

ISSN 2306-1561

Automation and Control in Technical Systems (ACTS)

2014, No 2, pp. 123-131.

DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-12



Mathematical model of heat processing concrete mixture components

Marsov Vadim Israilevich

Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of «Automation Industrial Process».

State Technical University – MADI, 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradsky prospekt, 64.

Tel.: +7 (499) 151-64-12. <http://www.madi.ru>

evmarsova@rambler.ru

Kolbasin Alexander Markovich

Russian Federation, Ph.D., Associate Professor, Department of «Automation Industrial Process».

State Technical University – MADI, 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradsky prospekt, 64.

Tel.: +7 (499) 151-64-12. <http://www.madi.ru>

alex123456789.a@yandex.ru

Abdulkhanova Marina Yurievna

Russian Federation, Ph.D., Associate Professor, Department of «Automation Industrial Process».

State Technical University – MADI, 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradsky prospekt, 64.

Tel.: +7 (499) 151-64-12. <http://www.madi.ru>

muabdulxanova@yandex.ru

Kurilin Andrey Valentinovich

Russian Federation, Postgraduate Student, Department of «Automated Control Systems».

State Technical University – MADI, 125319, Russian Federation, Moscow, Leningradsky prospekt, 64.

Tel.: +7 (499) 151-64-12. <http://www.madi.ru>

madi-app@mail.ru

Abstract. A mathematical model of the thermal treatment of the material in a rotary kiln, which is represented by an object of mass exchange with the most significant energy interactions of the heat capacity of the structure. Model characterizes the change in the object state management in the state space, as variables that have adopted the thermodynamic potentials.

Keywords: concrete, the rotary kiln, conduction, mathematical model, thermodynamics.

ISSN 2306-1561

Автоматизация и управление в технических системах (АУТС)

2014. – №2. – С. 123-131.

DOI: 10.12731/2306-1561-2014-2-12



УДК 681.57

Математическая модель процессов тепловой обработки компонентов бетонной смеси

Марсов Вадим Израилевич

Российская Федерация, доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов».

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, д.64, Тел.: +7 (499) 151-64-12, <http://www.madi.ru>

evmarsova@rambler.ru

Колбасин Александр Маркович

Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов».

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, д.64, Тел.: +7 (499) 151-64-12, <http://www.madi.ru>

alex123456789.a@yandex.ru

Абдулханова Марина Юрьевна

Российская Федерация, кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация производственных процессов».

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, д.64, Тел.: +7 (499) 151-64-12, <http://www.madi.ru>

muabdulhanova@yandex.ru

Курилин Андрей Валентинович

Российская Федерация, аспирант кафедры «Автоматизация производственных процессов».

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)», 125319, Российская Федерация, г. Москва, Ленинградский проспект, д.64, Тел.: +7 (499) 151-64-12, <http://www.madi.ru>

madi-app@mail.ru

Аннотация. Рассматривается математическая модель процесса тепловой обработки материала во вращающихся печах, которая представлена тепломассообменным объектом с наиболее существенными энергетическими взаимодействиями теплостойких элементов конструкции. Модель характеризует изменение состояния объекта управления в пространстве состояний, в качестве переменных которых приняты термодинамические потенциалы.

Ключевые слова: бетон, вращающиеся печи, теплообмен, математическая модель, термодинамика.

1. Введение

Агрегаты тепловой обработки строительных материалов, в частности прямоточные вращающиеся печи, представляют собой многомерные и нестационарные объекты управления с распределенными случайными параметрами, и нелинейными взаимосвязями.

Аналитическое описание тепломассообменных процессов классическими методами дифференциальных уравнений практически не возможно. В отдельных случаях, решение получается достаточно сложным и фактически непригодным для инженерных расчетов. Возникает проблема получения приближенных аналитических решений математических моделей процессов в тепломассообменных агрегатах.

