

всей тепловой схемы турбоустановок с произвольным структурным решением.

1. Каталог 18-2-76. Теплообменное оборудование. – М.: НИИЭнформэнергомаш, 1977. – 203 с.
2. Марушкин В.М., Ивашенко С.С., Вакуленко Б.Ф. Подогреватели высокого давления турбоустановок ТЭС и АЭС. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 136 с.
3. РТМ 108.271.23-84. Расчет и проектирование поверхностных подогревателей высокого и низкого давления. – М.: МЭМ, 1984. – 216 с
4. Исаченко В.Н., Осипова В.А., Сукомел А.С. Теплопередача. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
5. Кутателадзе С.С., Боришанский В.М. Справочник по теплопередаче. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 414 с.
6. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
7. Ганжа А.Н. Пароводяные теплообменники энергоустановок ТЭС и АЭС. – Харьков: НТУ "ХПИ", 2002. – 169 с.
8. Берж К. Теория графов и ее применение. – М.: ИЛ, 1962. – 319 с.
9. Методы и алгоритмы расчета тепловых сетей / В.Н.Хасилев, А.П.Меренков, Б.М.Качанович и др. – М.: Энергия, 1978. – 175 с.

Получено 17.02.2004

УДК 535.24, 66.021.3

А.Ф.СТРОЙ, д-р техн. наук, Е.Б.ЧУМУРИНА

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

СОПРЯЖЕННЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН ПРИ СУШКЕ МАТЕРИАЛОВ

Получена математическая модель сопряженного тепломассообмена при сушке материалов.

Основной проблемой при сушке материалов является снижение энергозатрат и уменьшение длительности процесса сушки. Решение этой проблемы возможно только при достаточно глубоком изучении процессов тепло- и влагопереноса в материале и изменении тепло-влажностных характеристик агента сушки.

Анализ исследований, включая работы [1-3] в этой области, свидетельствует о том, что тепло- и влагоперенос в материале рассматривают без учета изменений в процессе сушки тепловлажностных характеристик агента сушки. Существуют практические рекомендации [4-6] для выбора параметров агента сушки. Однако без достаточно глубокого изучения влияния этих параметров на процесс тепло- и влагопереноса в материале, трудно судить о том, насколько эти рекомендации соответствуют оптимальным энергетическим затратам. Изучить влияние параметров агента сушки на процесс тепло- и влагопереноса и оп-

тимизировать его с позиции энергетических затрат можно на основании математической модели процесса. Разработка и решение такой модели позволит количественно оценить степень влияния параметров агента сушки (температуры, расхода и влагосодержания) на процесс тепло- и влагопереноса в материале.

Цель данной работы состоит в том, чтобы получить математическую модель, которая будет описывать наряду с изменением тепло-влажностного состояния материала и изменение параметров сушильного агента. В дальнейшем эта математическая модель даст возможность количественно оценить влияние параметров агента сушки на сам процесс. С целью получения такой модели рассмотрим изменение тепло-влажностного состояния материала для плоской панели. В начальный момент времени плоская панель (стенка) имеет начальную температуру t_n и влажность, характеризующуюся парциальным давлением p_n . Затем панель внесли в помещение, температура воздуха в котором выше, чем начальная температура панели, а парциальное давление водяных паров в воздухе помещения ниже, чем парциальное давление водяных паров в панели. Начался процесс нагрева панели и ее сушка. В первом приближении нагрев панели можно рассматривать как процесс осесимметричного нагревания плоской стенки. Математическая модель, описывающая этот процесс имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = a \frac{\partial^2 t}{\partial x^2}. \quad (1)$$

Процесс влагопереноса описывается уравнением влагопроводности:

$$\frac{\partial p}{\partial z} = a_m \frac{\partial^2 p}{\partial x^2}. \quad (2)$$

В уравнениях (1), (2): t – температура, °С; $t = f(x, z)$; x – координата, м; z – время, ч; a – коэффициент температуропроводности, м²/ч; $a = \frac{\lambda}{c\rho}$; λ – коэффициент теплопроводности материала, Вт/(м °С); c – теплоемкость материала, кДж/(кг °С); ρ – плотность материала, кг/м³; p – парциальное давление, Па; $p = f(x, z)$; a_m – коэффициент диффузии, м²/ч; $a_m = \frac{\beta}{10\rho}$; β – коэффициент влагопроводности материала, г/(м·ч); 10 – количество влаги, необходимое для уменьшения влажности 1 кг материала на 1%, г.

