

## ЛИТЕРАТУРА

1. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Возникновение высокочастотных колебаний давления при теплообмене с диизопропилциклогексаном // ИФЖ. – 1966. – Т. 11, № 1. – С. 99–104.
2. Кичигин А. М., Кесова Л. А. О возникновении звуковых колебаний при переходе от поверхностного кипения к пленочному // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений), – 1966. – № 8. – С. 114–117.
3. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. О разрушении труб ВЧ-колебаниями давления, возникающими при теплообмене // Атомная энергия. – 1967. – Т. 23. Вып. 2. – С. 147–149.
4. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Высокочастотные колебания давления, возникающие при теплоотдаче к этиловому спирту // Теплофиз. высок. температур. – 1967. – Т. 5, № 4. – С. 720–723.
5. Кичигин А. М., Кесова Л. А. Взаимосвязь между характером звуковых колебаний и видом поверхностного кипения воды в кольцевых каналах // Журн. прикл. мех. и техн. физ. – 1967. – № 6. – С. 79–82.
6. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Исследование высокочастотных колебаний давления, возникающих при теплоотдаче к воде // Теплоэнергетика. – 1968. – № 1. – С. 47–49.
7. Кафенгауз Н. Л., Федоров М. И. Об условиях возникновения псевдокипения при теплообмене с турбулентным потоком жидкости // ИФЖ. – 1968. – Т. 14, № 5. – С. 923–924.
8. Каплан Ш. Г., Толчинская Р. Е. Возникновение высокочастотных колебаний давления в процессе теплообмена при вынужденном движении жидкости // ИФЖ. – 1969. – Т. 17, № 3. – С. 486–490.
9. Корнелиус А., Паркер Д. ж. Неустойчивость теплообмена вблизи термодинамической критической точки // Достижения в области теплообмена. – М.: Мир, 1970. – 455 с.
10. Герлига В. А., Прохоров Ю. Ф., Шамаков А. А. О звуковых колебаниях в обогреваемых каналах // Теплофиз. высок. температур. – 1971. – Т. 9, № 5. – С. 1084–1086.
11. Ветров В. И., Герлига В. А., Разумовский В. Г. Экспериментальное исследование термоакустических колебаний в обогреваемых каналах при сверхкритических давлениях воды // Вопросы атомн. науки и техн. Сер. Динамика ядерных энергетических установок. – 1977. – Вып. 2 (12). – С. 51–57.
12. О механизме термоакустических колебаний / В. Д. Васьянов, Н. Л. Кафенгауз, А. Г. Лебедева и др. // ИФЖ. – 1978. – Т. 34. – № 5. – С. 773–775.
13. Герлига В. А., Скалозубов В. И. Пузырьковые кипящие потоки в энергооборудовании АЭС. – М.: Энергоатомиздат. – 1992. – 432 с.
14. Бошкова И. Л. Моделирование термоакустических явлений в парогенерирующих каналах с учетом потерь механической энергии: Дис. ... канд. техн. наук. – Одесса: Одесск. гос. акад. холода, 1995. – 107 с.
15. Bouge J. A., Bergles A. E., Tong L. S. Review of two-phase flow instability // Nucl. eng. and design. – 1973. – V. 25. – P. 165–192.

Представлена кафедрой АЭС

Поступила 30.12.1999

УДК 621.1.0.18

## ОПТИМИЗАЦИЯ РАСЧЕТОВ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ТЕПЛООВОГО РЕЖИМА РАБОТЫ НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ

Канд. техн. наук, доц. ПАПКОВИЧ В. Н.,  
инженеры КАСНЕРИК Е. Н., ЛЕВОШЕНЯ Е. П.

*Белорусская государственная политехническая академия*

1 Математические модели, описывающие тепловые процессы нагрева заготовок в печах, отличаются высокой вычислительной сложностью; кроме того, решение дифференциальных уравнений с частными производными в аналитическом виде невозможно. Применение численных методов также негативно сказывается на времени расчета. В связи с этим представляется целесообразным аппроксимировать уравнение ис-

ходной задачи некоторой полиномиальной функцией, вычисление значений которой будет более экономичным по временным затратам.