2. Краткий обзор исследований в области тепловой обработки компонентов бетонной смеси

Результаты исследований ряда авторов [1 – 20] показывают, что математические модели объектов управления носят специфический характер, связывая между собой, как правило, только входную и выходную переменные и отражая их наиболее существенные динамические свойства.

Выделение в тепловом агрегате отдельных элементов, участвующих в тепломассообменных процессах необходимо осуществлять с учетом физических особенностей этих процессов и заданного критерия оптимальности.

Основными физическими величинами тепловой обработки материала в прямоточных вращающихся печах, являются температуры их основных элементов и, в первую очередь, конструкций, обладающих существенными теплостойкостями.

Можно составить расчетную схему теплового объекта, с учетом следующих допущений:

- рассматриваемый участок тепловой обработки материала представляет собой объект с сосредоточенными параметрами;
- объект на определенном интервале управления не меняет своей конфигурации и массы.

В расчетной схеме теплового объекта, учтены следующие потоки тепловой энергии: Q_1 – входной; Q_2 – в изолирующий слой; Q_3 – к материалу; Q_4 – от изолирующего слоя в окружающую среду.

Получена следующая система уравнений энергетических балансов, учитывающих изменения тепловых энергий E_i :

Теплоносителя:

$$\partial E_1 / \partial \tau = Q_1 - Q_2 - Q_3;$$

Материала:

$$\partial E_2 / \partial \tau = Q_3 + Q_5; \quad (1)$$

Изолирующего слоя теплового агрегата:

$$\partial E_3 / \partial \tau = Q_2 - Q_4.$$

В ряде работ [1, 2] показано, что в достаточно большом диапазоне изменения температуры процессы тепловой обработки материала не имеют существенно нелинейных характеристик во временной и пространственной областях. Процессы практически монотонны, дисперсия параметров относительно невелика, возмущающие воздействия носят аддитивный характер.

3. Математическое моделирование теплового процесса обработки материала

При математическом описании процесса тепловой обработки материала сделаны следующие допущения:

- коэффициенты теплообмена постоянны на выбранном интервале управления и в заданном диапазоне изменения не зависят от температуры, влагосодержания и прочности;
- температура окружающей среды постоянна на интервале управления;
- теплообмен за счет излучения отсутствует;
- удельные теплоемкости конструкций в рассматриваемом диапазоне изменения параметров процесса тепловой обработки постоянны.

Поскольку элементы теплового объекта обработки материала в прямоточных вращающихся печах имеют сосредоточенные параметры, то перенос энергии между элементами описывается функциями, не зависящими от пространственных координат.

Отдельные потоки энергии выражаются через теплотехнические параметры, следующим образом:

1. Вход → Теплоноситель:

$$Q_1 = \eta c_{10} G_0 t;$$

2. Изолирующий слой теплового агрегата (ИСА) → Окружающая среда t_0

$$Q_4 = F_{3H} \alpha_{3H} (t_3 - t_0);$$

3. Теплоноситель → ИСА t_3

$$Q_2 = F_{3B} \alpha_{3B} (t_1 - t_3);$$

4. Теплоноситель → Материал:

$$Q_3 = F_{2H} \alpha_{2H} (\xi_0 + \xi_1 t_1 - t_2);$$

Изменение запасов тепловой энергии, будут:

теплоносителя:

$$\partial E_1 / \partial \tau = c_{10} m_{10} \partial t_1 / \partial \tau;$$

материала:

$$\partial E_2 / \partial \tau = c_{20} m_{20} \partial t_2 / \partial \tau; \quad (2)$$

