

УДК 519.876.2

Д. А. Ковалюк, к. т. н.; С. М. Москвина, к. т. н., доц.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

В статье рассмотрены проблемы моделирования теплотехнологических объектов с распределенными параметрами и предложены методы повышения их эффективности за счет объединения конечно-разностных и нечетких моделей. Проблемы моделирования рассмотрены в контексте задач управления качеством продукции.

Ключевые слова: *теплотехнологические объекты, конечно-разностные методы, нечеткие модели, управление качеством продукции.*

Вступление

Процессы тепловой обработки являются важной составляющей многих промышленных производств в энергетике, металлургии, химии, где используются разнообразные тепловые установки и агрегаты. Отдельным классом таких установок являются теплотехнологические объекты с распределенными параметрами (ТОРП), которые характеризуются следующими свойствами: непрерывностью теплового процесса, распределением температурного поля по длине ОРП, разбивкой ТОРП на зоны с возможностью отдельного управления температурой на каждой из них, продольным перемещением обрабатываемого материала, постоянным временем его пребывания на конкретной позиции ТОРП и значительным влиянием этапа термической обработки на его характеристики.

Проблемы моделирования тепловых объектов с распределенными параметрами

Математическая модель теплотехнологического ОРП является функциональной зависимостью вида $T = F(X, U, L, t)$ и позволяет определить значение температурного поля T теплотехнологического объекта (или материала) в момент времени t в точке L при соответствующем наборе значений параметров X теплотехнологического объекта и управляющих влияниях U . Задача оптимального управления теплотехнологическим ОРП заключается в поддержании соответствующей температурной кривой, то есть в результате моделирования определяют такие значения вектора управления U , при которых значения вектора T максимально приближены к соответствующим эталонным значениям температурной кривой.

Анализ математических моделей ТОРП [1-3] показал, что их использование является полностью оправданным и проверенным на практике. Однако существующие модели не позволяют обеспечить максимальную эффективность процессов тепловой обработки, которая определяется соотношением между расходом топлива и качеством конечной продукции, например получение низкого качества изделий при высоких энергетических затратах. Это можно объяснить тем, что существующие модели не учитывают факторов всего технологического процесса, начиная от формирования изделий и заканчивая показателями качества продукции, и поэтому не позволяют оперативно перенастраивать параметры процесса.

Целью работы является совершенствование метода моделирования ТОРП с помощью интеллектуальной составляющей модели объекта и алгоритма определения оптимальных параметров модели ОРП, что позволяет повысить его быстродействие.

Повышение эффективности моделирования ТОРП рассматривается на примере туннельной печи обжига кирпича, температурное поле которой представлено на рис. 1.

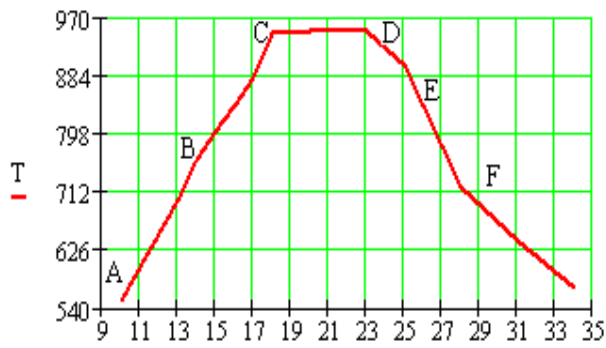


Рис. 1. Кривая температурного режима теплотехнологического ОРП

В большинстве случаев для получения вектора температур T от уравнения в частных производных, которое описывает функционирование теплотехнологического ОРП, переходят к системе конечно-разностных уравнений и используют численный метод конечных разностей. Точность и адекватность результатов данного метода зависит от устойчивости разностной схемы, на которую влияют

соотношения шагов по времени и пространственной переменной, количество переменных, тип разностной схемы.

Поскольку обеспечение устойчивости разностной схемы определяет трудоемкость решения, то для анализа эффективности конечно-разностного метода было проведено исследование одно-, дву- и трехмерных моделей ОРП, которое осуществлялось путем варьирования параметров сетки, использования явных и неявных схем, вычисления максимальной относительной погрешности между реальными и численными значениями, трудоемкости вычислительных операций.

