

грев дизельного топлива при потребляемой мощности не более 130 Вт. При этом температура волновода, внедренного в топливопровод, не превышает 60 °С, что обеспечивает взрыво- и пожаробезопасность топливной системы.

5. Разработанный генератор ультразвуковых колебаний имеет небольшие габариты и малое потребление электроэнергии, что позволяет применять его на автомобиле.

ЛИТЕРАТУРА

1. Цуцов В.И. Зимняя эксплуатация тракторов и автомобилей. – М., 1983.

2. Семенов Н. В. Эксплуатация автомобилей в условиях низких температур. – М., 1993.

3. Кулемин А. В. Ультразвук и диффузия в металлах. – М.: Металлургия, 1978.

4. Кулемин А. В. Исследование тепловых процессов в ультразвуковых волноводах, работающих на больших интенсивностях звука // Новые разработки в ультразвуковой технике. – Л.: ЛДНТП, 1972. – С. 3–12.

5. Гордиенко Л. К., Степанов В. Н. О температурной зависимости внутреннего трения аустенитных сталей в полигонизованном состоянии // Внутреннее трение в металлических материалах. – М., 1970. – С. 138–142.

6. Кулемин А. В., Мицкевич А. М. О потерях в металлах на низких ультразвуковых частотах // Акустический журнал. – 1970. – Т. 16, вып. 2. – С. 275–280.

УДК 621.785:681.3

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЗАДАЧИ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРОЦЕССА НАГРЕВА ТЕЛ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ В ПРОМЫШЛЕННЫХ ПЕЧАХ

*Докт. техн. наук, проф. КОВАЛЕВСКИЙ В. Б., инж. КОВАЛЬКОВА И. А.,
канд. техн. наук, доц. КОВАЛЬКОВ А. Т.*

Белорусский национальный технический университет

При прогнозировании процесса нагрева в промышленных печах и распределения температурного поля в заготовках требуется знание значений коэффициентов теплообмена конвекцией α и радиацией σ . Эта задача для заготовок прямоугольного сечения решалась [1] путем идентификации математической модели нагрева на основе сопоставления теоретической модели, описывающей процесс нагрева, и экспериментальных исследований, т. е. подбирались такие значения коэффициентов теплообмена конвекцией и радиацией, при которых значения температур металла в печи, полученные как решение уравнения процесса нагрева, наименее отличались от тех же величин, но полученных экспериментальным путем. При этом рассчитывались значения температуры в различных точках поперечного сечения от поверхности до центра заготовки.

В настоящей работе решается аналогичная задача для заготовок цилиндрической формы, причем температура в процессе нагрева рассчитывается только на поверхности заготовки по методике [2]. В результате расчетов определяются значе-

ния чисел подобия Старка Sk и Био Bi , на основании которых могут быть определены коэффициенты теплообмена конвекцией и радиацией для исследуемой нагревательной печи.

Программное обеспечение решаемой задачи состоит из нескольких модулей на Турбо-Паскале, которые реализуют частные задачи:

- расчета значений температуры на поверхности заготовки в процессе нагрева [2];
- аппроксимации экспериментальной кривой изменения температуры на поверхности цилиндрической заготовки кубическим сплайном [3];
- минимизации целевой функции с двумя переменными (числа подобия Sk и Bi) методом координатного спуска [3], минимум одномерной функции вычисляется методом золотого сечения.

При расчете значений температуры на поверхности заготовки в соответствии с методикой [2] процесс нагрева разбивается на два этапа: инерционный, когда цилиндр только прогревается (температура центра еще не изменяется), и регулярный, когда температура изменяется по всему сечению. На регулярном этапе температура на

поверхности заготовки определяется методом половинного деления довольно громоздкого трансцендентного уравнения.

