

Параметрическая оптимизация в задачах технической диагностики теплотехнического оборудования

А. Н. Дилигенская, Л. В. Осянина

Самарский государственный технический университет

E-mail: adiligenskaya@mail.ru

Аннотация. Методы параметрической оптимизации использованы для диагностики состояния теплоэнергетического оборудования. Моделирование тепловых объектов проводится с учётом пространственно-временного изменения температурного состояния. Значения ненаблюдаемых коэффициентов теплообмена найдены из решения обратных задач технологической теплофизики при условии достижения равномерного приближения модельного состояния к экспериментальной информации. Рассмотрены основные аспекты, возникающие при решении прикладных задач параметрической идентификации.

Ключевые слова: параметрическая оптимизация, ошибка равномерного приближения, объекты с распределёнными параметрами, котловое оборудование

I. ВВЕДЕНИЕ

Методы структурно-параметрической идентификации на основе минимаксной оптимизации [1, 2] могут быть использованы для контроля и диагностики состояния оборудования и для определения подлежащих непосредственному измерению параметров технологических процессов. Для обеспечения надёжной и безаварийной работы теплоэнергетического оборудования в системах автоматизированного управления предусмотрен контроль основных величин. При этом ряд значимых параметров, таких как коэффициенты теплообмена, напрямую не могут быть измерены. Контроль коэффициентов теплообмена позволяет поддерживать целостность и работоспособность теплообменного оборудования, следить за бездефектным состоянием поверхностей теплообмена и способствует повышению эффективности процесса производства тепла. Для их определения применяются разные подходы [3–6]. Одним из действенных инструментов являются методы оптимизации систем с распределёнными параметрами [7–9], позволяющие находить значения неконтролируемых величин в результате решения обратных задач технологической теплофизики [3, 4, 10, 11] на основе доступной информации автоматизированной системы управления (АСУ ТП).

Методы теории оптимального управления системами и объектами с распределёнными параметрами (ОРП) [7, 12], применённые к решению обратных задач, позволяют осуществлять минимизацию критерия качества на множествах возможных решений, соответствующих номинальным режимам работы теплотехнического оборудования. Выбор класса решения в виде компактного множества формально является этапом структурной идентификации [1, 13], задаёт характер искомой характеристики процесса и позволяет свести обратную задачу к условно корректной. Последующее

решение производится методами параметрической оптимизации и осуществляет минимизацию максимального рассогласования между регистрируемыми АСУ ТП значениями технологических параметров и функций и соответствующими им модельными кривыми [2, 14]. Такой критерий соответствует оцениванию температурной невязки в равномерной метрике.

II. ПОСТАНОВКА И ОПТИМИЗАЦИЯ В ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Выбор математической модели для описания теплообменных процессов в котловом оборудовании в процессе подготовки пароводяной смеси производится на основе базового уравнения теплопроводности (уравнения математической физики параболического типа)

$$\frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial t} = a \nabla^2 T(\mathbf{x}, t), \mathbf{x} \in \Gamma, t \in (0, t^*], \quad (1)$$

$$T(\mathbf{x}, 0) = T_0(\mathbf{x}); \pm \lambda \frac{\partial T(\mathbf{x}, t)}{\partial n} = \alpha_i (T(\bar{\mathbf{x}}, t) - T_{ci}(t)), i = 1, 2. \quad (2)$$

Конкретный вид математической модели определяется с учетом факторов, среди которых главными являются следующие:

- Пространственная размерность $\mathbf{x} \in \{R^1, R^2\}$ моделируемого ОРП, что позволяет учитывать неравномерность температурного распределения $T(\mathbf{x}, t)$ только по толщине стенки барабана котла или также вдоль неё;
- Выбор аналитической модели (1), позволяющей использовать решение в удобной для анализа форме, или численной модели, принимающей во внимание основные нелинейности, такие как температурные зависимости теплофизических параметров $a = a(T)$;
- Вид граничных условий (2), позволяющих рассматривать задачу в условиях $\alpha_1 = 0$ отсутствия теплообмена на внешней границе барабана котла или при его учете $\alpha_1 \neq 0$.