При этом должны быть заданы начальные условия, которые характеризуют состояние материала в начальный момент времени и граничные условия. Для уравнений (1), (2) граничные условия как правило принимаются в виде граничных условий третьего рода с постоянной температурой и заданным влагосодержанием воздуха (агента сушки). В такой постановке предполагается, что расход агента сушки бесконечно большой. Как правило, сушка происходит при конечном расходе сушильного агента, и величина этого расхода существенно влияет на процесс сушки.

Рассмотрим процесс сушки плоской стенки при конечном расходе сушильного агента (см. рисунок). В этом случае параметры агента сушки изменяются. С учетом изменения параметров агента сушки постановка задачи существенно усложняется. Агент сушки будет нагревать панель. Воздух вблизи панели будет охлаждаться. Движение его будет сверху вниз (см. рисунок).

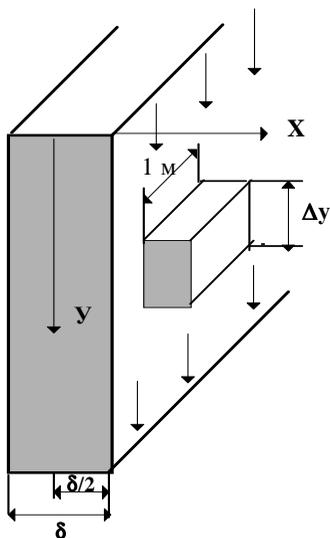


Схема процесса сушки плоской стенки

Нагрев панели уже не будет осесимметричным, так как температура агента сушки при движении его вдоль панели изменяется. Вместо одномерной задачи в этом случае необходимо рассматривать двухмерную задачу, усложненную сопряженным тепло- и влагообменом со стороны агента сушки. При расположении осей координат так, как

указано на рисунке, система уравнений, которая будет описывать процесс тепло- и влагопереноса в панели, имеет вид:

$$\frac{\partial t}{\partial z} = \frac{\lambda}{c\rho} \left(\frac{\partial^2 t}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 t}{\partial y^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = \frac{\beta}{10\rho} \left(\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial y^2} \right). \quad (4)$$

В этом случае температура панели и влажность зависят уже от двух координат и времени, т.е. $t = f(x, y, z)$ и $p = f(x, y, z)$. Для вывода дифференциального уравнения, описывающего изменение параметров агента сушки, рассмотрим более подробно граничные условия тепло- и влагообмена у поверхности пластины. Выделим элементарный слой агента сушки длиной dy и шириной 1 м (см. рисунок). Количество теплоты, которое отдает этот элементарный слой воздуха панели, прямо пропорционально степени охлаждения этого слоя, т.е. уравнение теплового баланса имеет вид:

$$c \cdot G \cdot \Delta t_{a2} = \alpha \cdot F (t_{a2} - t_{/x=\frac{\delta}{2}}) + Q_{uc}, \quad (5)$$

где c – теплоемкость воздуха, кДж/(кг °С); G – массовый расход воздуха, кг/с; Δt – разность температур на входе в элементарный слой dy и на выходе из этого слоя, °С; α – коэффициент теплообмена у поверхности панели, Вт/(м² °С); F – площадь элементарного слоя, которая соприкасается с поверхностью панели, $F = l \cdot \Delta y$, м²; t_{a2} – средняя температура агента сушки в элементарном слое, °С, $t_{a2} = f(y, z)$; $t_{/x=\frac{\delta}{2}}$ – температура поверхности панели, °С,

$t_{/x=\frac{\delta}{2}} = f(y, z)$; Q_{uc} – количество теплоты, которое расходуется на

испарение влаги с поверхности, кДж, $Q_{uc} = rW$; r – скрытая теплота парообразования, кДж/кг; W – количество испарившейся влаги с поверхности, кг.

