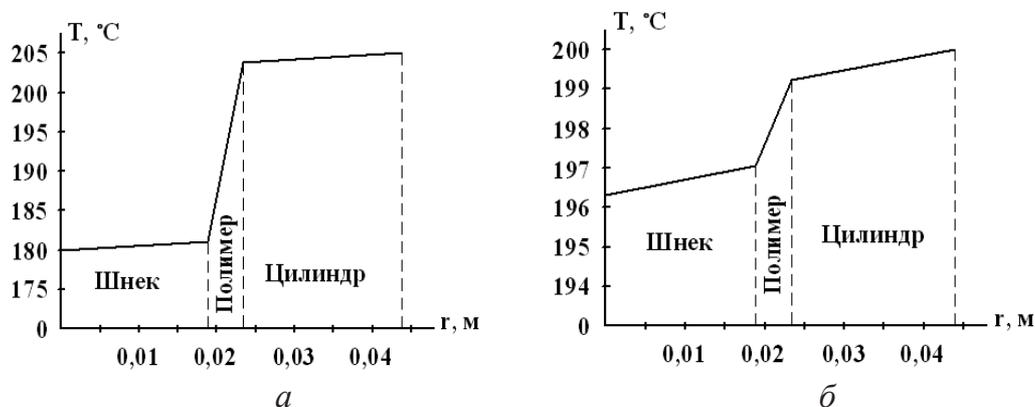


Рис. 6. Результаты расчета тепловой задачи:  
*a* – температурное распределение на первом этапе нагрева;  
*b* – температурное распределение на втором этапе

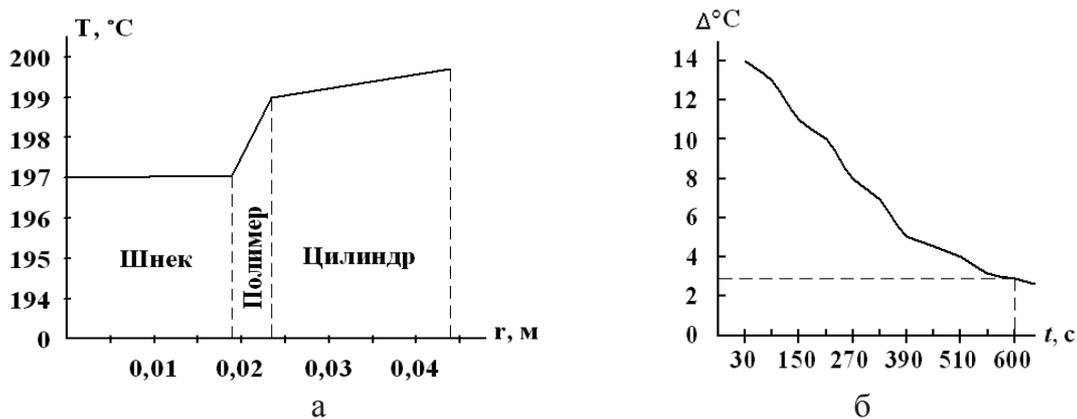


Рис. 7. Перепад температуры по времени нагрева:  
 а – температурное распределение на третьем этапе;  
 б – зависимость перепада температуры от времени нагрева

На основе анализа полученных решений определяем энергетические показатели, а именно частоту тока, к.п.д. и  $\cos\varphi$  [4].

С увеличением частоты глубина ее проникновения уменьшается и поэтому регулируя частоту электромагнитных колебаний можно регулировать глубину проникновения. Поэтому при удачном выборе частоты можно осуществлять нагрев от цилиндра и шнека.

Зависимость электрического к.п.д. и коэффициента мощности от частоты представлена на рис. 8.

