АДАПТАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ТЕПЛОПЕРЕНОСА ДЛЯ СЕТОЧНОЙ МОДЕЛИ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА СТАЛИ

Жуков П. И.[1], Глущенко А. И.[2]
(*Старооскольский технологический институт им. А.А. Угарова* (*филиал*) *НИТУ «МИСиС», Старый Оскол*)
Фомин А. В.[3]
(*АО Оскольский электрометаллургический комбинат им. А.А. Угарова*)

Процессы нестационарного теплообмена достаточно широко распространены в применяемых в промышленности технологических агрегатах. Нестационарность чаще всего возникает при широких температурных диапазонах нагрева материала в печах, примером которых может являться нагрев стальных заготовок перед механической обработкой (прокаткой) в металлургии. В таком случае полезно было бы иметь модель данного процесса, так как тепловая обработка – энергоемкий процесс. Наличие модели, способной спрогнозировать температуру нагреваемого объекта еще до того, как сам процесс завершится, позволит решить обратную задачу оптимизации и найти наиболее оптимальные кривые расходов энергоносителя для печи. Классическим подходом к решению данной проблемы является построение конечно-разностной (сеточной) модели нестационарного теплопереноса, однако данная модель требует адаптации. То есть необходимо найти конечные виды зависимости теплоемкости, теплопроводности и плотности от температуры для нагреваемого объекта. Данные параметры зависят от физико-химических свойств нагреваемого металла (марки стали). На реальных производствах обычно одинаково нагревают схожие по свойствам марки (группы марок). В данной работе авторы рассматривают подходы к нахождению температурной зависимости для трех упомянутых выше параметров теплообмена при помощи аппроксимации их эмпирических дискретных замеров с помощью регрессионных моделей для групп марок стали. В результате установлено, что усреднение коэффициентов полученных отдельных регрессионных моделей для конкретных марок стали в группе эффективнее усреднения самих исходных дискретных значений параметров теплообмена по маркам стали в группе в рамках температурных интервалов.

---

[1] *Пётр Игоревич Жуков, аспирант* (Zhukov.petr86@yandex.ru).
[2] *Антон Игоревич Глущенко, д.т.н., доцент* (strondutt@mail.ru).
[3] *Андрей Вячеславович Фомин, к.т.н., ведущий инженер-программист* (verner444@yandex.ru).

Ключевые слова: адаптация, нестационарный теплоперенос, регрессионные зависимости коэффициентов теплообмена.

1. Введение

Наиболее распространенным типом термодинамического процесса в промышленности является нагрев. В данном случае под нагревом необходимо понимать тепловую обработку материала без полного фазового перехода первого рода (т.е. без смены агрегатного состояния нагреваемого вещества). Принцип нагрева заключается в передаче энергии от нагревающей среды к нагреваемому объекту в температурных условиях до достижения твердожидкого состояния (т.е. нагрева до температуры, находящейся между линиями солидус и ликвидус).

Наиболее часто нагреваемым объектом в тяжелой промышленности (в том числе и в металлургии) являются разнообразные стальные заготовки, выполненные из углеродистых или легированных сталей. Конечной целью нагрева здесь является снижение коэффициента сопротивления деформации, которое позволяет затем обрабатывать такие заготовки давлением или любым другим механическим воздействием для придания конечной формы. Для реализации подобной тепловой обработки используется особый класс технологических объектов (ТО), называемых печами нагрева.

В контексте реального производства, как правило, нагреваются стальные заготовки различного химико-физического состава, называемого маркой стали. Температура твердожидкой фазы в таком случае не является константой и находится выше 1000 градусов Цельсия. Нагрев до подобных температур является крайне энергозатратным, что выражается в высокой энергоемкости печей нагрева, и это делает вопрос повышения их энергоэффективности особо актуальным [2, 3].

