

Краткие сообщения

УДК 621.365

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ИНДУКЦИОННОГО НАГРЕВА

Л.С. Зимин¹, А.Г. Сорокин¹, Н.И. Горбачевский²

¹Самарский государственный технический университет
Россия, 443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244

² Нижнекамский химико-технологический институт (филиал)
Казанский национальный исследовательский технологический университет
Россия, 423578, Республика Татарстан, г. Нижнекамск, пр. Строителей, 47

Предложено применение косвенного индукционного нагрева в технологическом комплексе при производстве пластмассы. С помощью метода конечных элементов, реализованного программно, смоделирована электротепловая модель системы индукционного нагрева для производства пластмассы методом литья, и исследованы электромагнитные и тепловые поля. Предложена система индукционного нагрева с оригинальными конструктивными элементами для производства пластмассы методом литья. Выявлены зависимости глубины проникновения от частоты нагрева. Определены основные энергетические показатели и алгоритмы работы, состоящие из нескольких этапов, которые обеспечивают требуемое температурное распределение в нагреваемом полимерном материале при производстве пластмассы.

Ключевые слова: *производство пластической массы, литьевая машина, методы моделирования, энергетические параметры.*

Применение изделий из пластических масс возрастает с каждым годом. Это наблюдается в автомобилестроении и 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.

К переработке пластических масс относится следующее. Первое – это подготовка пластических материалов к переработке: модификация их путем различных химических превращений или добавления веществ, изменяющих соответствующим образом их свойства. Второе – это переработка полимеров: разработка и применение различных процессов расплавления, формирования и других методов, изменяющих свойства пластических материалов с целью лучшего их использования. Третье – это изготовление деталей из пластмасс с учетом свойств

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

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

Николай Иванович Горбачевский (к.т.н.) зав. кафедрой «Электротехника и энергообеспечение предприятий».

материала и условий эксплуатации. Четвертое – это общие технологические операции, такие как контроль качества продукции, разработка методов испытаний, некоторые экономические вопросы.

Производство продукции из пластических масс в настоящее время осуществляется в литьевой машине. Объект для проектирования представляет собой теплообменный аппарат, который состоит цилиндра 3 и вращающегося внутри него шнека 5 (рис. 1). При использовании индуктора промышленной частоты 2 нагрев полимерного материала 4 осуществляется от цилиндра и шнека одновременно [1, 2].

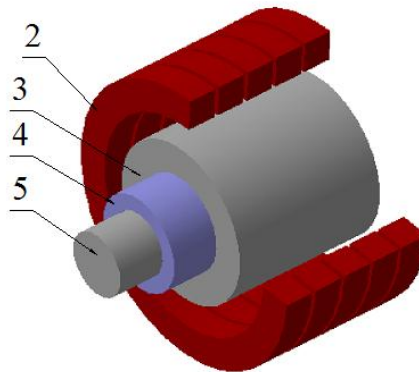


Рис. 1. Теплообменный аппарат

Электротепловой называется модель, которая учитывает взаимное влияние электромагнитного и температурного полей в процессе индукционного нагрева пластической массы.

В общем случае процесс индукционного нагрева описывается нелинейными уравнениями Максвелла для электромагнитного поля с соответствующими краевыми условиями:

$$\operatorname{rot} \dot{H} = \frac{1}{\rho} E + \frac{\partial D}{\partial t}; \operatorname{rot} \dot{E} = -\frac{\partial B}{\partial t}; \operatorname{div} \dot{H} = 0; \operatorname{div} \dot{E} = 0. \quad (1)$$

Здесь \dot{H} , \dot{B} , \dot{E} , \dot{D} – векторы напряженности и индукции магнитного и электрического полей.

Исходная постановка нелинейной электромагнитной задачи выражается через векторный потенциал общим уравнением Пуассона в двумерной области:

$$\operatorname{rot} \left(\frac{1}{\mu_a} \operatorname{rot} \dot{A} \right) + \gamma \frac{\partial \dot{H}}{\partial t} = \dot{J}_0; \operatorname{rot} \dot{A} = \dot{B}; \operatorname{div} \dot{A} = 0. \quad (2)$$

Здесь \dot{A} – векторный потенциал;

μ_a – абсолютная магнитная проницаемость среды;

\dot{J} – удельная электрическая проводимость.