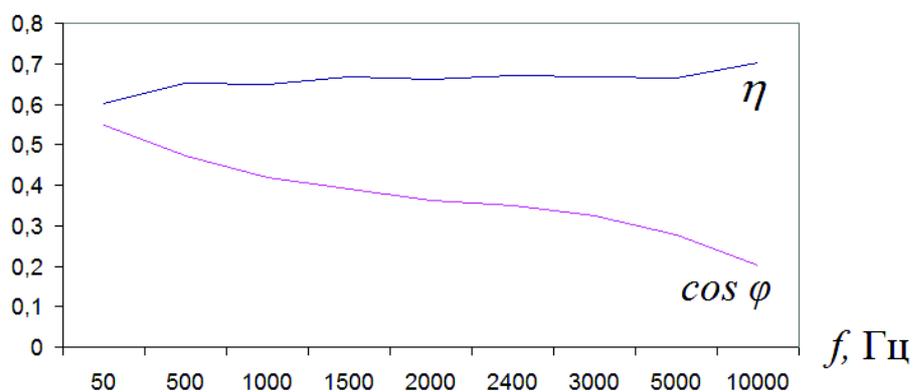


Рис. 8. Зависимость  $\eta$  и  $\cos\varphi$  от частоты

Из приведенных зависимостей можно сделать вывод, что на частоте 50 Гц значения к.п.д. и коэффициента мощности являются оптимальными.

Поэтому, учитывая ряд конструктивных требований к индукционной системе, в частности минимизацию размеров индуктора и условия согласования параметров индуктора с источником питания, в качестве энергетических параметров следует выбрать частоту  $f = 50 \text{ Гц}$ ,  $\eta = 0,602$ ,  $\cos\varphi = 0,549$ .

Проведенный поиск конструкции и алгоритма управления определил, что при нагреве до  $600^\circ\text{C}$  наиболее рациональной является конструкция однослойного цилиндрического индуктора, который выполнен медным проводом ПОЖ 6,3×2. Число витков индуктора 110, полная мощность индуктора 20 кВт, напряжение 220 В, частота 50 Гц, внешний диаметр цилиндра 0,088 м, внутренний диаметр цилиндра 0,046 м, толщина стенки цилиндра 0,021 м, диаметр шнека 0,036 м, толщина слоя полимерного материала 0,005 м [5].

Определенные параметры и алгоритмы работы позволяют производить контроль температуры в изделии, а также учитывать влияние того или иного возмущающего воздействия.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Бернхардт Э.* Переработка термопластичных материалов. – М.: Госхимиздат, 1962. – 747 с.
2. *Слухоцкий А.Е., Немков В.С.* Установки индукционного нагрева. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 328 с.
3. *Шамов А.Н., Бодажков В.А.* Проектирование и эксплуатация высокочастотных установок. – М.: Машиностроение, 1974. – С. 280.
4. *Сорокин А.Г., Зимин Л.С.* Частота тока индуктора при производстве пластмассы методом литья // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. Технические науки. – 2011. – Вып. 1(29). – С. 166–169.
5. *Сорокин А.Г., Горбачевский Н.И., Мифтахова Л.Х.* Энергетические параметры индуктора для технологического комплекса производства пластмассы методом литья // Вестник Казанского технологического университета. – 2014. – Вып. 1 (Т17). – С. 254–256.

*Статья поступила в редакцию 6 сентября 2016 г.*

## INDUCTION HEATING BY PRODUCTION PLASTICS

***L.S. Zimin, A.G. Sorokin***

Samara State Technical University  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russian Federation

*The analysis of modeling methods of electromagnetic and thermal fields is carried out. By means of the finite-element method realized programmatically the electro thermal model of system of induction heating for plastic production is simulated by method of casting. Electromagnetic and thermal fields are studied. Results of calculation are given in numerical model. The provided mathematical model of system of induction heating can be used when designing technological complexes of plastic production. The original system of induction heating for plastic production is offered by a casting method. The main energy indicators and algorithms of work which provide required temperature distribution in the heated polymeric material are determined.*

***Keywords:*** plastic production, molding machine, electrothermal model, modeling methods, energy parameters.

---

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.  
Aleksy G. Sorokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*