Предполагается, что повысить эффективность потребления энергоносителей для печей любого типа нагрева можно при наличии математической модели самого процесса теплообмена. При моделировании температуры нагреваемого объекта к концу термодинамического процесса еще до того, как сам процесс завершится, появляется возможность решить задачу оптимизации и получить более оптимальные кривые расхода энергоносителя. Моделирование температуры в таком случае будем называть прямой задачей, а нахождение оптимальных кривых расхода энергоресурса – обратной.

Классическим подходом для решения прямой задачи является построение конечно-разностных (сеточных) моделей нестационарной теплопроводности. Авторами в работах [6, 7] была предложена альтернатива такого подхода, основанная на предположении, что дискретные информационные потоки о контексте нагрева от самого объекта (от систем управления и датчиков объекта) могут содержать все необходимые зависимости для описания нестационарного теплопереноса при помощи моделей машинного обучения. Далее была поставлена задача сравнить классические сеточные модели с предложенными моделями на данных. Для этого было необходимо построить адекватную реальному процессу конечно-разностную модель, чему и посвящена данная работа.

2. Конечно-разностная модель теплопереноса

В тепловых промышленных агрегатах установившийся технологический режим работы может быть описан стационарным теплопереносом. Смена режима чаще всего будет сопровождаться некоторой динамикой температуры нагревающей среды от времени, что потребует описания процесса передачи тепла в нестационарной форме.

Однако данные рассуждения справедливы только для малых интервалов температур. В случае нагрева до высоких значений температур (900 и более градусов Цельсия) к пространственной нелинейности теплофизических коэффициентов нагреваемого объекта еще добавляется температурная нелинейность [9], требующая строго нестационарной формы описания процесса.

Когда речь идет о нагреве изотропных и однородных по составу объектов, то пространственной нелинейностью можно пренебречь. Это справедливо и для нагрева стальных заготовок. В этом же случае нельзя пренебречь температурной нелинейностью, которая, к слову, изучена для высоких температур недостаточно [5].

Для моделирования нестационарного теплопереноса используется одноименное дифференциальное уравнение, устанавливающее однозначное соответствие между величиной теплового потока и градиентом температурного поля в объекте.

В общем виде уравнение для прямоугольного двумерного по пространству случая будет иметь вид

$$(1)\quad \frac{\partial T}{\partial \tau} = \frac{\lambda}{\rho * c}\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right),$$

где T – температура, К; λ – коэффициент теплопроводности заготовки, Вт/(м*К), ρ – плотность заготовки, кг/м^3; c – коэффициент теплоемкости заготовки, Дж/(кг*К); x и y соответственно описывают двумерное пространство, в котором моделируется температурное поле.

Имея уравнение (1), можно сформулировать конечную краевую задачу. Для этого необходимо задать условия однозначности (краевые условия). Для печей нагрева – как пламенных, так и не контактных электропечей – справедливо утверждение, что, нагрев происходит в некоторой газовой среде (в частном случае можно ее назвать воздушной средой). Конвективный теплообмен может быть определен из закона Ньютона – Рихмана (первое слагаемое правой части уравнения (2)). При этом нагрев в рамках широких температурных интервалов, о котором ведется речь, предполагает, что часть теплообмена будет происходить от более нагретых объектов в печах путем излучения. Нагрев излучением может быть описан законом Стефана – Больцмана (второе слагаемое правой части уравнения (2)). На основании вышеизложенного можно определить граничное условие третьего рода для конвективно-индуктивного теплообмена:

$$(2)\quad -\lambda\frac{\partial T}{\partial \tau} = \alpha(T_{\text{тела}} - T_{\text{среды}}) + \varepsilon\sigma(T_{\text{тела}}^4 - T_{\text{среды}}^4)\,,$$

где α – коэффициент теплообмена с нагревающей средой, Вт/(м^2*К); ε – приведенная степень черноты поверхности; σ – постоянная Стефана – Больцмана.

