

Системный анализ процессов теплообменного оборудования газотурбинной установки

Л.В. Осянина

Самарский государственный технический университет, Самара, Россия

Обоснование. Коэффициент конвективного теплообмена является одним из ключевых параметров, определяющих эффективность работы котлового оборудования, в частности котла-утилизатора газотурбинной установки. Он характеризует способность нагретой среды передавать тепло поверхности нагрева и влияет на скорость передачи тепла в системе. Данный коэффициент может быть получен в результате решения задачи идентификации на основе экспериментальных данных — холодного запуска котла-утилизатора газотурбинной установки.

Цель — идентифицировать коэффициент конвективного теплообмена между рабочей средой и стенкой барабана котла.

Методы. В связи с наличием тепловой изоляции на внешней поверхности барабана будем считать, что теплообмен с окружающей средой отсутствует. Тогда заданный процесс теплопроводности описывается соответствующей математической моделью (1)–(4) [1]:

$$\frac{\partial Q(x,t)}{\partial t} = a \frac{\partial^2 Q(x,t)}{\partial x^2}, \quad 0 < x < R, \quad t > 0, \quad (1)$$

$$Q(x, 0) = Q_0, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Q(0,t)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\lambda \frac{\partial Q(R,t)}{\partial x} = \alpha [Q_{ж}(t) - Q(R,t)], \quad (4)$$

где Q — температура; x — координата; t — время; a — коэффициент температуропроводности; Q_0 — начальная температура; λ — коэффициент теплопроводности материала барабана; α — коэффициент конвективного теплообмена между рабочей средой и стенкой барабана котла; $Q_{ж}(t)$ — температура рабочей среды; R — толщина стенки барабана.

Моделирование уравнения (1) с начальными условиями (2) и граничными условиями (3)–(4) проводится на основе описания объекта как системы с распределенными параметрами с использованием структурного представления. Также это же уравнение решается с помощью численного метода конечных элементов.

Идентификация коэффициента конвективного теплообмена проводится с использованием минимаксного критерия оптимизации (5), заключающегося в поиске знакопеременяющихся максимальных по абсолютной величине значения искомой величины [2]:

$$\hat{I} = \max_{\alpha} |Q_{\text{эксп}}(x,t) - Q_{\text{мод}}(x,t)| \rightarrow \min, \quad (5)$$

где $Q_{\text{эксп}}(x,t)$ — экспериментальные данные; $Q_{\text{мод}}(x,t)$ — модельные данные.

Результаты. Моделирование рассматриваемого процесса теплопроводности может быть выполнено с помощью передаточной функции (6):

$$W(x, \xi, p) = \frac{1}{R} \frac{\alpha}{c\gamma} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\eta_n}{\eta_n + \sin(\eta_n) + \cos(\eta_n)} \cos\left(\eta_n \frac{x}{R}\right) \cos\left(\eta_n \frac{\xi}{R}\right) \frac{\frac{R^2}{\sigma\eta_n^2}}{\frac{R^2}{\sigma\eta_n^2} p + 1}, \quad (6)$$

где p — оператор преобразования Лапласа; η_n — пронумерованные в порядке возрастания корни уравнения (7):

$$\eta \operatorname{tg} \eta - Bi = 0 \quad (7)$$

и $Bi = \alpha R / \lambda$ — безразмерный критерий Био [1].