Для решения тепловой задачи используется первый закон термодинамики, записанный в виде дифференциальных уравнений для объемных тел:

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) \Gamma \right] + (L)^T (q) = \ddot{q}. \quad (3)$$

Здесь \ddot{q} – скорость образования тепла в конечном объеме;

(q) – вектор теплового потока;

$(L)^T$ – векторный оператор;

(v) – вектор, характеризующий скорость переноса тепла.

Связь между вектором теплового потока и температурным градиентом устанавливается по закону Фурье:

$$(q) = -[D](L)\Gamma. \quad (4)$$

Объединение двух последних уравнений дает уравнение вида

$$\gamma c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + (v)^T (L) \Gamma \right] = (L)^T ([D](L)\Gamma) = \ddot{q}. \quad (5)$$

Полученные уравнения применяются в декартовой системе координат в линейной постановке. Для полной физической определенности общая система уравнений дополняется эмпирическими зависимостями удельной теплоемкости, вязкости, коэффициентов теплопроводности, теплопередачи и других величин от температуры. Расчет теплового поля системы осуществляется методом конечных элементов, реализованным программно с помощью пакета ELCUT.

На основе анализа электротепловой модели, реализованной программно, разработан алгоритм работы, который состоит из трех этапов:

- засыпка балластного материала и разогрев в течение 1800 с;
- удаление балласта и уточненное догревание шнека до установленной температуры в течение 600 с;
- рабочий цикл – три порции сырья, время нагрева одной порции 600 с;
- подогрев системы до заданной температуры.

Обеспечить максимальный КПД можно соответствующим выбором частоты тока индуктора. Зависимость электрического КПД от частоты довольно сложна и определяется параметрами нагреваемой детали и ее состоянием. Для тел круглого сечения КПД обычно растет с повышением частоты, стремясь к предельному значению. Для полых цилиндров существует оптимальная частота, при которой КПД максимален [3, 4]. Полученные результаты представлены в таблице.

Зависимость энергетических параметров от частоты

f , Гц	50	500	1000	1500	2000	2400	3000	5000	10000
Δ , м	0,03	0,009	0,007	0,005	0,0045	0,004	0,0035	0,003	0,002
η	0,602	0,653	0,65	0,669	0,662	0,672	0,667	0,666	0,701
$\cos \varphi$	0,549	0,471	0,419	0,392	0,361	0,349	0,325	0,276	0,203

Оригинальность предложенной конструкции заключается в том, что при частоте 50 Гц будет выделение энергии в шнеке и возможность нагрева пластической массы с двух сторон. Вследствие ряда требований по уменьшению размеров индуктора и условия согласования параметров индуктора с источником питания в качестве рабочей частоты следует выбрать $f = 50$ Гц.

Решение задачи поиска конструкции и алгоритма управления показывает, что при нагреве до 600 °С наиболее пригодной и эффективной будет однослойный цилиндрический индуктор, для которого выбираем медный провод ПОЖ 6,3×2.

После окончательного расчета и проведенных уточнений принимаем индуктор с числом витков 120. Питание индуктора осуществляется от сети напряжением 220 В промышленной частотой 50 Гц. Полная мощность индуктора 22 кВт [5].

