ТЕПЛОВЫЕ ПРОЦЕССЫ В ИЗОЛИРУЮЩИХ КОНСТРУКЦИЯХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ И ИХ ИДЕНТИФИКАЦИЯ

А.Д. МАРКИН *(ДонНТУ, г. Донецк)*

Рассмотрены проблемы общего характера, возникающие при формулировке задачи идентификации нестационарных температурных полей в изолирующих конструкциях.

Общепринятая схема идентификации теплотехнологических процессов (ТТП) включает ряд этапов:

- подготовка исходной информации о характеристиках исследуемой системы и планирование экспериментальных исследований;
- экспериментальные исследования полей температур, скоростей тепловых нагрузок и др. с помощью различных датчиков;
- выбор (разработка) методов интерпретации экспериментально полученной информации для определения необходимых характеристик ТТП;
- обработка экспериментальных данных, анализ характеристик ТТП и оценка погрешности диагностики.

Эта схема предполагает использование в качестве ключевой – задачу диагностики нестационарных температурных полей в исследуемых объектах. Решение этой задачи дает возможность на всех этапах тепловой диагностики ТТП использовать в качестве базового – решение уравнения энергии, полученное численным или аналитическим методами. Решение задачи идентификации ТТП как в режиме контроля, так и в режиме управления на единой базе дает возможность широко использовать компьютерные технологии.

Одна из самых сложных проблем идентификации ТТП - идентификация нестационарных температурных полей в изолирующих конструкциях (с низкой теплопроводностью). В этом случае очевидной является необходимость учета конечной скорости распространения тепла.

Гиперболическая форма уравнения теплопроводности, предложенная Верноттоном [1], использовалась для анализа как прямых, так и обратных задач и предлагала введение дополнительного слагаемого в закон Фурье, которое должно было учитывать конечную скорость распространения тепла через некоторое фиктивное время релаксации. Однако, кроме общего теоретического анализа и отмеченной возможности [2] использования такого типа уравнений к анализу нестационарных тепловых процессов в разреженных и капиллярно-пористых средах, широкого распространения эта идея не получила. Объяснение общепринято связывать с малым влиянием дополнительного слагаемого $\tau_r \cdot \partial^2 t/\partial\tau^2$ на решение уравнения теплопроводности (например, для алюминия τ_r=10^{-11}с, [2]). Однако, решение традиционной формы уравнения Фурье, выведенного для бесконечно большой скорости распространения тепла, предполагает мгновенную температурную реакцию по всему объему исследуемого объекта на внешнее воздействие, что не соответствует ни реальности, ни здравому смыслу. Особенно заметно несоответствие традиционного решения объективной реальности при анализе тепловых процессов в материалах, используемых в черной металлургии для футеровки горна доменной печи, тепловой изоляции нагревательных колодцев, проходных печей и др.

Но следует отметить, что еще задолго до рассмотренного варианта гиперболизации уравнения теплопроводности на базе идей, изложенных в [1], [2], И.Д.Семыкиным [3] предложена «инженерная модель процесса теплопроводности». Учет конечной скорости распространения тепла и предложенная модель основаны на рассмотрении двух стадий нагрева. На первом этапе подводимое тепло постепенно проникает вглубь, пока толщина прогретого слоя $L(\tau)$ не будет характеризовать все сечение. В этот момент времени τ_0 заканчивается первый (инерционный) период. В настоящее время разработан ряд приближенных методов решения задач нестационарной теплопроводности, базирующихся на представлении единого (по Фурье) процесса в виде двух этапов. Из этих «методов термического слоя» [2] наиболее известны методы Т.Гудмена, А.И.Вейника, Э.М.Гольдфарба, М.Е.Швеца, М.Био и др.

Несмотря на принципиальную возможность учета конечной скорости распространения тепла, предлагаемые аналитические (приближенные) методы анализа ТТП имеют общий существенный недостаток: их применимость ограничена как простейшими геометрическими формами (пластина, цилиндр, сфера), так и достаточно простыми граничными условиями.

В связи с этим представляется целесообразной модификация уравнения Фурье на базе идей, отличных от идеи Верноттона.

. Рассмотрим вариант гиперболизации уравнения переноса, который можно рассматривать как один из этапов численной алгоритмизации задачи анализа теплообмена на базе закона сохранения энергии

$$\rho C_p \frac{\partial t}{\partial \tau} dV = \sum_{i=1}^{n} q_i \cdot ds_i + q_V \cdot dV \quad , \tag{1}$$

где ρ - плотность; C_p – теплоемкость; t – температура; τ - время; V – объем; q_i – плотности тепловых потоков, действующих на площадки S_i; q_V – объемные источники тепла.

Уравнение (1) написано для элементарного объема dV и предполагает мгновенное изменение среднеобъемной температуры за интервал времени $\Delta\tau$. Для учета конечной скорости этого процесса рассмотрим уравнение (1) не просто относительно среднеобъемной температуры *t(τ)* , а относительно среднеобъемновременной температуры

$$\bar{t} = \frac{t(\tau) + t(\tau + \Delta\tau)}{2} \tag{2}$$

Разлагая в ряд Тейлора *t(τ)* и ограничиваясь первыми двумя слагаемыми, получаем:

$$t(\tau + \Delta\tau) \approx t + \frac{\partial t}{\partial \tau} \frac{\Delta\tau}{1!} \tag{3}$$

Таким образом, среднеобъемновременная температура определяется как

$$\bar{t} = t + \frac{\Delta\tau}{2} \cdot \frac{\partial t}{\partial \tau} \tag{4}$$

В окончательном виде после подстановки полученного выражения (4) в уравнение закона сохранения (1) с учетом векторной формы закона Фурье $\bar{q} = -\lambda \cdot \frac{\partial t}{\partial n}$ модифицированное уравнение теплопроводности будет иметь вид:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} + \frac{\Delta\tau}{2} \frac{\partial^2 t}{\partial \tau^2} \right) = div(\lambda gradt) + q_V, \tag{5}$$

где λ – коэффициент теплопроводности.

Получена гиперболическая формула уравнения теплопроводности, базирующаяся на простых физических соображениях и учитывающая конечную скорость распространения тепла без введения понятия «время релаксации».

Уравнение (5) позволяет анализировать задачи нестационарной теплопроводности для тел любой геометрической формы и любых граничных условий.

Адекватность решения анализируемым процессам подтверждена его сравнением с решениями ряда модельных задач, полученными «методами термического слоя».

Список литературы

1. Vernotton P. La nouvelle equation de la chaleur/ Journ. de la chaleur, 1961.
2. Лыков А.В. Теория теплопроводности/ Высшая школа, Москва, 1967.-600с.
3. Семикин И.Д. Теоретические основы расчета нагревательных печей и колодцев. /Сталь, 1937, №11-12, с.29-42.