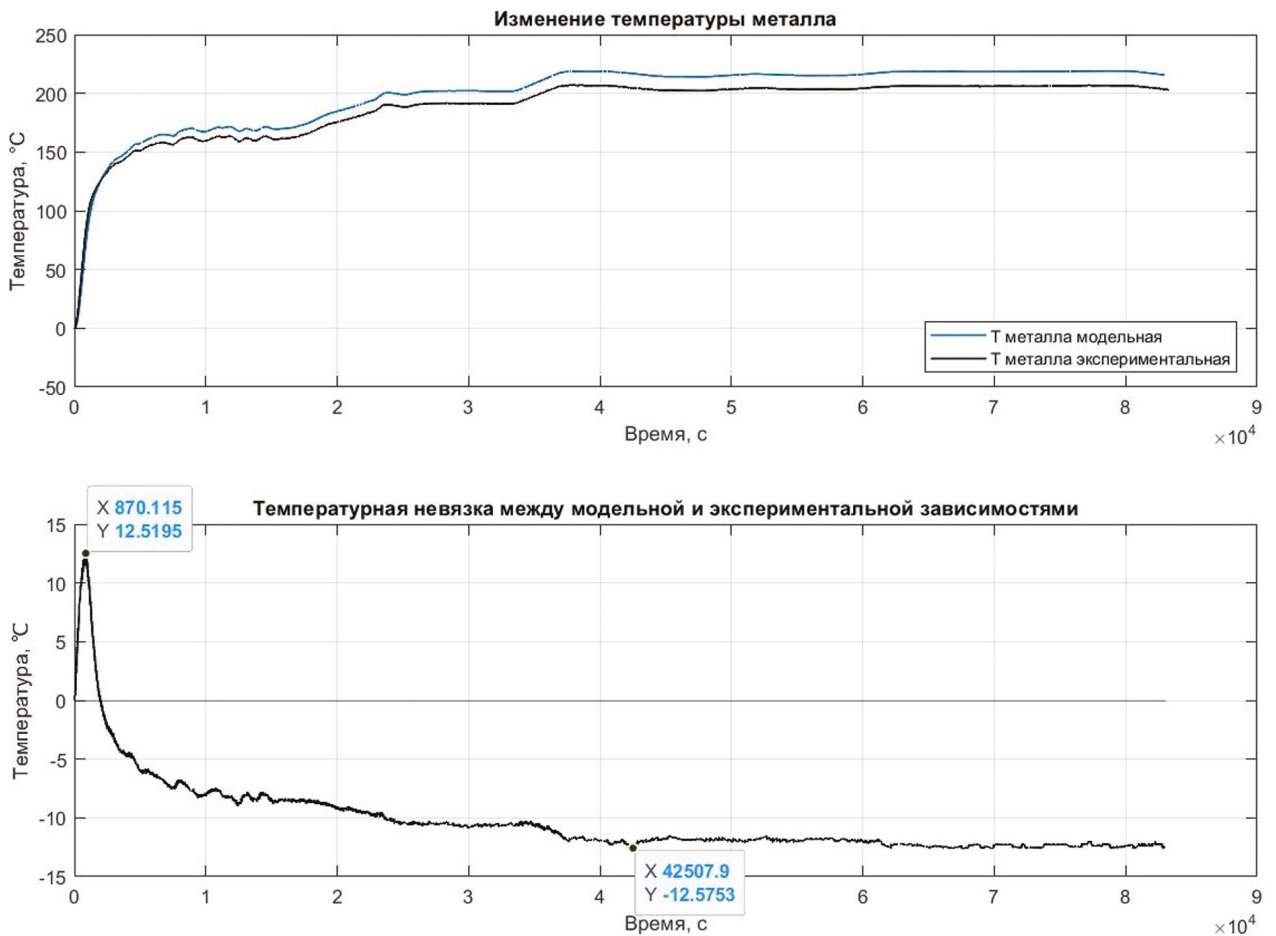


Рис. 1. Результаты, полученные на основе структурного представления

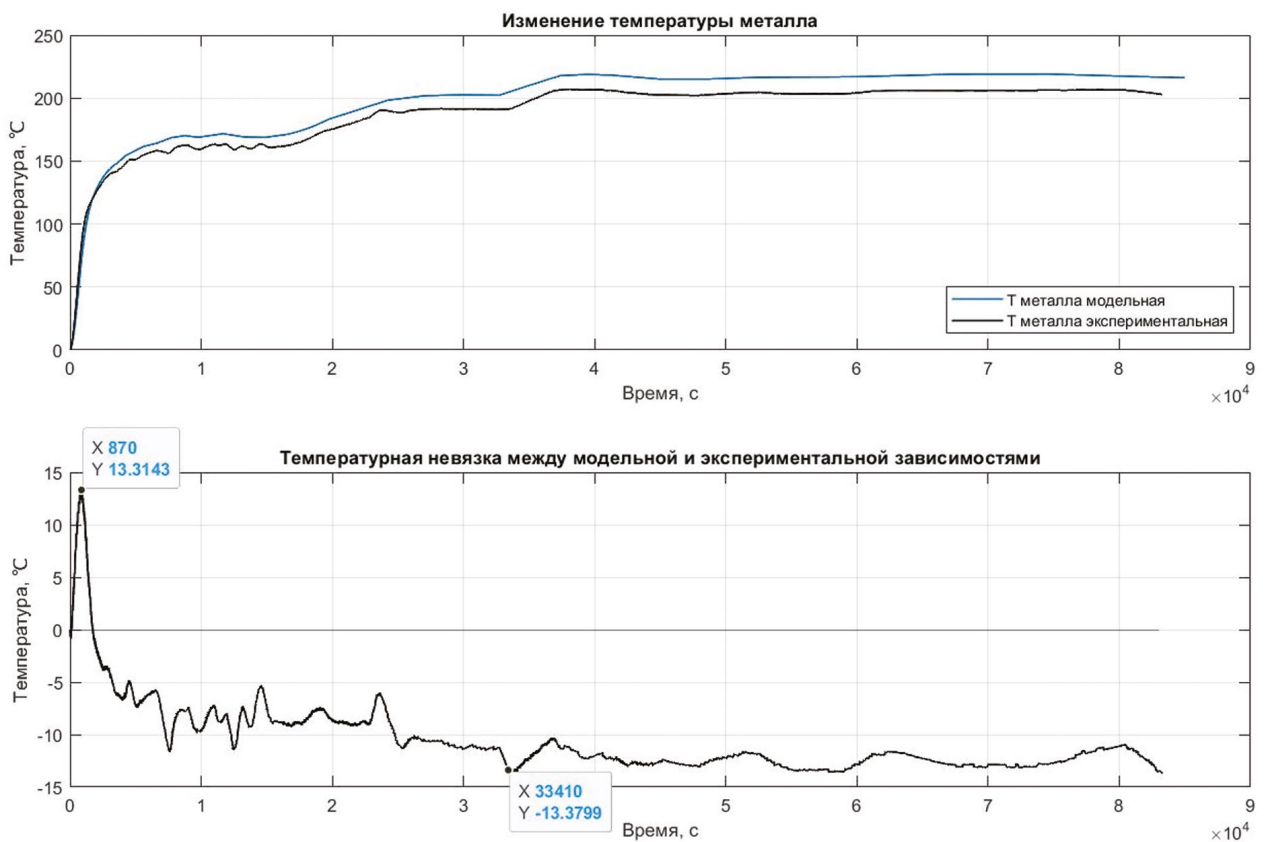


Рис. 2. Результаты, полученные на основе численного моделирования

На рис. 1 показаны результаты моделирования описанного процесса теплопроводности в программном пакете MATLAB Simulink, а также кривая, описывающая экспериментальные данные.

В результате идентификации был найден коэффициент конвективного теплообмена $\alpha = 620 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, обеспечивающий выполнение условия альтернанса (рис. 1).

Моделирование уравнения теплопроводности также может быть выполнено численными методами. Модуль «Heat Transfer in Solids» в программном пакете «Comsol Multiphysics» позволяет моделировать тепловые потоки, используя метод конечных элементов, заключающийся в аппроксимации сложных математических задач и уравнений путем разбиения анализируемой области на более простые и небольшие части, называемые конечными элементами.

В ходе моделирования приведенного процесса теплопроводности получены результаты, представленные на рис. 2.

Согласно проведенной идентификации коэффициент конвективного теплообмена равен $\alpha = 620 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (рис. 2).