Уравнение (5) можно записать также в виде

$$\frac{c \cdot G \cdot \Delta t_{a2} - Q_{uc}}{\alpha \cdot F} = (t_{a2} - t_{/x=\frac{\delta}{2}})$$

или

$$\frac{c \cdot G}{\alpha} \cdot \frac{\Delta t_{a2}}{\Delta y} - \frac{Q_{ис}}{\alpha \cdot F} = (t_{a2} - t_{/x=\frac{\delta}{2}}). \quad (6)$$

Переходя к бесконечно малым величинам, уравнение (6) можно представить в виде:

$$\frac{c \cdot G}{\alpha} \cdot \frac{dt_{a2}}{dy} - \frac{Q_{ис}}{\alpha \cdot F} = t_{a2} - t_{/x=\frac{\delta}{2}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) является дифференциальным уравнением с двумя неизвестными функциями $t_{a2} = f(y, z)$ и $t_{/x=\frac{\delta}{2}} = f(y, z)$. Это

уравнение с одной стороны характеризует изменение температуры агента сушки в зависимости от координаты y^* и времени z , а с другой – является уравнением, описывающим граничные условия теплообмена у поверхности панели, при условии если известно количество влаги, которое испаряется с поверхности. Это количество влаги можно определить на основании уравнений, характеризующих влагообмен между стенкой и агентом сушки (воздухом). Дифференциальные уравнения, характеризующие изменение влагосодержания воздуха при движении его вдоль панели можно получить аналогично уравнению (7). Это уравнение будет иметь вид:

$$\frac{c \cdot G}{\beta} \cdot \frac{\Delta p_{a2}}{\Delta y} = p_{/x=\frac{\delta}{2}} - p_{a2}. \quad (8)$$

Система, состоящая из уравнений (3), (4), (7) и (8), при соответствующих начальных условиях представляет собой математическую модель сопряженного теплообмена при сушке плоской панели. Незвестными функциями в данной системе уравнений являются:

- температура материала $t = f(x, y, z)$;
- температура агента сушки $t_{a2} = f(y, z)$;
- влажность материала $p = f(x, y, z)$;
- влагосодержание агента сушки $p_{a2} = f(y, z)$.

В результате решения данной системы дифференциальных уравнений можно получить искомые функции. Эти функции в дальнейшем позволят оценить степень влияния параметров на процесс.

Таким образом, на основании анализа физических процессов сопряженного тепло- и влагообмена получена система уравнений, кото-

рая описывает процесс изменения тепловлажностного состояния материала совместно с изменением физических параметров агента сушки, т.е. получена математическая модель сопряженного теплообмена при сушке материала.

1.Львов А.В., Тепло- и массообмен в процессах сушки. – М: Госэнергоиздат, 1956. – 315 с.

2. Лукьянов В.И. Нестационарный массоперенос в строительных материалах при решении проблем повышения защитных качеств ограждающих конструкций зданий с влажным и мокрым режимом: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук – М, 1991.– 41 с.

3.Львов М.В. Сушка в химической промышленности. – М.: Химия, 1970. – 432 с.

4. Сушка пищевых растительных материалов / Под ред. Г.К.Филоненко. – М.: Пищевая промышленность, 1971. – 439 с.

5.Зерносушение и зерносушилки / Под ред. В.И.Жидко. – М.: Колос, 1982. – 240 с.

6.Рекомендации по определению фазового состава влаги в порах строительных материалов. – М.: НИИСф, 1985. – 124 с.

Получено 17.02.2004

УДК 621.311-555.6

С.В.ПОДЛЕСНАЯ

Восточноукраинский национальный университет им. Владимира Даля, г.Луганск

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФАЗИ РЕГУЛЯТОРОВ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ТЕПЛОГЕНЕРИРУЮЩИХ УСТАНОВОК

Показана перспективность применения регуляторов с использованием элементов нечеткой логики в системах регулирования температуры теплоносителя теплогенерирующей установки.

Экспериментальные и теоретические исследования динамических характеристик промышленных теплогенерирующих установок (ТГУ) показали существенную нелинейность дифференциальных уравнений, описывающих их динамику. В этом случае применение линейных регуляторов не позволяет получить оптимальные динамические характеристики системы, и для решения этой задачи требуются регуляторы с переменными настройками, переменной структурой или регуляторы, построенные на основе элементов нечеткой логики [1].

Передаточные функции ТГУ при нагрузке и разгрузке имеют одинаковую структуру, но различные постоянные времени [2]. В связи с этим, используемый регулятор должен иметь различные коэффициенты настроек в зависимости от знака изменения регулируемого параметра (температуры теплоносителя) и его производной, для того, чтобы обеспечить оптимальные характеристики переходного процесса (время и перерегулирование). Наиболее перспективными с этой точки зрения являются регуляторы нечеткой логики [3]. Их функционирова-