

УДК 621.78

А.И. ДАНИЛУШКИН

доктор технических наук, профессор кафедры электроснабжения промышленных предприятий
Самарский государственный технический университет

В.А. ДАНИЛУШКИН

кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры электроснабжения промышленных предприятий
Самарский государственный технический университет

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИНДУКЦИОННОГО
НАГРЕВА ЦИЛИНДРА ЭКСТРУДЕРА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ
ПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНЫХ ПЛИТ**

MODELLING OF INDUCTION HEATING OF EXTRUDER BARREL DURING MANUFACTURING EXPANDED
POLYSTYRENE SLABS

Рассматриваются математические модели процесса косвенного индукционного нагрева гранулированного полистирола в экструдере при производстве пенополистирольных плит. Предложенные модели используются для проектирования конструкции энергоэффективных индукционных нагревателей в экструзионной линии по изготовлению пенополистирольных плит.

Ключевые слова: индукционный нагрев, математическая модель, проектирование конструкции, экструзионная линия, энергоэффективность.

В работе рассматривается процесс индукционного нагрева исходного гранулированного сырья при производстве пенополистирольных плит методом экструзии. Для получения качественных изделий материал необходимо полностью пластифицировать до поступления в зону выдавливания. Для эффективного повышения качества экструдата при высокой производительности экструдер должен обеспечивать заданные температурные градиенты и изменение текучести материала по длине червяка и глубине винтового канала, а также химическую однородность материала. Наиболее интенсивной и экономичной является система обогрева индукционными нагревателями. Индукционные нагреватели имеют большой срок службы, высокую удельную мощность нагрева и высокое быстродействие. Для создания градиентного нагрева по длине экструдера цилиндр экструдера разделен на несколько автономных зон, каждая из которых подключена к системам нагрева и охлаждения.

Математическое описание процесса теплопереноса в экструдере может быть получено совместным решением уравнений, которые выражают законы сохранения массы, энергии и количества движения, с уравнениями, описывающими физическое состояние нагреваемой жидкости (расплава).

Нагрев исходного материала при перемещении его через зоны экструдера со скоростью можно V представить как систему, состоящую из трех фи-

The mathematical models of the process of indirect induction heating of granulated polystyrene in extruder during manufacturing of expanded polystyrene slabs are viewed. The proposed models are used to design energy-efficient construction of induction heaters in extrusion-type line for the production of expanded polystyrene slabs.

Key words: induction heating, mathematical model, design, construction, extrusion-type line, energy efficiency.

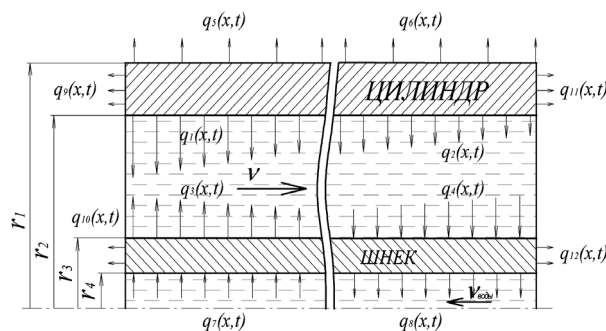


Рис. 1. Схема теплообмена

зически неоднородных цилиндрических тел с непрерывным перемещением нагреваемого материала вдоль экструдера. Материал нагревается за счет тепла, выделяемого в цилиндре экструдера при протекании по нему вихревых токов, индуцированных электромагнитным полем индуктора.

На рис. 1 показана схема тепловых потоков в экструдере, имеющем четыре автономных зоны нагрева.

Здесь $q_1(x,t)$, $q_2(x,t)$ - тепловой поток от цилиндра в полистирол; $q_3(x,t)$, $q_4(x,t)$ - тепловой поток, характеризующий теплообмен между шнеком и полистиролом; $q_5(x,t)$, $q_6(x,t)$ - тепловой поток с поверхности цилиндра; $q_7(x,t)$, $q_8(x,t)$ - тепловой поток между стенкой шнека и потоком воды; $q_9(x,t) \div q_{12}(x,t)$ - тепловой поток с торцов цилиндра.

Шнек экструдера выполнен полым, со стороны зоны выдавливания в полость шнека под давлением поступает вода с начальной температурой 60 °С. Нагрев сопровождается сложными взаимосвязанными процессами теплообмена между элементами экструдера и полистирола. Тепло, выделяемое в цилиндре экструдера под действием вихревых токов, через поверхность контакта передается в полистирол. Кроме этого основного источника тепла, полистирол нагревается за счет тепла, выделяющегося в процессе перемещения массы полистирола.

