

УДК 674.093.26

*Г.А. Шепель, В.Ф. Надеин, Н.С. Кабеева*

Шепель Георгий Александрович родился в 1935 г., окончил в 1958 г. Ленинградское высшее инженерное морское училище, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электротехники и энергетических систем Архангельского государственного технического университета, член-корреспондент Академии электротехнических наук Российской Федерации. Имеет более 110 печатных работ в области электротехнологии и электрификации.



Кабеева Надежда Сергеевна родилась в 1980 г., окончила в 2002 г. Архангельский государственный технический университет, аспирант кафедры электротехники и энергетических систем АГТУ. Имеет 6 печатных работ в области индукционного нагрева.



## **ТЕРМОСТАБИЛИЗАЦИЯ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ НА ВХОДЕ В КАЛОРИФЕР ЛЕСОСУШИЛЬНЫХ УСТАНОВОК**

Предложен способ регулирования температуры теплоносителя на входе в калорифер лесосушильной камеры на основе индукционного нагрева; рассмотрена методика расчета параметров процесса нагрева теплоносителя в индукционном нагревающем устройстве.

*Ключевые слова:* индукционное нагревающее устройство, стабилизатор температуры теплоносителя, коэффициент теплоотдачи, коэффициент теплопроводности.

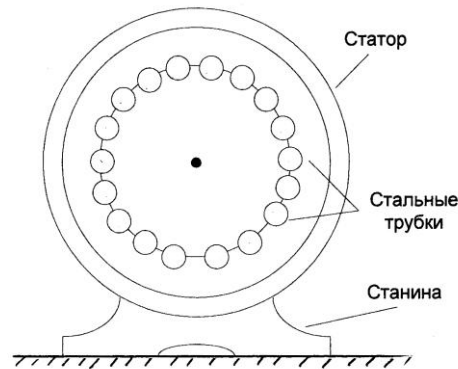
Для обеспечения качественной сушки древесины необходимо в соответствии с заданным режимом точно поддерживать параметры агента сушки (влажный воздух, топочные газы, перегретый пар) [1].

Таковыми параметрами являются: температура, влажность, скорость движения агента сушки (АС) через штабель.

Температура и влажность зависят от степени нагрева АС в калориферах лесосушильной камеры (ЛСК) и особенностей процессов теплообмена между АС (воздух, пар) и подвергаемой сушке древесиной, а скорость движения АС определяется производительностью вентиляторов.

Теплоносителем в калориферах ЛСК чаще всего выступает вода или водяной пар, от температуры которых напрямую зависит температура АС. Следовательно, для стабилизации температуры АС необходимо поддерживать строго определенную температуру теплоносителя на входе в калорифер ЛСК.

Практика показывает, что вода, предварительно нагретая в котельной, имеет разброс температур 15 °С, что недопустимо. Для поддержания требуемого технологического режима сушки необходим стабилизатор температуры воды на входе в калорифер, в качестве которого предложено использовать трехфазное индукционное нагревающее устройство (ИНУ) [2].



Принципиальная схема ИНУ

ИНУ представляет собой неподвижный статор, создающий вращающееся магнитное поле. В полости статора помещены 18 стальных трубок (см. рисунок). Они соединены между собой последовательно, и вода, нагреваемая в ИНУ, проходит их все. С позиций электротехники трубки представляют собой короткозамкнутый заторможенный ротор.

Принцип действия ИНУ состоит в следующем: при подаче напряжения на индуктор в обмотках статора возникает электрический ток, который создает вращающееся магнитное поле. Линии магнитного поля пересекают трубки в полости статора. Согласно закону электромагнитной индукции такое магнитное поле влечет за собой возникновение наведенных вихревых токов, которые нагревают трубки по закону Джоуля–Ленца.

Преимущества индукционного нагрева:

гибкость и высокая точность управления из-за малой инерционности процесса;

возможность точного дозирования энергии и наличие нескольких каналов управления;

возможность регулирования пространственного расположения зоны протекания вихревых токов: глубина зоны их циркуляции и, следовательно, зоны выделения энергии зависит от частоты тока индуктора (увеличивается при низких частотах и уменьшается при высоких);

обеспечение высокой производительности и хороших санитарно-гигиенических условий труда.

Основная задача ИНУ – поддержание неизменной температуры воды на выходе при колебаниях температуры на входе. Температура на выходе определяется следующими условиями: температурой воды на входе в ИНУ и на внутренней поверхности стенок трубок; скоростью движения воды по трубкам.

Для поддержания требуемой температуры на выходе можно варьировать скорость течения воды и температуру внутренней поверхности стенок. Поскольку первый показатель зависит от производительности насоса, а не от параметров ИНУ, то его влияние рассматривать не будем. Остановимся на температуре внутренней поверхности стенок трубок. Чтобы ее рассчитать, воспользуемся законом Ньютона–Рихмана [4]:

$$q = \alpha(t_{\text{ст}} - t_{\text{ж}}), \quad (1)$$

где  $q$  – плотность теплового потока от трубки к воде, Вт/м<sup>2</sup>;  
 $\alpha$  – коэффициент теплоотдачи, Вт/(м<sup>2</sup>·К);  
 $t_{ст}$  – температура внутренней поверхности стальной трубки, °С;  
 $t_{ж}$  – температура воды, °С.