материала изолирующего слоя теплового агрегата:

$$\partial E_3 / \partial \tau = c_3 m_3 \partial t_3 / \partial \tau;$$

где: t_3 – температура ИСА, $^{\circ}\text{C}$; t_0 – температура окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$; F_{3B} – площадь поверхности теплообмена теплового агрегата и изолирующего слоя; α_{3B} – коэффициент теплообмена между тепловым агрегатом и изолирующим слоем, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$; α_{2H} – коэффициент теплообмена между теплоносителем и материалом, $\text{Вт/м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$; t_2 – температура материала, $^{\circ}\text{C}$; ξ_0, ξ_1, ξ_2 – эмпирические коэффициенты; C_{20} – удельная теплоемкость материала $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$; m_{20} – активная масса материала, кг ; C_3 – удельная теплоемкость изолирующего слоя, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$, m_3 – активная масса материала изолирующего слоя, кг ; C_{10} – удельная теплоемкость энергоносителя, $\text{кДж/кг}^{\circ}\text{C}$.

Подстановка выражений потоков энергии в (2) дает следующую систему дифференциальных уравнений:

теплоноситель –

$$c_{10} m_{10} dt_1 / d\tau = \eta c_{10} (G_0 t - G_0 t_1) - F_{3B} \alpha_{3B} (t_1 - t_3) - F_{2H} \alpha_{2H} (\xi_0 + \xi_1 t_1 - t_2);$$

материал –

$$c_{20} m_{20} dt_2 / d\tau = F_{2H} \alpha_{2H} (\xi_0 + \xi_1 t_1 - t_2); \quad (3)$$

изолирующий слой теплового агрегата –

$$c_3 m_3 dt_3 / d\tau = F_{3H} \alpha_{3H} (t_3 - t_0).$$

Наличие в системе уравнений (3) произведения переменных G_0, t , делает модель процесса тепловой обработки – нелинейной. Однако эта модель в ограниченном диапазоне изменения переменных, может быть линеаризована за счет введения малых отклонений переменных от их номинальных значений на расчетных интервалах управления и в исследуемых диапазонах:

теплоноситель –

$$c_{10}m_{10}d\Delta t_1/d\tau = -(F_{3B}\alpha_{3B} + F_{2H}\alpha_{2H}\xi_1 + \eta c_{10}G_0^0)\Delta t_1 + F_{2H}\alpha_{2H}\Delta t_2 + \\ + F_{3B}\alpha_{3B}\Delta t_3 + \eta c_{10}(t^0 - t_1^0)\Delta G_0 + \eta c_{10}G_0^0\Delta t;$$

материал –

$$c_{20}m_{20}\Delta t_2/\partial\tau = F_{2H}\alpha_{2H}\xi_1\Delta t_1; \quad (4)$$

изолирующий слой теплового агрегата –

$$c_3m_3d\Delta t_3/d\tau = F_{3B}\alpha_{3B}\Delta t_1 - (F_{3B}\alpha_{3B} + F_{3H}\alpha_{3H})\Delta t_3.$$

Из уравнений (4) исключены члены, содержащие произведение отклонений переменных, в виду их малости более высокого порядка.

Для синтеза системы оптимального управления модель объекта представляем в векторно-матричной форме.

Введя обозначения:

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3]; \ U = [u_1 \ u_2 \ u_3];$$

$$x_1 = \Delta t; \ x_2 = \Delta t_2; \ x_3 = \Delta t_3$$

$$u_1=0; \ u_2 = \Delta t; \ u_3=0,$$

получим:

$$dX/d\tau = AX + BU, \quad (5)$$

где **A** – квадратная матрица, характеризующая динамические свойства объекта управления; **B** – прямоугольная матрица, характеризующая влияние управляющих воздействий;

$$\mathbf{A} = \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & 0 & a_{33} \end{vmatrix}; \quad \mathbf{B} = \begin{vmatrix} 0 & b_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{vmatrix};$$

здесь:

$$a_{11} = -(F_{3B}\alpha_{3B} + F_{2H}\alpha_{2H}\xi_1 + \eta c_{10}G_0^0)/c_{10}m_{10};$$

$$a_{12} = F_{2H}\alpha_{2H}/c_{10}m_{10}; \ a_{13} = F_{3B}\alpha_{3B}/c_{10}m_{10}; \ a_{21} = F_{2H}\alpha_{2H}\xi_1/c_{20}m_{20}; \\ a_{22}=0;$$

$$a_{23}=0; \ a_{31} = F_{3B}\alpha_{3B}/c_3m_3; \ a_{32}=0; \ a_{33} = (F_{3B}\alpha_{3B} + F_{3H}\alpha_{3H})/c_3m_3;$$

$$b_{12} = \eta c_{10}G_0^0/m_{10};$$

Анализ математической модели объекта, системы управления приобретает более явный физический смысл, если модель (4) представить в виде потоков энергии.