Пусть моделируется нестационарный процесс теплообмена в прямоугольном сечении уравнением (1). На границах тела слева и справа происходит конвективно-индуктивный теплообмен, в соответствии с уравнением (2). Таким образом задача в двумерной постановке может быть изображена в виде, приведенном на рис. 1. Тогда начальные условия задачи представлены в следующем виде: $t = 0$: $T = T_0$; $0 \le x \le L$; $0 \le y \le H$. Здесь L – ширина сечения нагреваемого объекта; H – длина сечения; T_0 – начальная температура.

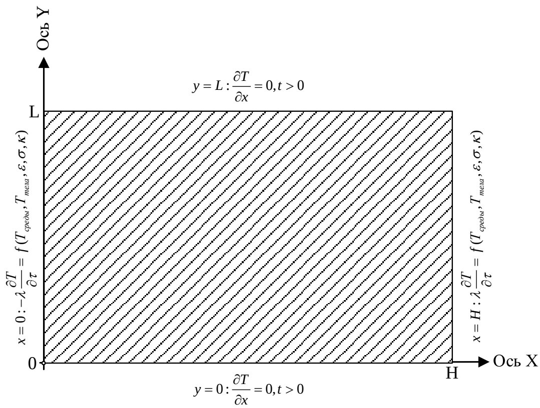

Рис. 1. Двумерная краевая задача нестационарной теплопроводности для прямоугольного сечения

Задача в такой постановке может быть решена методами численного дифференцирования, построением модели конечных разностей. В данной работе не рассматриваются методы и весь путь выражения сеточной модели из краевой задачи, которые наиболее полно изложены в [10–11].

Для решения двумерной задачи по пространству и одномерной по времени при построении сеточной модели потребуется прибегнуть к покоординатному расщеплению и переходу от одной двумерной задачи к двум локально одномерным. Данный подход подробно описан в еще одной работе А.А. Самарского [4]. Описанная выше задача и модель, которую можно получить, применив численные методы дифференцирования, представляет собой классический подход к моделированию нестационарного теплопереноса. Построение данной модели было необходимо для проведения сравнения с моделью того же процесса, но полученной непосредственно на основе анализа данных с теплового агрегата и применения к ним методов машинного обучения. Более подробно про данные модели изложено в других работах авторов [6, 7].

Описанная ранее только граничными и начальными условиями конечно-разностная модель задает контекст нагрева, что является недостаточным, когда речь идет о нагреве объектов до высоких температур. Отсутствие учета температурной динамики (адаптации) для параметров теплообмена (плотность ρ, теплоемкость c, теплопроводность λ), не позволяет говорить о достаточной адекватности модели.

В контексте нагрева стальных заготовок, однородных по составу, упомянутая выше динамика изучена недостаточно. Отсутствуют теоретические выкладки, позволяющие вычислить значения данных коэффициентов в любой момент времени, ввиду сложности зависимости теплообменных коэффициентов от внутренних физико-химических взаимодействий в объекте.

Решением данной проблемы является аппроксимация дискретных экспериментальных замеров (чаще всего сведенных в инженерные таблицы металлургов) при помощи разнообразных степенных функций, однако данный подход, по сути своей, требует отдельных решений для каждой марки стали. В реалиях современных производств, при потоковом выпуске продукции, требования по нагреву устанавливается сразу для групп марок стали, что позволяет взглянуть на данную проблему немного под другим углом. В рамках данной работы было решено провести сравнения и попытаться определить, можно ли усреднить при помощи степенных зависимостей целые группы однородных по составу объектов (марок стали) и насколько сильно это повлияет на точность конечно-разностной модели относительно ситуации с отдельными зависимостями для каждой марки стали.

3. Проблемы адаптации модели нестационарного теплообмена

Основная проблема здесь может быть выражена математически (3) и интерпретирована как необходимость нахождения таких правых частей системы, которые бы удовлетворяли заданным условиям качества модели:

$$(3)\quad \begin{cases} \lambda = f_\lambda(T), \\ c = f_c(T), \\ \rho = f_\rho(T). \end{cases}$$

Одним из путей решения поставленной проблемы может служить аппроксимация эмпирических дискретных табличных данных при помощи регрессионных моделей [12].