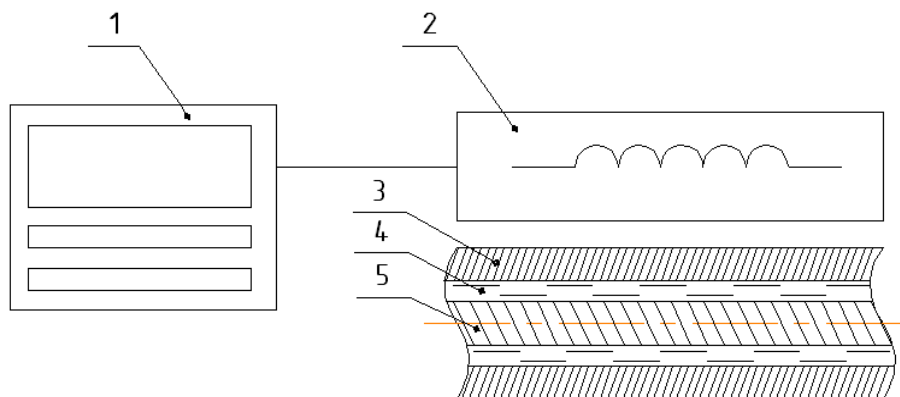


Рис. 2. Технологический комплекс индукционного нагрева:
1 – блок управления; 2 – индукционный нагреватель; 3 – цилиндр;
4 – пластиковая масса; 5 – шнек

Работу технологического комплекса осуществляет программное управление, которое обеспечивает заданную точность и минимум времени нагрева. Также на рабочем блоке размещены и другие управляющие системы, которые обеспечивают функционирование, диагностику и регистрацию всего технологического процесса.

Данный технологический комплекс индукционного нагрева при производстве пластиковых масс позволит производить контроль температуры в полимерном 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. Шапов 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 14 января 2017 г.

ELECTROTECHNICAL COMPLEX OF INDUCTION HEATING

L.S. Zimin, A.G. Sorokin, N.I. Gorbachevsky

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

Nizhnekamsk chemical institute of technology (branch) "Kazan national research technological university"
47, Stroiteley Ave., Nizhnekamsk, Republic of Tatarstan, 423578, Russian Federation

By means of the finite-element method realized programmatically the electrothermal model of system of induction heating for plastic production is simulated by method of casting and electromagnetic and thermal fields are researched. 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, modeling methods, energy parameters.

*Lev S. Zimin (Dr. Sci. (Techn.)), Professor.
Aleksey G. Sorokin (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Nikolay I. Gorbachevsky (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.*

УДК 66.045

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ В СИСТЕМЕ ДВУХКОНТУРНОГО ВОДОСНАБЖЕНИЯ

С.В. Иваняков, Ю.И. Игнатенков, Д.В. Коноваленко

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

E-mail: mahp@inbox.ru

Рассмотрена работа систем водоснабжения с естественным охлаждением. Выявлены достоинства и недостатки одноконтурных и двухконтурных систем оборотного водоснабжения. Проведен анализ параметров работы пластинчатых теплообменников рассматриваемой системы, и на основании полученных результатов сделан вывод о значительном преобладании термического сопротивления со стороны открытого контура над сопротивлением закрытого, что позволило конкретизировать общие уравнения теплопереноса в пластинчатых теплообменниках и получить математическую модель скорости нарастания загрязнений в каналах открытого контура водоснабжения. Результаты моделирования показали достаточную точность, что позволило использовать полученную модель для оптимизации работы системы водоснабжения.

Ключевые слова: двухконтурная система водоснабжения, пластинчатый теплообменник, загрязнения.

В производствах, требующих большого количества воды для охлаждения, используют блоки с естественным охлаждением в градирнях, обладающих низкой себестоимостью охлаждения [1].

Обычно используются два вида систем с естественным охлаждением:

- одноконтурные, в которых охлаждение осуществляется водой, непосредственно проходящей через градирни;
- двухконтурные, в которых охлаждение осуществляется хладагентом закрытого цикла, охлажденным водой открытого цикла, проходящей через градирни.

Одноконтурные системы позволяют получить хладагент (воду) с температурой на 3–6 °С выше температуры по влажному термометру, но при этом из-за непосредственного контакта воды с воздухом в градирне вода загрязняется, а также происходит испарение в атмосферу продуктов, попавших в воду из технологических аппаратов.

Применение двухконтурных систем снижает загрязнение хладагента закрытого контура, но при этом температура охлаждения обеспечивается на уровне 2–3 °С выше температуры, которая может быть достигнута в системах открытого типа. Кроме этого, наличие двух контуров хладагентов приводит к увеличению

Сергей Викторович Иваняков (к.т.н.), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

Юрий Иосифович Игнатенков (к.т.н., доцент), доцент кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

Денис Владимирович Коноваленко, старший преподаватель кафедры «Машины и оборудование нефтегазовых и химических производств».