В практике математического моделирования сложных теплотехнологических и других процессов и явлений широко используется принцип «черного ящика». Модели, получаемые таким способом, имеют весьма простую структуру. Они чаще всего относятся к классу полиномов и применяются в тех случаях, когда несложно получить достаточное количество экспериментальных данных. Следует отметить, что имеется необходимое компактное и простое описание процесса с четкими интерполяционными свойствами без требований к выявлению и учету физических закономерностей объекта.

С учетом сказанного выше математическая модель может быть представлена в виде:

$$y = \Psi(X);$$

$$X = \|x_{ik}\|;$$

$$y = (y_1, \dots, y_n)^T;$$

$$1 \leq i \leq l; 1 \leq k \leq n,$$

где  $X$  – матрица экспериментальных данных;  $\Psi$  – передаточная функция системы;  $y$  – вектор выходных переменных;  $l$  – количество управляющих переменных;  $n$  – количество экспериментов.

Если в задаче присутствует несколько выходных переменных, то она разбивается на подзадачи аппроксимации для каждой переменной. Задача состоит в подборе такой передаточной функции  $\Psi$ , которая обеспечивала бы адекватность математической модели и вместе с тем обладала меньшей вычислительной сложностью по сравнению с исходной.

В задаче применяется аппроксимация полиномом степени  $s$ , который приближает данные эксперимента по критерию наименьших квадратов:

$$P_s(x, a) = a^T U(x);$$

$$U(x) = (x_1, x_2, \dots, x_l, x_1^2, x_1 x_2, \dots, x_l^s)^T,$$

где  $U$  – вектор членов степенного полинома;  $a$  – вектор коэффициентов полинома.

На основании матрицы экспериментальных данных  $X$  задается матрица экспериментальных значений членов полинома  $U$

$$U = \|U_{ik}\| = (U(x_1), U(x_2), \dots, U(x_n)), \quad i \leq 1 \leq m,$$

где  $m$  – число членов полинома.

Для полинома степени  $s$ , построенного на  $l$  переменных, число коэффициентов  $m$  выражается зависимостью

$$m = \frac{(l+s)!}{l!s!}.$$

Тогда критерий наименьших квадратов может быть записан в следующем виде:

$$J = (y - U^T a)^T (y - U^T a).$$

Соответствующие ему оптимальные значения коэффициентов определяются по формуле, применяемой в регрессионном анализе:

$$a_0 = (UU^T)^{-1}Uy.$$

Полученные коэффициенты обеспечивают наименьшее расхождение (наименьшие квадраты) значений полинома и экспериментальной совокупности.

Практическое применение указанного подхода затруднено в силу конечной точности вычислений на ЭВМ и погрешностей экспериментальных данных, в результате чего не удается получить удовлетворительной аппроксимации при степенях полинома выше 3–4. Для преодоления этой сложности используются ортогональные полиномы [1], применение которых позволяет достичь удовлетворительной точности вычислений при степенях полинома  $s$  до 20–25.

Описанный метод требует адекватного выбора вида функциональной зависимости выхода системы от входных переменных и в результате своего применения позволяет существенно (до нескольких порядков) уменьшить объем вычислений [2].

В рассматриваемой задаче управляющими переменными служат: начальная температура заготовки и газов в зонах методической печи, продолжительность процесса нагрева. Неизменными полагаются: температура методической зоны; температура томильной зоны (совпадает с температурой заготовки, которую требуется получить в конце нагрева); геометрические размеры заготовки. Ограничение на неизменность некоторых величин вызвано резким ростом числа узлов матрицы экспериментальных данных, по которым строится аппроксимирующий полином.

Построение матрицы эксперимента велось по следующим узловым значениям:

$$\begin{aligned}T_0 &= \{20, 350, 400, 450, 700, 750, 800\}, \text{ К;} \\T_1, T_2 &= \{1000, 1300, 1500, 1600, 1800\}, \text{ К;} \\t_k &= \{60, 90, 120, 180, 300, 480\}, \text{ мин.}\end{aligned}$$

Всего было проведено 1050 численных экспериментов по моделированию процесса нагрева. При этом оценивались следующие параметры (выходные переменные системы): конечная температура ребра блюда; разница температур ребра и центра блюда; максимальная температура поверхности блюда при нагреве; максимальная разница температур между ребром и центром блюда, достигнутая в процессе нагрева. Расчет проводился для полиномов степеней (1–9). После определения коэффициентов полинома по указанному выше методу оценивалась степень соответствия аппроксимированных и реальных данных (среднее отклонение узловых точек модели). Результаты численного эксперимента приведены в табл. 1.