Целевая функция имеет вид

$$\delta = \int_0^{F_{0n}} \sum_{i=1}^k (\theta_i - \theta_{zi})^2 dF_0,$$

где F_{0n} – относительное время (число подобия Фурье) процесса нагрева (время идентификации); k – количество экспериментальных точек; θ_i, θ_{zi} – относительные температуры на поверхности заготовки, полученные расчетным и опытным путем;

$$F_0 = at/R^2; \quad \theta = T/T_c,$$

где a – коэффициент температуропроводности металла, $m^2/ч$; t – текущее время, ч; R – радиус цилиндра, м; T – температура на поверхности заготовки, К; T_c – температура греющей среды, К.

Определенный интеграл вычисляется с применением сплайнов (сплайн-квадратура) [3] в модуле сплайн-аппроксимации, при этом для вычисления интеграла используются те же процедуры, что и для вычисления сплайнов.

Укрупненный алгоритм работы основной программы, использующей модули, выглядит следующим образом:

1. Ввод исходных данных: начальной относительной температуры заготовки, конечного относительного времени процесса нагрева, шага по оси относительного времени, значений относительных коэффициентов теплопроводности и теплоемкости материала, координат точек экспериментальной кривой нагрева, размерности функции, допустимой погрешности ε определения координат минимума, допустимой погрешности ε_1 определения минимума одномерной функции методом золотого сечения, нижней и верхней границ изменения, а также начальное приближение чисел подобия Sk и Vi .

2. Аппроксимация опытной кривой нагрева кубическим сплайном.

3. Минимизация целевой функции методом координатного спуска.

4. Вывод результатов расчета: значение целевой функции в точке минимума, координаты этой точки (значения чисел подобия Sk и Vi), количество итераций и время расчета.

Вычисление целевой функции на каждой итерации минимизации выполняется процедурой типа function, в которую передаются текущие значения чисел подобия Sk и Vi , при этих значениях рассчитывается температура на поверхности заготовки в моменты времени от начального до конечного с заданным шагом, а далее по отклонению вычисленных температур от температуры в соответствующих точках экспериментальной кривой находится очередное значение целевой функции.

Для тестирования программы в качестве экспериментальной кривой взята кривая нагрева цилиндра $Sk = 0,75$; $Vi = 0,075$ [4]. Просчитывались различные варианты исходных данных. Границы изменения Sk и Vi задавались в диапазоне $0...2$. В этом же диапазоне выбирались значения начального приближения Sk и Vi . Значения погрешностей ε и ε_1 варьировались от $1e - 6$ до $1e - 2$. Расчеты выполнялись на ПЭВМ Pentium-133. В зависимости от варианта сочетания исходных данных время счета было $2...40$ мин с количеством итераций $60...2400$.

Независимо от точки начального приближения достигалась точка минимума. С позиции минимизации времени счета при приемлемой точности результата (до 1 % для Sk и до 2 % для Vi) рекомендуются $\varepsilon = \varepsilon_1 = 1e - 4$. Время счета зависит от выбора значений точки начального приближения.

Таким образом, разработанное программное обеспечение позволяет по имеющейся экспериментальной кривой процесса нагрева определять для конкретной промышленной печи числа подобия Sk и Vi , а следовательно, коэффициенты теплообмена конвекцией и радиацией для этой печи.

ЛИТЕРАТУРА

1. Параметрическая идентификация математической модели процесса нагрева металла в закалочной печи / В. Б. Ковалевский, Ю. А. Малевич, В. Н. Папкович, С. М. Козлов // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 1. – С. 75–78.
2. Постольник Ю. С., Тимошпольский В. И. Радиационно-конвективный нагрев неограниченного цилиндра с функциональнозависящими теплофизическими характеристиками // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1980. – № 3. – С. 121–124.
3. Мудров А. Е. Численные методы для ПЭВМ на языках Бейсик, Фортран и Паскаль. – Томск: МП «РАСКО», 1991. – 272 с.
4. Теплообмен и тепловые режимы в промышленных печах: Учеб. пособие / В. И. Тимошпольский и др. – Мн.: Выш. шк., 1992. – 217 с.