Введя обозначения:

$$L_1 = c_{10} m_{10_1} \Delta t_1; L_2 = c_{20} m_{20_1} \Delta t_2; L_3 = c_3 m_{3_1} \Delta t_3; n_1 = \eta c_{10} G_0^0 \Delta t; \quad (6)$$

и подставив выражения (6) в (5), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих взаимодействия элементов объекта тепловой обработки в энергетическом пространстве состояний.

$$dL/d\tau = A_0 L + N, \quad (7)$$

где:

$$L = [L_1 L_2 L_3]; \quad N = [n_1 0 0]; \quad A_0 = [a_{ij}^0],$$

здесь:

$$a_{011} = -(F_{3B} \alpha_{3B} + F_{2H} \alpha_{2H} \xi_1 + \eta c_{10} G_0^0) / c_{10} m_{10};$$

$$a_{012} = F_{2H} \alpha_{2H} / c_{10} m_{10};$$

$$a_{013} = F_{3B} \alpha_{3B} / c_{10} m_{10};$$

$$a_{021} = F_{2H} \alpha_{2H} \xi_1 / c_{10} m_{10};$$

$$a_{022} = 0;$$

$$a_{023} = 0;$$

$$a_{031} = F_{3B} \alpha_{3B} / c_3 m_3;$$

$$a_{033} = (F_{3B} \alpha_{3B} + F_{3H} \alpha_{3H}) / c_3 m_3;$$

$$n_1 = n_2 = 0.$$

Математические модели (5) и (7) дают обобщенное описание процессов тепловой обработки материала, позволяя разработать алгоритмы синтеза их систем управления.

Модель (5) описывает объект управления в пространстве состояний. Переменными состояния служат термодинамические потенциалы, определяющие потоки энергии и используемые для непосредственных измерений. В этом случае выходы модели совпадают с переменными состояний:

$$dX/d\tau = AX + BU; \quad (8)$$

$$Y = I \cdot X$$

где: $\mathbf{Y}$ – вектор выходов модели объекта управления; $\mathbf{I}$ - единичная матрица.

4. Заключение

Разработанная математическая модель процесса тепловой обработки материала в прямоточных вращающихся печах, представляет собой тепломассообменный объект с наиболее существенными энергетическими взаимодействиями элементов конструкции. Модель характеризует изменение состояния объекта управления в пространстве состояний, в качестве переменных которого приняты термодинамические потенциалы. Тепловая обработка в прямоточных вращающихся печах является одним из самых

энергоёмких процессов. Снижение энергоёмкости может быть достигнуто путем применения оптимальным управления технологическим процессом на основе предложенной модели.