Таблица 1

Результаты моделирования теплотехнологических ОРП

Количество параметров модели	Схема	Шаг по времени τ	Время расчета (сек.)	Порядок трудоемкости (к-во операций)	Максим. относительная погрешность (%)
одномерная	явная	0,001	2,4	10^4	0,708
	неявная	0,01	2,15	10^4	0,798
	неявная	0,001	42,172	10^5	0,759
	неявная	0,0001	1024,21	10^6	0,638
двумерная	явная	0,01	17,8458	10^4	1,618
	неявная	0,001	8267,22	10^6	2,996
трехмерная	неявная	0,001	48672,2	10^{11}	14,21

Анализ результатов моделирования, приведенных в таблице 1, показал, что эффективность конечно-разностных методов существенно зависит от размерности модели теплотехнологического ОРП и значений параметров моделирования - шага дискретизации по времени и пространственным переменным. Уменьшение данных параметров для обеспечения заданной точности решения и сходимости разностной схемы приводит к большим затратам машинных ресурсов и усложняет использование моделей в существующих системах управления, работающих в реальном масштабе времени.

Учитывая существенную обратную зависимость трудоемкости метода конечных разностей от шага дискретизации, на наш взгляд, его использование на участках температурной кривой, на которых значение температуры можно рассматривать как постоянное (рис. 1, участок CD), не является целесообразным. Поэтому авторами предложен комбинированный метод моделирования теплотехнологического ОРП, использование которого позволяет повысить скорость моделирования. Рассмотрим особенности предложенного метода на примере туннельной печи обжига кирпича.

Алгоритм метода моделирования теплотехнологических ОРП

Суть метода заключается в том, что для моделирования температурного поля ОРП используются разные виды моделей, выбор которых предопределяется градиентом температурного поля на соответствующей позиции ОРП. Алгоритм метода включает:

1. Определение температуры в начале – T^0 и в конце – T^k соответствующей позиции туннельной печи обжига.

2. Если $|T^k - T^0| > \xi$ (где ξ – заданное допустимое отклонение температуры от нормативных значений), то для распределения температуры данной позиции выполняются условия $\left\{ \frac{\partial T}{\partial t} \geq G_T; \frac{\partial T}{\partial l} \leq G_L \right.$ (где G_T, G_L – заданные границы изменения температуры по времени и длине). В этом случае выполняются следующие шаги:

- строится математическая модель распределения температурного поля с использованием положений теории теплопроводности;
- формулируется смешанная задача с соответствующими начальными и граничными условиями;
- решается смешанная задача методом конечных разностей.

3. Если $|T^k - T^0| \leq \xi$, то для моделирования температурного поля соответствующей позиции (например, рис. 1, участок CD) выполняются следующие шаги:

- туннельная печь обжига рассматривается как объект с сосредоточенными параметрами;
- строится нечеткая математическая модель данной позиции в виде ОЗП с последующим ее решением относительно U .

Нечеткая модель процесса выжигания

В качестве модели теплового объекта с сосредоточенными параметрами авторами предложена нечеткая модель, поскольку модели данного класса [4 – 5] являются относительно несложными и пригодными для использования в существующих АСУТП, которые работают в реальном масштабе времени. Так, для разработки нечеткой модели туннельной печи обжига в работе был проведен анализ факторов, влияющих на температуру каждой позиции печи, которые характеризуют условия протекания тепловых процессов на текущей и предыдущей позиции, а также учитывают движение воздуха вдоль печи: x_1 – абсолютное отклонение температуры T от заданной T_z на текущей позиции печи; x_2 – скорость изменения температуры; x_3 – теплотворная способность топлива; x_4 – температура воздуха предыдущей зоны; x_5 – количество воздуха, который выносится в следующую позицию; x_6 – расход топлива на текущей позиции; x_7 – температура материала в текущей зоне. В качестве структуры модели выбрано иерархическое дерево, что позволяет уменьшить количество правил в базе знаний.

Адекватность нечеткой модели подтверждена результатами экспериментальных исследований, которые показали, что средняя квадратичная невязка модели составляет 9,64. Результаты исследования точности модели приведены на рисунке 2, где T_{mod} – значение температуры, полученное с помощью нечеткой модели; T_{real} – экспериментальное значение температуры; $T_z \pm d$ – допустимые отклонения температуры по технологическому регламенту.