На основании проведенных вычислений можно сделать вывод, что наиболее адекватные результаты по совокупности аппроксимируемых величин могут быть получены при использовании полиномов четвертой степени. Значения погрешностей, приведенные в таблице, соответству-

ют допуску для значений температур при тепловых расчетах такого вида – до 50 °С. Таким образом, относительная погрешность аппроксимированной модели не превышает 5 %.

Таблица 1

Степень аппроксимирующего полинома	Средняя погрешность аппроксимации в узле			
	$T_p(t_k)$ , °С	$T_p - T_{ц}$ , °С	max $T_p$ , °С	max $(T_p - T_{ц})$ , °С
1	61,98	71,50	84,35	94,55
2	55,02	58,02	40,63	29,57
3	40,47	42,81	26,23	19,57
4	20,61	28,79	18,31	13,61
5	6,34	20,21	13,99	45,01
6	6,24	35,83	56,41	43,07
7	2,37	22,96	28,26	18,58
8	10,31	85,97	94,39	121,04
9	22,42	115,81	280,33	44,88

На рис. 1 приведены некоторые параметры упрощенной и исходной моделей, что позволяет визуально оценить степень их совпадения. Следует отметить вполне адекватный результат при упрощении модели в части описания максимального нагрева ребра бляма; максимальной разницы температур центра и ребра бляма и менее адекватный, но попадающий в область допустимой погрешности результат по температуре ребра бляма в конечный момент времени и разбросу температур ребра и центра бляма в этот момент.

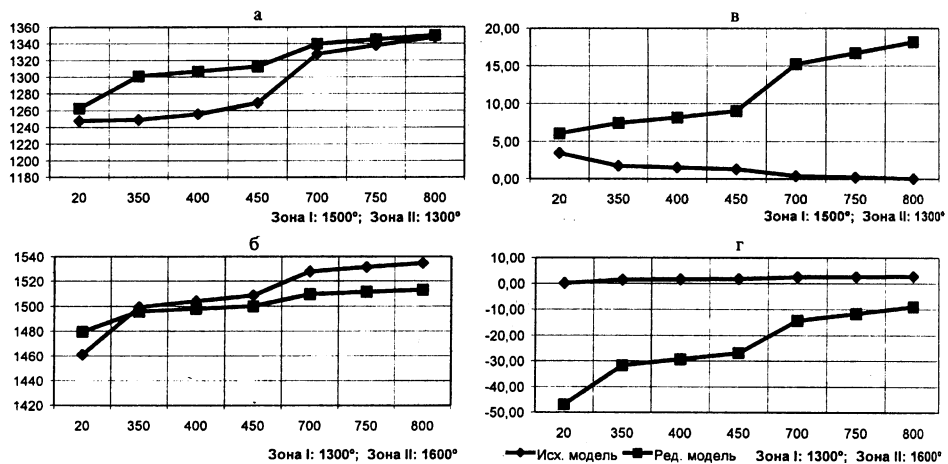


Рис. 1. Результаты определения максимального нагрева (а и б) и равномерности прогрева (в и г) слитка в зависимости от температурыurada с использованием полной и редуцированной моделей для различного соотношения температур сварочных зон

## ЛИТЕРАТУРА

1. Севастьянов П. В., Туманов Н. В. Многокритериальная идентификация и оптимизация технологических процессов. – Мн.: Наука і тэхніка, 1990. – 224 с.
2. Теплотехнология металлургических мини-заводов / В. И. Тимошпольский, Ю. В. Феоктистов, А. Б. Стеблов и др. – Мн.: Наука і тэхніка, 1992. – 158 с.

Представлена кафедрой  
ПОВТ и АС

Поступила 15.05.2000