Вне зависимости от конкретного вида используемой модели (1), (2) методика определения неизвестных характеристик и параметров теплофизического процесса остается неизменной.

Одним из базовых параметров, обеспечивающих безопасную эксплуатацию котлового оборудования,

является коэффициент конвективного теплообмена α между внутренней поверхностью барабана котла и пароводяной смесью, для определения которого применяются различные методики [3–6]. В работе использовано решение обратной задачи теплопроводности (ОЗТ) на базе минимаксной оптимизации [2, 12, 14]. Информация, регистрируемая АСУ ТП, используется в качестве входных данных для ОЗТ. Так, в качестве функции состояния $T(\mathbf{x}, t)$ в уравнении (1) может рассматриваться температура металла барабана высокого давления в одной из регистрируемых с помощью термопар точек контроля $\mathbf{x}^*$ на внешней поверхности барабана, а в качестве температуры среды $T_c(t)$ в законе конвективного теплообмена в граничных условиях (2) использована температура воды на входе в испаритель.

Выбор математического оператора f , задающего характер изменения искомого коэффициента $\alpha = f(\Delta) \in V$, осуществляется на основе очевидных физических соображений о сущности теплового процесса, исключающего, как правило, резкие скачки характеристик, на основе информации о поведении контролируемых величин, с учетом требований к точности решения задачи.

Методика минимаксной оптимизации позволяет решать обратные задачи технологической теплофизики на множествах корректности (компактных множествах), задаваемых в зависимости от режима функционирования. Тем самым, в качестве модельного оператора выбирается какая-либо из возможных физически обоснованных математических зависимостей, характеризуемая вектором параметров $\Delta \in R^N$, принадлежащая соответствующему компактному множеству V . Исходная коэффициентная ОЗТ в экстремальной постановке сводится к задаче полубесконечной оптимизации с минимаксным критерием качества

$$I(\Delta) = \max_{t \in [0, t^*]} |T^*(\mathbf{x}^*, t) - T_M(\mathbf{x}^*, t, \Delta)| \rightarrow \min_{\Delta} . \quad (3)$$

Последующее решение задачи (3) на базе минимаксной оптимизации [2, 12, 14] с использованием альтернативных соотношений, сформулированных для оптимальной конфигурации температурной невязки $T^*(t) - T_M(\mathbf{x}^*, t, \Delta)$, позволит найти значения коэффициентов конвективного теплообмена на выбранных множествах корректности.

III. ОСОБЕННОСТИ МИНИМАКСНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ В ПРИКЛАДНЫХ ОБРАТНЫХ ЗАДАЧАХ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ

Обоснованный выбор компактного множества решений $V^{(N)} : \alpha = \alpha(\Delta), \Delta = \Delta^{(N)}$, соответствующего рабочему режиму и характеру исследуемых процессов, является существенным фактором адекватного решения ОЗТ.

При использовании данных АСУ ТП, полученных в типовых режимах функционирования котлового оборудования, таких как холодный запуск, горячий запуск или останов, для поиска коэффициентов теплоотдачи $\alpha = \alpha(\Delta^{(N)})$ можно рассматривать простейшие типовые классы решения: множества постоянных, линейных, кусочно-линейных или

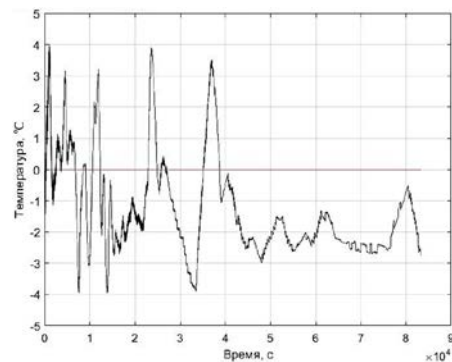
экспоненциальных функций. Если в поведении исходных данных наблюдается более сложная динамика, то идентификация проводится на основе последовательной параметрической оптимизации при использовании кусочно-параболических или полиномиальных зависимостей, сходящихся с увеличением числа учитываемых параметров N к искомому решению [2, 14]. Если характер поведения данных неочевиден, можно рассмотреть несколько возможных классов решений и выбрать наилучший вариант на основе заданного функционала.