В рамках данной работы исследовались углеродистые стали следующих марок: «Сталь 08»; «Сталь 08кп»; «Сталь 20»; «Сталь 40»; «Сталь у12»; «Сталь у8». Данные марки стали схожи по составу и, следовательно, схожи по динамике зависимости коэффициентов теплообмена от температуры. Исходные табличные данные для аппроксимации параметров (3) взяты из [1, 8].

В процессе экспериментов с различными видами регрессионных уравнений из группы обобщенных линейных регрессий различного вида было установлено, что наименьшую ошибку аппроксимации (метрикой MSE) дает полиномиальная регрессия третьей степени со смешенным степенным эффектом:

$$(4)\quad f(y) = \beta_0 + \beta_1 y + \beta_2 y^2 + \beta_3 y^3 + \beta_4 y^2 y^3 + \varepsilon\ .$$

Здесь β_i – это регрессионные коэффициенты, y –это температура T, °C; ε – ошибка модели. Экспериментальная проверка показала, что данный вид зависимости может быть использован для описания температурного отношения по плотности. Для теплоемкости наиболее эффективным будет использовать кусочно-заданную функцию вида (5), а для теплопроводности – полиномиальную регрессию (4), но без смешенных эффектов:

$$(5)\quad \begin{cases} T < 700:\ f(y) = \beta_0^1 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i^1 y^i + \beta_4^1 y^2 y^3, \\ T = 700:\ f(y) = C_{700}, \\ T < 700:\ f(y) = \beta_0^2 + \sum_{i=1}^{3} \beta_i^2 y^i + \beta_4^2 y^2 y^3. \end{cases}$$

В результате для каждого из исследуемых параметров (3) в рамках каждой из марок стали были получены регрессионные зависимости. Пример аппроксимации зависимости плотности от температуры представлен на рис. 2.

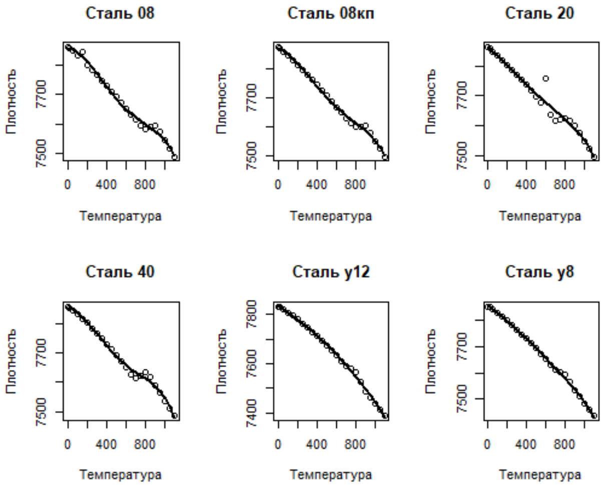

Рис.2. Регрессионные уравнения для отдельных марок стали (*пустые круги – табличные значения; линия – аппроксимация регрессионным уравнением*)

Основная задача данного исследования заключается в нахождении усредненных функциональных зависимостей для всей группы, а не для отдельных марок стали. Решить данную проблему можно двумя способами: 1) усреднить все исходные табличные значения исследуемых параметров теплообмена в рамках однотипных температурных интервалов (заданных в таблице); 2) усреднить коэффициенты конечных полученных регрессионных моделей для отдельных марок между собой для рассматриваемой группы марок сталей.