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

$$\operatorname{rot}\{\vec{H}\} = \gamma_n \vec{E}; \quad \operatorname{rot}\{\vec{E}\} = -\left\{\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\right\}; \quad \operatorname{div}\{\vec{B}\} = 0; \quad \operatorname{div}\{\vec{E}\} = 0; \quad (1)$$

$$c_1(T_1)\gamma_1(T_1)\frac{\partial T_1}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_1(T_1)\operatorname{grad}T_1) - \operatorname{div}[EH]; \quad (2)$$

$$c_n(T_n)\gamma_n(T_n)\frac{\partial T_n}{\partial t} = \operatorname{div}(\lambda_n(T_n)\operatorname{grad}T_n) - c_n(T_n)\gamma_n(T_n)V_n\operatorname{grad}T_n. \quad (3)$$

Здесь $\{\vec{H}\}, \{\vec{E}\}, \{\vec{B}\}$ – векторы напряженности магнитного и электрического полей и магнитной индукции; γ_n – удельная электропроводимость, T_1, T_n – температурные поля цилиндра экструдера, полистирола и шнека; $n = [1, 2, 3, 4]$ – порядковый номер зоны экструдера по ходу полистирола; t – время; $\Pi = -\operatorname{div}[EH]$ – объемная плотность внутренних источников тепла, индуцируемых в цилиндре; V_n – вектор скорости перемещения полистирола в соответствующей зоне экструдера;

C_1, γ_1 – удельные значения теплоемкости и плотности материала цилиндра; C_n, γ_n – удельные значения теплоемкости и плотности полистирола в соответствующей зоне экструдера; λ_1, λ_n – коэффициенты теплопроводности материалов цилиндра и полистирола.

Решение системы (1) – (4) относительно температурных полей T_1 и T_n , описывающих тепловое состояние объекта, в рассматриваемой физически неоднородной системе тел выполнено численным методом, причем, принимается ряд допущений, не искажающих физической сущности явления, но позволяющих получить решение с допустимой погрешностью:

- ввиду малой инерционности электромагнитных процессов по сравнению с тепловыми можно при изучении нестационарных тепло-

вых процессов пренебречь влиянием переходных режимов электромагнитного поля;

- в типовых ситуациях, характеризующихся большой величиной отношения длины нагревателя к диаметру нагреваемого цилиндра, влиянием краевых эффектов можно пренебречь. Электромагнитное поле индуктора можно считать осесимметричным и коаксиальным;

Используя предложенную модель, было проведено исследование температурных полей в стенке трубы и в потоке жидкости для стационарного режима с учетом зависимости параметров жидкости от температуры.

Анализ результатов численного моделирования позволяет сделать вывод о том, что в рассматриваемом диапазоне температур условия теплообмена по длине нагревателя различны. Температура стенки цилиндра достигает предельно допустимого значения в конце первой зоны, мощность индуктора первой зоны максимальна и нагрев происходит при постоянстве теплового потока. В последующих зонах температура стенки цилиндра практически остается постоянной и процесс нагрева можно рассматривать как нагрев при граничных условиях первого рода. Исследования, проведенные в работе, показали, что длина первой зоны в условиях действующих энергетических ограничений на мощность нагрева составляет (25...30) % от всей длины нагревателя. С учетом сказанного математическая модель процесса непрерывного индукционного нагрева принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial t} &= a_1 \left[\frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_1(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_1(r, x, t)}{\partial x^2} \right] + w(r, x, t); \\ &r \in [r_2, r_1]; \quad x \in [0, L]; \\ \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial t} &= a_2 \left[\frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_2(r, x, t)}{\partial x^2} \right] - V(x) \frac{\partial T_2(r, x, t)}{\partial x}; \\ &r \in [r_3, r_2]; \quad x \in [0, L]; \\ \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial t} &= a_3 \left[\frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T_3(r, x, t)}{\partial r} + \frac{\partial^2 T_3(r, x, t)}{\partial x^2} \right]; \\ &r \in [r_4, r_3]; \quad x \in [0, L]; \\ \frac{\partial T_4(x, t)}{\partial t} &= a_4 \left[\frac{\partial^2 T_4(x, t)}{\partial x^2} - V_1 \frac{\partial T_4(x, t)}{\partial x} \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $T_1(r, x, t), T_2(r, x, t), T_3(r, x, t), T_4(x, t)$ – температура соответственно корпуса экструдера, полистирола, шнека и протекающей через тело шнека воды; r, x, t – радиальная и аксиальная координаты и время процесса; $w(r, x, t)$ – функция распределения мощности внутренних источников тепла, определяемая из решения электромагнитной задачи; $V(x)$ – скорость перемеще-