потребления электроэнергии на перекачку.

На рассматриваемом предприятии реализована двухконтурная система оборотного водоснабжения с передачей тепла в пяти пластинчатых теплообменниках общей площадью 7320 м².

Усредненные параметры работы теплообменников приведены в табл. 1.

Результаты замеров работы теплообменников показали, что гидравлическое сопротивление открытого водооборотного контура значительно выше, чем сопротивление закрытого. Это повышение давления вызвано образованием отложений (накипи) на стенках пластин.

Таблица 1

Усредненные параметры работы теплообменников

№ ТО	Водооборотный контур	Температура входа, °С	Температура выхода, °С	Расход, м ³ /ч	Перепад давления, кПа	Срок эксплуатации после очистки, месяцев
Март 2016 г.						
1	Открытый	–	–	–	–	на очистке
2		21,0	27,5	1962	132	2
3		21,0	28,0	1872	153	2
4		21,0	26,0	2520	142	1
5		21,0	26,0	1368	120	11
1	Закрытый	–	–	–	–	на очистке
2		35,0	24,0	1411	28	2
3		35,0	28,5	2304	138	2
4		35,0	22,5	1008	26	1
5		35,0	25,5	1153	48	11
Июнь 2016 г.						
1	Открытый	21,5	27,1	1892	181	3
2		21,4	27,5	1853	180	5
3		21,5	28,8	960	200	5
4		21,4	27,9	1456	178	4
5		21,4	25,4	2026	184	2
1	Закрытый	33,5	24,2	1053	38	3
2		33,6	24,9	1549	22	5
3		33,6	28,5	1621	30	5
4		33,5	24,7	1121	16	4
5		33,5	22,9	1007	8	2

Анализируя значения перепадов давления на теплообменниках по открытому и закрытому водооборотным контурам, можно сделать вывод, что толщина загрязнений в закрытом контуре значительно меньше толщины загрязнений в открытом (перепад давления в 5–8 раз меньше при соизмеримых расходах, см. табл. 1). Следовательно, можно предположить, что все термическое сопротивление процессу теплопередачи сосредоточено в загрязнениях открытого контура, а загрязнениями закрытого контура можно пренебречь.

Для определения скорости нарастания загрязнений в каналах открытого контура была использована математическая модель работы пластинчатых теплообменников, основанная на следующих уравнениях:

– критериальное уравнение теплоотдачи в каналах пластинчатых теплооб-

менников [2, 3, 4]:

$$Nu = A Re^n Pr^{0.43} \left(\frac{Pr}{Pr_{cn}} \right)^{0.25}, \quad (1)$$

где Nu – критерий Нуссельта;
 Re – критерий Рейнольдса;
 Pr – критерий Прандтля;
 Pr_{cn} – критерий Прандтля при температуре стенки;
 A, n – эмпирические коэффициенты;

– уравнение гидравлического сопротивления пластинчатого теплообменника, рассчитывается по выражению [2, 3, 5]

$$\Delta P = \left(\frac{B}{Re^{0.25}} + \sum \xi \right) \frac{w^2 \rho}{2}, \quad (2)$$

где $\sum \xi$ – сумма местных сопротивлений;
 w – скорость движения среды в канале, м/с;
 ρ – плотность среды, кг/м³;
 B – эмпирический коэффициент.