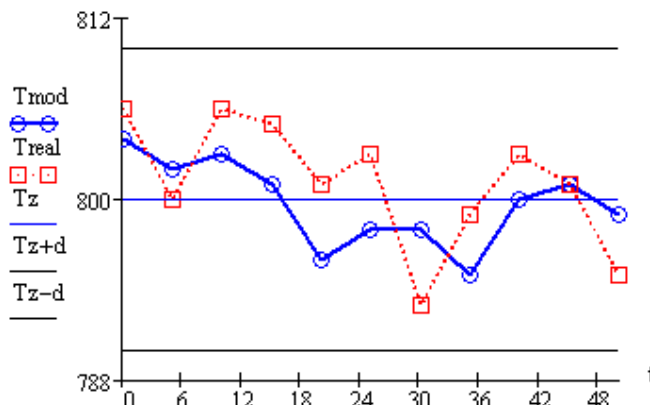


Рис. 2. Исследование точности нечеткой модели

позициях, для температурного распределения которых выполняется соотношение $|T^k - T^0| \leq \xi$.

Время расчета параметров управления V для получения заданного значения температуры составляет 1,5 с.

Результаты моделирования показали, что предложенный в работе метод моделирования теплотехнологических ОРП по сравнению с данными таблицы 1, позволяет существенно повысить скорость моделирования за счет использования нечеткой модели на

Алгоритм оптимизации параметров модели ТОРП

Для учета особенностей всего технологического процесса в работе предложен метод определения оптимальных параметров модели теплотехнологического ОРП (рис. 3), необходимость которого связана с тем, что существующие модели не учитывают факторы всего технологического процесса, возмущающих влияний, связанных с изменением температуры и влажности воздуха, свойств сырья, отклонениями в подготовке полуфабриката изделий, а потому не позволяют адекватно описывать ОРП при разных условиях.

Идея метода [6] заключается в том, что используя значение параметров ТП, можно спрогнозировать максимально возможный класс качества продукции и найти оптимальные, в смысле энергетических затрат, значения температурного поля, при которых достигается заданный класс качества.

Метод определения оптимальных параметров модели теплотехнологического ОРП включает следующие этапы:

1. Прогнозирование максимально возможного класса качества продукции, которая осуществляется с использованием логико-вероятностной модели (блок “ЛВ-модель определения класса продукции”, рис. 3), которая позволяет определять класс качества с учетом риска принятия решения, что предопределено сложностью и аварийностью объекта, значительной инерционностью каналов управления, распределением температуры газовой среды по длине печи.

2. Определяется нижний предел для спрогнозированного максимально возможного класса качества и с использованием модели всего технологического процесса (блок “Модель прогнозирования качества”), модели оптимизации (блок “Модель оптимизации”) и ограничений технологического регламента относительно значений температурного поля T решается задача оптимизации:

$$f(T(U)) \rightarrow \min, \quad (1)$$

$$\begin{cases} MM_Class(H, T) = Class_{max}; \\ MM_Mitsnist(H, T) = M_{min}|_{CLASS_{max}}; \\ W_{min} \leq W \leq W_{max}, \end{cases} \quad (2)$$

где $f(T(U))$ – критерий эффективности, который учитывает связь между температурой и энергетическими затратами для ее поддержания; MM_Class – математическая модель

классификации качества изделий; $MM_Mitsnist$ – математическая модель качества продукции ТП; $\mathbf{H}$ – вектор параметров, которые предшествуют этапу использования ОРП; $\mathbf{W}_{min}, \mathbf{W}_{max}$ – границы технических параметров системы управления.