В результате было решено рассмотреть оба варианта и проверить их эффективность. Первый подход. Усреднение значений теплофизических коэффициентов в рамках имеющихся температурных интервалов предполагает, что имеется матрица размерностью $M \times N$, где M – число марок стали; N – количество температурных окон, в которые замерялся тот или иной параметр системы (3). Температурные окна представляют собой ограниченные интервалы температурной шкалы от 20 до 1000 градусов Цельсия. Например, матрица усредненных значений коэффициента теплопроводности будет иметь вид (6). Аналогично и для других коэффициентов теплообмена:

$$\Lambda = \left\{ \left(T_j, \frac{\sum_{i=1}^{M} \lambda_i}{M} \right) | 1 < j \le N \right\}. \quad (6)$$

Второй подход. Путем усреднения моделей для отдельных марок были получены регрессионные зависимости для плотности (7), теплопроводности (8) и теплоемкости (9):

$$\begin{aligned} f(T) &= 7855,375 - 0,159T - 6,73 \cdot 10^{-4} T^2 + \\ &+ 7,3 \cdot 10^{-7} T^3 - 2,3 \cdot 10^{-13} T^2 T^3; \end{aligned} \quad (7)$$

$$f(T) = 65,5 - 0,052T - 2,1 \cdot 10^{-5} T^2 + 3,3 \cdot 10^{-8} T^3; \quad (8)$$

$$\begin{cases} T < 700: f(y) = 470 + 0,4T - 3 \cdot 10^{-4} T^2 + 8 \cdot 10^{-7} T^3, \\ T = 700: f(y) = 1571, \\ T < 700: f(y) = 636 - 16T - 0,02T^2 - 4,4 \cdot 10^{-6} T^3. \end{cases} \quad (9)$$

Для сравнения эффективности видов усреднения были выбраны три модели: 1) модель, адаптированная строго под «Сталь 20»; 2) модель, адаптированная под всю группу рассматриваемых марок стали, на основе (7)–(9); 3) модель с матрицами усредненных значений вида (6).Из систем управления печами нагрева были получены данные о 15 заготовках, описывающее весь фиксируемый контекст нагрева задачи (1)–(2) (температуры среды, время нагрева, итоговую температуру заготовки, измеренную пирометром в стане). Ошибка в градусах Цельсия была рассчитана при помощи критерия абсолютного среднего (MAE) (10) между данными с пирометра (как эталонными данными) и выходными данными моделей (h – это дистанция прогнозирования, e_i – ошибка прогноза на i-м шаге):

$$\text{MAE} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^{h} | e_i |. \quad (10)$$

Как следует из результатов, разница между адаптированной строго под «Сталь 20» моделью и моделью на усреднение коэффициентов регрессий незначительна.

Таблица 1. Результаты адаптации моделей при сравнении с эталоном (замером температуры пирометром)

Модель	**Ошибка, °С**
Под «Сталь 20»	16,9
Усредненная регрессия по группе марок	18,1
Усредненная по табличным коэффициентам	58

Использование усредненных значений в виде матриц природы (6) порождает закономерно большую ошибку из-за невозможности учесть динамику параметров за пределами табличных интервалов, так как табличные значения ограничиваются сверху 1000 градусов Цельсия, а искомая температура нагретой заготовки обычно составляет 1050–1100 градусов Цельсия.

4. Заключение

В рамках данной работы было установлено, что решить проблему множественности марок сталей при описании и моделировании процессов нестационарной теплопередачи можно путем усреднения коэффициентов регрессионных моделей для параметров теплообмена в рамках одной группы марок стали. Экспериментально были найдены регрессионные зависимости для углеродистых сталей и установлено, что такой подход вносит незначительную погрешность.

В дальнейшем предполагается использование изложенного подхода для адаптации модели нестационарного теплообмена и её сравнение с моделью, основанной на данных.

Литература

1. БАБИЧЕВ А.П. и др., *Физические величины: справочник* / Под ред. ИС Григорьева, Е.З. Мейлихова. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 1232 с.