Список информационных источников

- [1] Пугачев А.В. Контроль и автоматизация переработки сыпучих материалов. – М.: Стройиздат, 1999, 152 с.
- [2] Бабаджани Г. Автоматизация управления технологическим комплексом обжига сыпучих строительных материалов (кандидатская диссертация) – М.: МГСУ, 2004, 142 с.
- [3] Марсов, В.И., Автоматическое управление технологическими процессами на предприятиях строительной индустрии /В.И. Марсов, В.А. Славущий. – Л.: Стройиздат, 1975, 393 с.
- [4] Марсов В.И., Колбасин А.М., Сарычев И.Ю., Курилин А.В. Модель теплопереноса в технологических объектах строительного производства // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 3. С. 7-11.
- [5] Илюхин А.В., Колбасин А.М., Сарычев И.Ю., Курилин А.В. Оптимальное управление тепловым процессом сушильного барабана // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 3. – С. 11-16.
- [6] Марсов В.И., Колбасин А.М., Абдулханова М.Ю., Динь А.Н. Модель управления связным дозированием компонентов строительных смесей // Автоматизация и управление в технических системах. – 2014. – № 1.2 (9). – С. 158-164. DOI: 10.12731/2306-1561-2014-1-29.
- [7] Остроух А.В. Обзор современного состояния развития автоматизации производства сухих строительных смесей / А.В. Остроух, Вэй Пью Аунг, Мью Лин Аунг, М.И. Исмоилов // В мире научных открытий. Серия «Проблемы науки и образования». – 2012. – №12. – С.12-19.
- [8] Вэй Пью Аунг, Остроух А.В. АСУТП производства сухих строительных смесей // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 1. – С. 26-29.
- [9] Остроух А.В., Тянь Юань. Современные методы и подходы к построению систем управления производственно-технологической деятельностью промышленных предприятий // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 1. – С. 29-31.
- [10] Остроух А.В. Мониторинг процесса производства сухих строительных смесей / А.В. Остроух, Вэй Пью Аунг, Юань Тянь // Наука и образование в XXI веке: Теоретические и прикладные вопросы науки и образования: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч. – практ. конф. 30 сентября 2013 г.: Часть 1. – Тамбов: ТРОО «Бизнес-Наука-Общество», 2013. – С. 138-140.
- [11] Вэй Пью Аунг, Остроух А.В. Автоматизированная система управления технологическим процессом производства сухих строительных смесей // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 2. – С. 76-82.
- [12] Остроух А.В., Вэй Пью Аунг, Суркова Н.Е. Анализ современного состояния автоматизации процесса производства сухих строительных смесей // Механизация строительства. – 2014. – №7. – С. 59-63.
- [13] Остроух А.В. Информационные системы строительных предприятий / А.В. Остроух - Saarbrücken, Germany: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. - 364 p. - ISBN 978-3-8443-5202-3.

- [14] Остроух А.В. Информационные технологии в научной и производственной деятельности / [ред. А.В. Остроух] - М: ООО "Техполиграфцентр", 2011. - 240 с. - ISBN 978-5-94385-056-1.
- [15] Остроух А.В. Автоматизация и моделирование работы предприятий по строительству промышленных объектов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06: защищена 07.04.09: утв. 19.06.09. - М., 2009. - 357 с.
- [16] Остроух А.В. Автоматизация и моделирование работы предприятий по строительству промышленных объектов: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.13.06. - М., 2009. - 43 с.
- [17] Остроух А.В. Исследование начального периода моделирования на точность среднеинтегральной оценки имитационных моделей / А.В. Остроух, А.А. Солнцев, Н.В. Солдатов, К.А. Новицкий, П.С. Якунин // Вестник МАДИ. – 2010. – Вып. 2(21). – С. 61-65.
- [18] Сальный А.Г., Кухаренко В.Н., Николаев А.Б., Остроух А.В. Общие принципы построения SCADA-систем // Автоматизация и управление в технических системах. – 2013. – № 2. – С. 8-12.
- [19] A.V. Ostroukh, I.A. Bashmakov, N.E. Surkova. Process Model of the Technology of Concrete Mixtures Transportation by Road // World Applied Sciences Journal (WASJ). 2014. Vol. 31, No 4, pp. 500-507. DOI: 10.5829/idosi.wasj.2014.31.04.333.
- [20] Ostroukh A.V., Glebov A.O., Karpov S.V., Karpushkin S.V., Krasnyanskiy M.N. Optimization of design and performance characteristics of heating system of press equipment // American Journal of Applied Sciences. 2014. Vol. 11. No 6. pp. 939-946. DOI:10.3844/ajassp.2014.939.946.