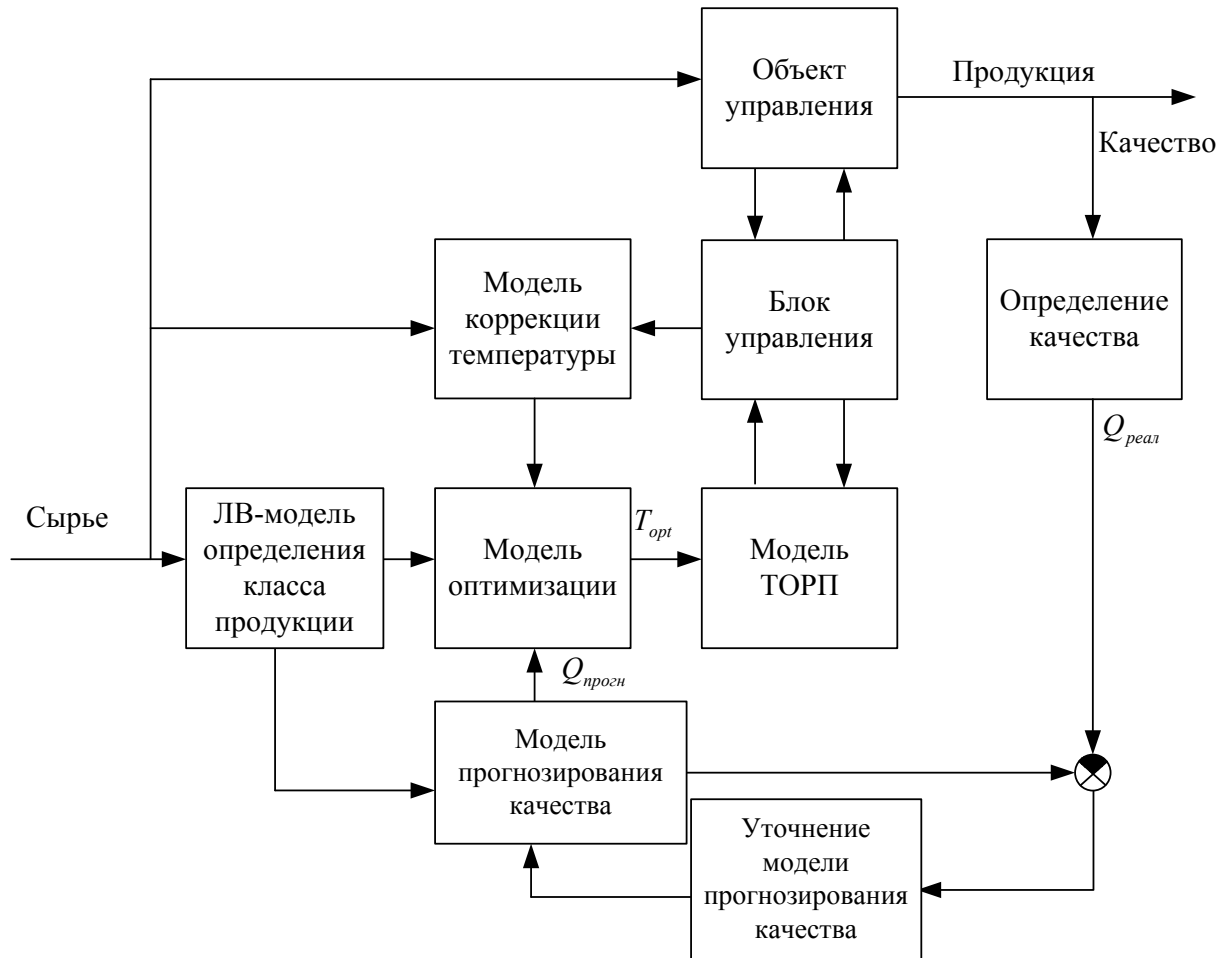


Рис. 3. Структурная схема метода определения оптимальных параметров ОРП

3. Уточненные параметры модели теплотехнологического ОРП – T_{opt} , полученные на предыдущем шаге, используются в модели теплотехнологического ОРП (блок “Модель ТТОРП”) для моделирования температурного поля объекта управления.

4. В случае невозможности поддержания рассчитанной температурной кривой из-за технических причин (например, изменение режима проталкивания изделий, выход из строя горелок на отдельных позициях), в методе предусмотрена возможность оперативной коррекции температурного поля с помощью модели коррекции температурного поля (блок “Модель коррекции температуры”), на вход которой, кроме параметров предыдущих этапов ТП, поступают значения температурного поля, которые были получены до данной позиции.

5. После завершения ТП определяется реальное качество продукции $Q_{реал}$ (блок “Определения качества”) и сравнивается с прогнозируемым качеством $Q_{прогн}$. В случае, если $|Q_{реал} - Q_{прогн}| > \Delta Q_{гран}$ (где $\Delta Q_{гран}$ – предельно допустимое отклонение значения качества), то выполняется процедура коррекции нейросетевой модели прогнозирования качества (блок “Уточнение модели прогнозирования качества”) с использованием алгоритма обучения.

Критерий эффективности задачи оптимизации представляется в виде квадратичного

отклонения между теплотой, которая вносится и выносится для i -й позиции ОРП:

$$F(T, V) = \left(\frac{V_i Q_n^p + V_i R_s (1 + X) E_{нов} + V_{i+1} E_{n.з.}(T_{i+1}) -}{-(V_{i+1} + V_i) E_{n.з.}(T_i) - \alpha S \cdot (T_i - T_z)} \right)^2, \quad (3)$$

где V_i – расходы топлива на текущей позиции; Q_n^p – наименьшая теплотворная способность рабочего топлива; R_s – стехиометрическое соотношение воздух/топливо; X – коэффициент избытка воздуха на позиции печи; $E_{нов}$ – энтальпия воздуха, который поступает на горение; V_{i+1} – объем топлива, которое тратится на следующей позиции; T_{i+1} – температура на следующей позиции; $E_{n.з.}$ – энтальпия продуктов горения, которые образуются при сжигании 1 м^3 топлива; α – коэффициент теплоотдачи; S – площадь поверхности нагрева; T_z – температура материала.