Другим определяющим аспектом является действие возмущений, к наиболее существенным среди которых относится погрешность измерительных средств. Влияние возмущающих факторов приводит к изменению оптимальной конфигурации невязки, и как следствие к сложности или невозможности распознавания точек альтернанса на ней. В таком случае задача решается в условиях неполноты информации, выражающейся в интервальных неопределенностях характеристик. Для получения гарантированного качества идентификации, обеспечивающей точное попадание в искомый диапазон значений, применяется подход [15, 16], осуществляющий параметризацию совокупности температурных траекторий $T^\Omega(\mathbf{x}^*, t) = \{T_{\min}(t), \dots, T_{\max}(t)\}$. Весь ансамбль $T^\Omega(\mathbf{x}^*, t)$ соответствует всем возможным значениям искомого коэффициента $\alpha_{\min} \leq \alpha \leq \alpha_{\max}$. Вместо задачи (3) рассматривается задача параметрической оптимизации по отношению к полученному множеству реализаций $T^\Omega(\mathbf{x}^*, t)$, каждая из которых характеризуется полнотой информации

$$I^0(\Delta) = \max_{\Omega} \left| \max_{t \in [0, t^*]} |T^\Omega(\mathbf{x}^*, t) - T_M(\mathbf{x}^*, t, \Delta)| \right| \rightarrow \min_{\Delta} . \quad (4)$$

Предельные значения $\alpha_{\min}, \alpha_{\max}$ обеспечивают решение задачи для максимально удаленных траекторий $T_{\min}(t), T_{\max}(t)$. Такой подход характеризуется определенной потерей качества, но обеспечивает гарантированный результат идентификации в условиях интервальных неопределенностей характеристик.

На рис. 1 представлены некоторые результаты идентификации коэффициента конвективной теплоотдачи в условиях достоверных данных (задача (3)) и неполноты экспериментальной информации (задача (4)) в классе постоянных функций.



а

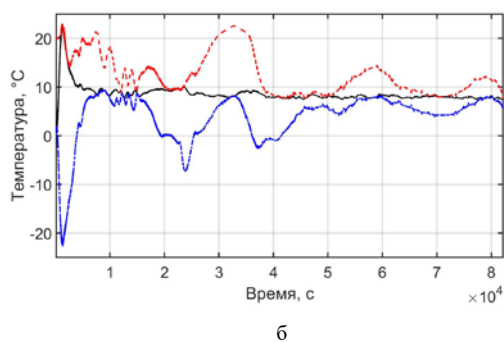


Рис. 1. Конфигурация температурной невязки в задачах оптимизации одной реализации (а) и ансамбля траекторий (б)

Тем самым, подход на основе минимаксной оптимизации может быть применен к решению прикладных задач инженерной теплофизики с использованием экспериментальных данных, полученных от АСУ ТП. На практике учет особенностей реальных задач и использование экспериментальной информации может приводить к существенным отклонениям в решении. Анализ основных факторов при параметрической идентификации характеристик котлового оборудования отражен на рис. 2.