Выводы. В результате решения задачи минимаксной оптимизации на основе структурного представления процесса теплопроводности и его численного моделирования была проведена идентификация коэффициента конвективного теплообмена между рабочей средой и стенкой барабана котла.

Тем самым идентификация коэффициента теплоотдачи на основе минимаксной оптимизации показала удовлетворительную точность в обоих случаях. При этом численные модели, вследствие своей универсальности, могут быть применены к широкому спектру задач, в том числе к сложным и нелинейным уравнениям.

Ключевые слова: коэффициент конвективного теплообмена; процесс теплопроводности; идентификация; температура металла; минимаксный критерий оптимизации.

Список литературы

1. Рапопорт Э.Я. Структурное моделирование объектов и систем управления с распределенными параметрами. Москва: Высшая школа, 2003. 299 с.
2. Дилигенская А.Н. Решение линейной коэффициентной обратной задачи теплопроводности на основе альтернансного метода оптимизации // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2013. № 3. С. 198–202.

Сведения об авторе:

Любовь Владимировна Осянина — студентка, группа 4-ИАИТ-8, Институт автоматизации и информационных технологий; Самарский государственный технический университет, Самара, Россия. E-mail: osyanina_19@mail.ru

Сведения о научном руководителе:

Анна Николаевна Дилигенская — доктор технических наук, доцент; Самарский государственный технический университет, Самара, Россия. E-mail: adiligenskaya@mail.ru