ния нагреваемого материала через экструдер; V_1 – скорость течения воды; a_1, a_2, a_3, a_4 ,

– коэффициенты температуропроводности соответственно корпуса экструдера, полистирола, шнека и протекающей через тело шнека воды; L – длина нагревателя; r_1 – наружный радиус цилиндра экструдера, r_2 – наружный радиус шнека; r_3 – внутренний радиус шнека; r_4 – внутренний радиус канала охлаждения шнека (рис. 1).

Здесь $W(r, x, t)$ – функция распределения внутренних источников тепла.

В общем случае функция $W(r, x, t)$ распределения внутренних источников тепла нелинейно зависит от температуры. Однако, как показано в работе [3], действительный характер зависимости $W(T)$ от температуры можно с небольшой погрешностью заменить зависимостью от пространственных координат. В этом случае функция $W(r, x, t)$ распределения внутренних источников тепла может быть представлена в виде

$$W(r, x, t) = U(r) \cdot F(x) \cdot P(t). \quad (5)$$

Здесь $U(r)$ – нелинейная функция распределения внутренних источников по радиальной координате r ; $F(x)$ – функция распределения внутренних источников тепла по длине x нагревателя; $P(t)$ – мощность источников тепла.

При низкотемпературном нагреве ферромагнитных сталей функция распределения мощности $U(r)$ внутренних источников тепловыделения по радиальной координате может быть представлена в виде [1]:

$$U(r) = \int_0^{\xi} \frac{12(l - \zeta)^2}{(3 + l)(1 - \zeta)^3} dl, \quad (6)$$

где $\zeta = \frac{R\sqrt{2}}{\Delta}$ – относительная глубина проникнове-

ния тока; $l = \frac{r}{R}$ – относительный радиус внешнего тепловыделяющего цилиндра. В пределах каждой зоны электро- и теплофизические характеристики материала тепловыделяющего цилиндра (стали) можно считать постоянными, поэтому составляющая $F(x)$ функции распределения источников есть величина постоянная в пределах каждой зоны, т.е. $F(x) = const, \forall x \in [x_{i-1}, x_i]$.

В двумерной осесимметричной постановке электромагнитная задача может быть сформулирована в виде [4]:

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial^2} + \frac{1}{l} \cdot \frac{\partial A}{\partial} + \frac{\partial^2 A}{\partial^2} - \frac{A}{l^2} \right) = \sigma + j\omega\sigma A, \quad (7)$$

где A – векторный потенциал; μ – магнитная проницаемость; l, V – радиальная и осевая координаты соответственно; σ – электрическая проводимость; ω – частота.

Используя численные методы решения (7) для электромагнитной задачи с соответствующими краевыми условиями, получены конкретные зависимости для функции распределения внутренних электромагнитных источников по объему тепловыделяющего цилиндра. На рис. 2 представлен график распределения удельной объемной мощности по длине цилиндра.

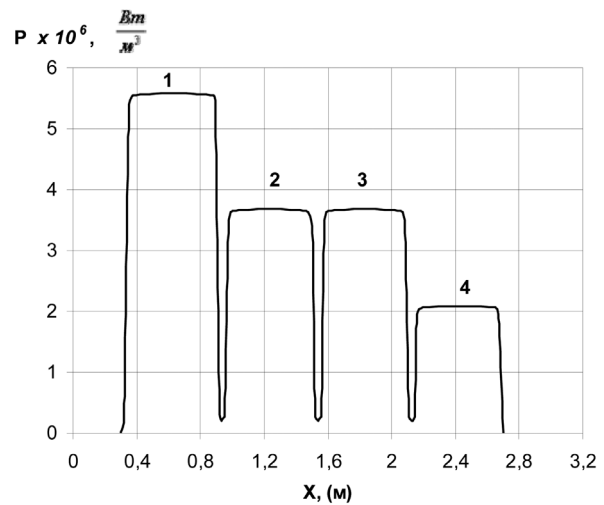


Рис. 2. Распределение удельной объемной мощности цилиндра по длине секций 1 – 4

Из графиков видно, что на первом участке экструдера (под первым индуктором) выделяется максимальная мощность, это связано с тем, что на данном участке необходимо нагреть полистирол от начальной температуры до температуры плавления, а на остальных зонах происходит подогрев и поддержание заданной температуры. Далее, зная функцию распределения внутренних источников тепла по длине цилиндра экструдера и принимая обычные допущения относительно теплофизических констант c, γ, λ , переходим к определению температурного поля в физически неоднородной системе тел, используя систему линейных неоднородных уравнений (4).