Таблица 2

Сравнение экспериментальных и расчетных параметров работы теплообменников

№ ТО	Цикл	Экспериментальные данные		Расчетные параметры	
		Температура выхода, °С	Перепад давления, кПа	Температура выхода, °С	Перепад давления, кПа
1	Открытый	27,1	181,8	26,9	181,5
2		27,5	180,0	27,7	178,5
3		28,8	200,0	29,3	208,0
4		28,0	178,3	28,7	174,0
5		25,4	183,8	25,0	183,1
1	Закрытый	24,2	38,2	23,8	9,0
2		24,9	22,0	25,1	19,5
3		28,5	29,5	28,7	20,5
4		24,8	15,5	25,1	10,1
5		22,9	8,4	22,9	8,3

Варьируемыми параметрами математической модели пластинчатых теплообменников являются эмпирические коэффициенты A, B, n . Обработка замеров работы пластинчатых теплообменников позволила определить значения варьируемых параметров: $A = 0,135$; $B = 15$; $n = 0,73$. В этом случае скорость нарастания загрязнений в каналах открытого контура может быть описана уравнением

$$\delta = \frac{0.065t}{26t + 73}, \quad (3)$$

где t – срок эксплуатации после очистки, месяцев.

Сравнение экспериментальных данных и расчетных параметров по полученной математической модели с учетом скорости нарастания загрязнений приведено в табл. 2.

Из результатов сравнения видно, что полученная математическая модель обладает достаточной точностью. Это позволило использовать ее при проведении работ по оптимизации технологических параметров системы двухконтурного водоснабжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пономаренко В.С., Арефьев Ю.И. Градирни промышленных и энергетических предприятий: Справ. пособие / Под общ. ред. В.С. Пономаренко. – М.: Энергоатомиздат, 1998. – 376 с.
2. Барановский Н.В., Коваленко Л.М., Ястребенецкий А.Р. Пластинчатые и спиральные теплообменники. – М.: Машиностроение, 1973. – 288 с.
3. Пластинчатые теплообменники. Каталог. – М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1974. – 61 с.
4. Павлов К.Ф., Романков П.Г., Носков А.А. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической технологии: Учеб. пособие для вузов / Под ред. П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – Л.: Химия, 1987. – 576 с.
5. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1992. – 672 с.

Статья поступила в редакцию 4 февраля 2017 г.

MODELING OF THE PLATE HEAT EXCHANGERS IN THE DOUBLE-CIRCUIT WATER-SUPPLY SYSTEM

S.V. Ivanyakov, Y.I. Ignatenkov, D.V. Konovalenko

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

This paper considers the water-supply systems with a natural cooling. The advantages and disadvantages of the single- and double-circuit water-supply systems are revealed. The analysis of the plate heat exchangers revealed that thermal pollutions in open circuit is much higher than pollutions a closed circuit. It allowed to set up heat transfer equations for the plate heat exchangers and a mathematical model of the heat pollutions increase in open circuit water-supply systems. An accuracy of a modeling allowed to use this model for water-supply system optimization.

Keywords: double-circuit water-supply system, plate heat exchangers, thermal pollutions.

*Sergey V. Ivanyakov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Yuri V. Ignatenkov (Ph.D. (Techn.)), Associate Professor.
Denis S. Konovalenko, Senior Teacher.*

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

Представленная в журнал работа **должна обязательно содержать новые научные результаты**, нигде ранее не публиковавшиеся и не представленные к публикации в других изданиях.

В журнале предполагается публикация статей объемом до 10 страниц (включая рисунки и таблицы), а также кратких сообщений по соответствующим разделам (объем 3-4 стр. вместе с рисунками и таблицами).

В приоритетном порядке будут рассматриваться материалы докторских и кандидатских диссертаций. Аспирантские работы рекомендуется представлять в форме кратких сообщений.

Требования к оформлению статей находятся на сайте университета

<http://vestnik-teh.samgtu.ru>

К статье прилагаются:

- экспертное заключение;
- авторская справка;
- лицензионный договор передачи авторского права на публикацию;
- направление от организации (если авторы не работают в СамГТУ).

Статьи, не удовлетворяющие указанным правилам оформления, будут возвращены авторам без рассмотрения.

Статьи и краткие сообщения передаются ответственному секретарю серии «Технические науки» И.Г. Минаковой (443100, г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244. СамГТУ. Корп. 8, комн. 519).

Справки по телефонам:

337 07 00 – Эдгар Яковлевич Рапопорт

337 03 42 – Ирина Григорьевна Минакова

E-mail: vest_teh@samgtu.ru

Редколлегия журнала