Рис. 2. Основные аспекты при параметрической идентификации теплофизических характеристик (ТФХ)

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано применение подхода на базе параметрической оптимизации температурных состояний в равномерной метрике оценивания к решению практических задач инженерной теплофизики. Метод использован для оценки и диагностики температурного состояния котла барабанного типа теплообменного оборудования на основе реальных данных систем автоматизации на примере идентификации коэффициента конвективной теплоотдачи. Отражены основные факторы, которые могут оказывать существенное влияние на постановку и решение задачи оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Дилигенская А.Н., Золотарёва В.В. Структурно-параметрическая идентификация граничных условий в обратных задачах теплопроводности с использованием ансамбля классов корректности. Известия Саратовского университета. Серия «Математика. Механика. Информатика», 2025, т. 25, №2. С. 271–280. DOI: 10.18500/1816-9791-2025-25-2-271-280
- [2] Дилигенская А.Н. Метод минимаксной оптимизации в двумерной граничной обратной задаче теплопроводности. Теплофизика высоких температур, 2019, т.57, №2. С. 226–233. DOI: 10.1134/S0040364419020029
- [3] Алифанов О.М. Обратные задачи теплообмена. М.: Машиностроение, 1988. 280 с.
- [4] Ozisik M. N., Orlande H. R. B. Inverse Heat Transfer: Fundamentals and Applications. New York: Taylor, Francis, 2000. 350 p.
- [5] Зверев В.Г., Светашков А.А., Теплоухов А.В. Определение коэффициента теплоотдачи и температуры газового потока по измерениям температуры материала. Теплофизика высоких температур, 2021, т. 59, №1. С. 140–147. DOI: 10.31857/S004036442006023X
- [6] Albu A., Zubov V. Identification of the thermal conductivity coefficient in two dimension case. Optimization Letters, 2019, vol. 13, no. 8, pp. 1727–1743. DOI: 10.1007/s11590-018-1304-4.
- [7] Рапопорт Э.Я. Метод равномерной оптимизации нелинейных управляемых систем с распределенными параметрами. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Физико-математические науки», 2023, т. 27, №2. С. 270–291. DOI: 10.14498/vsgtu2006
- [8] Лившиц М.Ю. Постановочные проблемы задач оптимального управления объектами с распределенными координатами. Математические методы в технике и технологиях, 2015, №8. С. 49–52
- [9] Данилушкин И.А., Колпашиков С.А., Левин И.С. Численно-аналитическая модель температуры металла барабана парового котла. Вестник Самарского государственного технического университета. Серия «Технические науки», 2023, т. 31, №1. С. 21–33. DOI: 10.14498/tech.2023.1.2
- [10] Самарский А.А., Вабишев П.Н. Численные методы решения обратных задач математической физики. М.: ЛКИ, 2009. 480 с.
- [11] Beck J.V., Blackwell B., St. Clair C.R. Inverse Heat Conduction. Ill-posed Problems. New York: J. Wiley and Sons Publ., 1985. 308 p.
- [12] Рапопорт Э.Я. Альтернативный метод в прикладных задачах оптимизации. М.: Наука, 2000. 336 с.
- [13] Гинсберг К.С. Концептуальные основы методологии структурной идентификации для создания систем автоматического управления с требуемыми свойствами. Информационные технологии и вычислительные системы, 2019, № 1. С. 38–48. DOI: 10.14357/20718632190104
- [14] Дилигенская А.Н. Методы последовательной параметрической оптимизации в обратных задачах технологической теплофизики. Труды XXI Международной конференции «Проблемы управления и моделирования в сложных системах», 2019. С. 132–135.
- [15] Плешивцева Ю.Э., Рапопорт Э.Я. Оптимальное управление системами с распределенными параметрами в условиях интервальной неопределенности характеристик объекта. Известия Российской академии наук. Теория и системы управления, 2023, №1. С. 56–71. DOI: 10.31857/S0002338823010079
- [16] Дилигенская А.Н., Осянина Л.В. Идентификация процесса теплообмена котлового оборудования на основе возмущенных данных. Вестник Южно-Уральского государственного Университета. Серия «Энергетика», 2024, т. 24, №4. С. 86–93. DOI: 10.14529/power240410