Отсюда

$$t_{ст} = \frac{q}{\alpha} + t_{ж}.$$

В этой формуле неизвестна плотность теплового потока  $q$  и величина коэффициента теплоотдачи  $\alpha$ .

Плотность теплового потока  $q$  в формуле (1) определим следующим образом:

$$q = \frac{Q}{S}. \quad (2)$$

Здесь  $Q$  – тепловой поток, Вт;

$S$  – площадь, м<sup>2</sup>, внутренней поверхности стальных трубок,

$$S = n\pi d_{вн} l;$$

$n$  – количество трубок,  $n = 18$ ;

$d_{вн}$  – внутренний диаметр трубок, м;

$l$  – длина трубок, м.

Коэффициент  $\alpha$  в формуле (1) можно найти по критерию Нуссельта:

$$Nu = \frac{\alpha d_{вн}}{\lambda_{ж}}, \quad (3)$$

где  $\lambda_{ж}$  – коэффициент теплопроводности воды (определяют по таблицам), Вт/(м·К).

Тогда

$$\alpha = \frac{Nu \lambda_{ж}}{d_{вн}}.$$

Критерий Нуссельта характеризует интенсивность теплообмена при теплоотдаче. Его величину определяем по критерию Рейнольдса, исходя из характеристики течения:

$$Re = \frac{v d_{вн}}{\nu}, \quad (4)$$

где  $v$  – скорость течения жидкости, м/с;

$\nu$  – вязкость жидкости, м<sup>2</sup>/с.

В формуле (4) неизвестна скорость течения теплоносителя по трубкам. Для ее определения используем выражение для теплового баланса ИНУ:

$$G = \frac{Q}{C(t_{н} - t_{к})}, \quad (5)$$

где  $G$  – расход теплоносителя, кг/с;

$C$  – теплоемкость воды, Дж/(К·кг);

$t_{н}$ ,  $t_{к}$  – температура воды, соответственно до и после ИНУ, К.

Тогда скорость теплоносителя

$$v = \frac{G}{\rho F} = \frac{4G}{\rho \pi d_{вн}^2}. \quad (6)$$

Здесь  $\rho$  – плотность воды (определяется по таблицам),  $\text{кг/м}^3$ ;  
 $F$  – площадь поперечного сечения трубки,  $\text{м}^2$ .

Критерий Нуссельта для ламинарного течения рассчитываем по формуле

$$\text{Nu} = 0,33 \text{Re}^{0,5} \text{Pr}_{\text{ж}}^{0,43} \left( \frac{\text{Pr}_{\text{ж}}}{\text{Pr}_{\text{ст}}} \right)^{0,25} \left( \frac{x}{d} \right)^{0,1}, \quad (7)$$

где  $\text{Pr}_{\text{ж}}$  – число Прандтля для жидкости;

$\text{Pr}_{\text{ст}}$  – число Прандтля для стенки трубки;

$x$  – расстояние от начала трубки до рассматриваемого сечения.

В формуле (5) величина  $Q$ , представляющая собой тепловой поток от трубки к теплоносителю, равна полезной (активной) мощности индуктора, т. е.  $Q = P_2$ .

Энергия, вводимая в нагреваемое тело, определяется через мощность, выделяющуюся в стальной трубке на 1 м ее длины. Для активной мощности

$$P_2 = 6,2 \cdot 10^{-6} (IW)^2 d_0 \sqrt{\rho \mu f} F_{\text{оц}}, \quad (8)$$

где  $I$  – электрический ток;

$W$  – число витков;

$d_0$  – диаметр трубки, м;

$\rho$  – удельное сопротивление нагреваемого материала (сталь);

$\mu$  – магнитная проницаемость стали;

$f$  – частота поля;

$F_{\text{оц}}$  – сложный комплекс, образованный из функции Бесселя (определяется по таблицам и графикам) [3].

Таким образом, из формулы (8) видно, что энергия, вводимая в тело, пропорциональна следующим величинам: току индуктора, т. е. и приложенному напряжению; частоте магнитного поля, т. е. и частоте тока, его создающего.

Из вышеизложенного можно сделать вывод, что температуру нагреваемой в ИНУ жидкости можно регулировать за счет изменения величины и частоты напряжения, подаваемого на индуктор.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богданов, Е.С. Сушка пиломатериалов [Текст] / Е.С. Богданов. – М.: Лесн. пром-сть, 1988.
2. Болотов, А.В. Электротехнологические установки [Текст]: учеб. для вузов / А.В. Болотов, Г.А. Шепель. – М.: Высш. шк., 1988.
3. Кувалдин, А.Б. Индукционный нагрев ферромагнитной стали [Текст] / А.Б. Кувалдин. – М.: Энергоатомиздат, 1988.
4. Ляшков, В.И. Теоретические основы теплотехники [Текст]: учеб. пособие / В.И. Ляшков. – М.: Машиностроение, 2002.

Архангельский государственный  
 технический университет

G.A. Shepel, V.F. Nadein, N.S. Kabeeva

#### Thermal Stabilization of Heat-carrier at Air Heater Entry of Timber Drying Plant

The temperature control method is offered for heat-carrier at the air heater entry of timber drying plant based on induction heating. The technique for calculating the process parameters for heat-carrier heating in the heat induction unit is considered.