Отметим, что критерий (3) является нелинейным относительно температурного поля T , поэтому для его исследования был использован метод квадратичного программирования. В результате решения задачи оптимизации определены оптимальные температурные кривые, которые позволяют получить максимальное качество изделий при минимальном использовании энергетических ресурсов. Графики температурных кривых: эталонной T_{max} и оптимальной T_{dosl} для i -го набора факторов ТП приведены на рисунке 4.

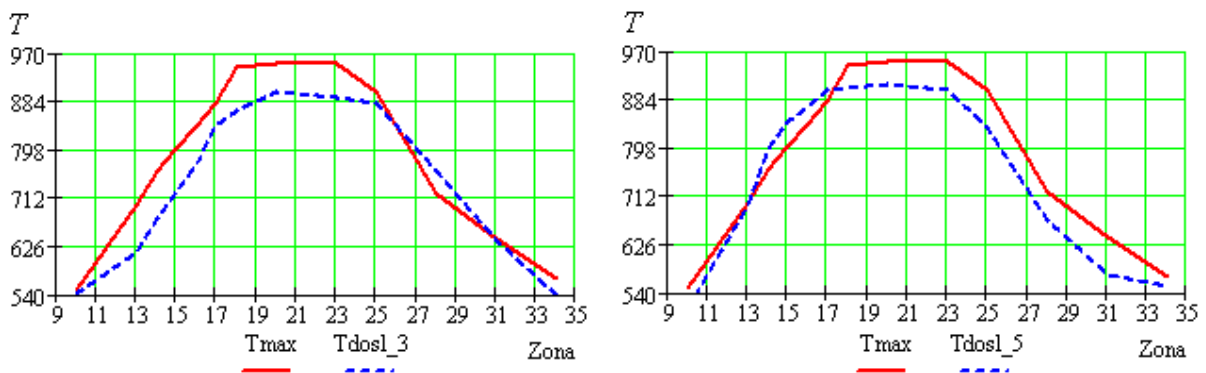


Рис. 4. Температурные кривые туннельной печи обжига

Анализ расходов топлива для поддержания эталонной T_{max} и оптимальной T_{dosl} температурной кривой показал, что предложенный метод позволяет в среднем для одной партии изделий сэкономить $\approx 428.3 \text{ м}^3$ топлива (7,14%).

Вывод

Повышение эффективности методов моделирования ТОРП может быть осуществлено за счет сочетания классических и интеллектуальных технологий, направленных на создание быстрых моделей для минимизации отклонения температурного поля. Это позволит учитывать показатели риска при управлении тепловыми объектами и уменьшить энергетические затраты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кочетов В. С., Ларченко А. А., Немировский Л. Р. Автоматизация производственных процессов и АСУП промышленности строительных материалов. – Л.: Стройиздат, 1981. – 456с.
2. Москвина С. М., Ковалюк Д. О. Проблемы оптимизации управления технологическим процессом изготовления кирпича // Вестник ХНУ. – 2005. – №5. – С.121-125
3. Рапопорт Э. Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. Учебное пособие. – М.: Высшая школа, 2003. – 298 с.
4. Ali Y.M., Zhang L. A methodology for fuzzy modeling of engineering systems // Fuzzy Sets and Systems. – 2001. – No. 118. – P. 181-197.
5. Аверкин А. Н., Батыршин И. З., Блишун А. Ф. и др. Нечеткие множества в моделях управления и Наукові праці ВНТУ, 2009, № 4

искусственного интеллекта / Под ред. Поспелова Д. А. – М.: Наука, 1986. – 312 с.

6. Москвина С. М., Ковалюк Д. О. Математическая модель энергосбережения теплового объекта с распределенными параметрами // Вестник Винницкого политехнического института. – 2007. – №4. – С. 15–19.

Ковалюк Дмитрий Александрович – к. т. н., старший преподаватель кафедры компьютерных систем управления.

Москвина Светлана Михайловна – к. т. н., доцент кафедры компьютерных систем управления, e-mail: moskvina@ukr.net, тел.: (0432)-598222.

Винницкий национальный технический университет.