2. БИРЮКОВ А.Б. *Энергоэффективность и качество тепловой обработки материалов в печах: Монография*. – Донецк: Ноулидж, 2012. – 247 с.
3. ВЕНДТ П., ШЕВЫРЕВ Д.А. *Возможности увеличения производительности и повышение энергетической эффективности* // Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии в промышленности. 100 лет отечественного проектирования металлургических печей. – 2016. – С. 11–31.
4. ГОЛОВИЗНИН В.М., САМАРСКИЙ А.А. *Разностная аппроксимация конвективного переноса с пространственным расщеплением временной производной* // Математическое моделирование. – 1998. – Т. 10, №1. – С. 86–100.
5. ГОЛОДНАЯ В.В., САВИН Е.С. *Нестационарная теплопроводность цепных структур при низких температурах* // Тонкие химические технологии. – 2017. – Т. 12, №4. – С. 91–97.
6. ЖУКОВ П.И., ГЛУЩЕНКО А.И., ФОМИН А.В. *Модель для прогнозирования температуры заготовки по ретроспекции ее нагрева на основе бустинга структуры* // Вестник Новосибирского государственного университета. Серия: Информационные технологии. – 2020. – Т. 18. – №4. – С. 11–27.
7. ЖУКОВ П.И., ГЛУЩЕНКО А.И., ФОМИН А.В. *Построение зависимости температуры непрерывно литой заготовки от ретроспекции её нагрева* // Системы управления и информационные технологии. – 2019. – №4(78). – С. 73–85.
8. КАЗАНЦЕВ Е. И. *Электрические промышленные печи: Справочное руководство для расчетов и проектирования: Учебное пособие.* – Металлургия, 1975. – 370 с.
9. ОЖЕРЕЛКОВА Л.М., САВИН Е.С. *Температурная зависимость нестационарной теплопроводности твердых тел* // Российский технологический журнал. – 2019. – Т. 7, №2. – С. 49–60.
10. САМАРСКИЙ А.А. *Введение в теорию разностных схем*. – 1971. – 553 с.
11. САМАРСКИЙ А.А., МИХАЙЛОВ А.П. *Математическое моделирование*. – Москва, ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 320 с.

12. СТАНКУС С.В. и др. *Коэффициенты теплопроводности нержавеющей стали 12Х18Н10Т в широком интервале температур* //Теплофизика высоких температур. – 2008. – Т. 46, №5. – С. 795–797.

ADAPTATION OF HEAT TRANSFER PARAMETERS OF STEEL TRANSIENT HEAT CONDUCTION GRID MODEL

Petr Zhukov, STI NUST "MISIS", Stary Oskol, postgraduate student (Zhukov.petr86@yandex.ru).
Anton Glushchenko, STI NUST "MISIS", Stary Oskol, Doctor of Sciences, docent (strondutt@mail.ru).
Andrey Fomin, Oskol Electrometallurgical Plant (OEMK) named after A.A. Ugarova, Candidate of Technical Sciences, lead software engineer (verner444@yandex.ru*)*

Abstract: *Processes of nonstationary heat transfer are quite widespread for technological units used in industry. Non-stationarity occurs most often due to wide temperature ranges of material heating in furnaces, an example of which is heating of steel billets before rolling in metallurgy. In such a case, it would be useful to have a model of this process since heat treating is an energy-intensive process. Having a model to predict the temperature of the heated object even before the process itself is completed, we will be able to solve the inverse optimization problem and find the most optimal energy consumption curves for the furnace. The classical approach to solve this problem is to develop a finite-difference (grid) model of nonstationary heat transfer, but such model requires adaptation. That is, it is necessary to find types of dependence of the heat capacity, thermal conductivity and density on the temperature for the heated object. These parameters depend on the physical and chemical properties of the heated metal (steel grade). In real productions, the similar grades (groups of grades) are usually heated in the same way. In this paper, the authors consider approaches to find the temperature dependence for the above three heat transfer parameters on the temperature by approximating their empirical discrete measurements using regression models for groups of steel grades. As a result, it is found that averaging the coefficients of the obtained individual regression models for each specific steel grade in the group is more effective than averaging the raw discrete values of the heat transfer parameters themselves by steel grades in the group within the temperature intervals.*

Keywords: adaptation, transient heat conduction, regressional dependence for heat-exchange coefficient.

УДК 536.37+519.651
ББК 22.192.2