В качестве инструментального средства для моделирования тепловых полей в сложной системе сопряженных тел выбран пакет моделирования полей различной природы FemLab. Для решения задачи теплопереноса в указанной постановке разработан вычислительный алгоритм расчета температурных полей в системе «индуктор – цилиндр – полистирол – шнек», который позволяет рассчитать температурные распределения в полистироле на любом участке при нагреве источниками тепла, выделяющимися в цилиндре экструдера под действием вихревых токов. Схема теплообмена в рассматриваемой взаимосвязанной структуре тел представлена на рис. 1.

На рис. 3 приведены результаты расчета температурных распределений в слое полистирола по радиальной координате по зонам нагрева.

На первом участке экструдера происходит загрузка полистирола, внутренние источники тепла отсутствуют, поэтому нагрев определяется только температурой шнека, которая поддерживается постоянной на входе, на уровне 60 °С. Ввиду низкой теплопроводности гранулированного полистирола в первой зоне нагревается только поверхностный слой полистирола и слой, прилегающий к поверхности шнека. По мере продвижения нагреваемого материала происходит нагрев слоя полистирола с двух сторон: от шнека и цилиндра экструдера.

Средние слои прогреваются медленно вследствие низкой теплопроводности полистирола, поэтому на втором участке имеет место значительный градиент температуры от стенок цилиндра и шнека к центру потока.

По мере продвижения полистирола к выходу температурный перепад уменьшается. Так как шнек по длине экструдера имеет переменный диаметр, увеличивающийся в районе второй зоны индукционного нагрева, толщина нагреваемого слоя полистирола уменьшается. В третьей и четвертой зонах происходит выравнивание температуры по сечению потока. В конце четвертой зоны температура полистирола по толщине слоя достигает требуемого для выдавливания из калибратора и формирования пенополистирольных плит значения. Как показывают расчеты, вследствие низкой теплопроводности полистирола при ламинарном течении его нагрев характеризуется большим перепадом температур по сечению потока, что приводит к необходимости поиска оптимальной длины отдельных зон и оптимального распределения мощности по зонам нагревателя математической модели.

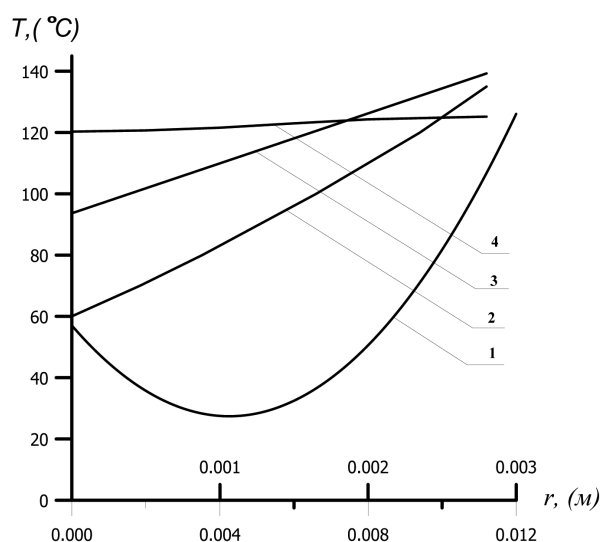


Рис. 3. Температурное распределение в полистироле по сечению на выходе соответствующей секции: 1, 2, 3, 4 – кривые температурных распределений по сечению в соответствующих секциях

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Вайнберг, А.М. Индукционные плавильные печи. [Текст] / А.М. Вайнберг. – М.: Энергия, 1967. – 415с.
2. Лыков, А.В. Теплообмен: (справочник) [Текст] / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
3. Рапопорт, Э.Я. Оптимизация процессов индукционного нагрева металла [Текст] / Э.Я. Рапопорт. – М.: Металлургия, 1993. – 279 с.
4. Немков, В.С. Теория и расчет устройств индукционного нагрева [Текст] / В.С. Немков, В.Б. Демидович. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1988. – 280 с.

© Данилушкин А.И., Данилушкин В.А., 2011