



*It is shown that at modeling of metal heating processes in furnaces it is reasonable to determine source data in parameters, measurable and controllable in the operating process of aggregate.*

С. В. КОРНЕЕВ, П. Э. РАТНИКОВ, Д. В. МЕНДЕЛЕВ, БНТУ

УДК 621.331:536.33

## ФАКТОРЫ, ВЛИЯЮЩИЕ НА ТОЧНОСТЬ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В ПЕЧАХ

**Введение.** Математическое моделирование процессов нагрева металла призвано не только обеспечить совершенствование производственного процесса за счет определения оптимальных технологических параметров, но и помочь пониманию качественной картины протекания физических процессов, происходящих в металлургических агрегатах.

При современном уровне развития компьютерной техники и появлении средств мультифизического моделирования существенно изменяются подходы к самому процессу моделирования технологических процессов. При этом если для простых процессов обычно трудностей не возникает, то при построении сложных моделей, включающих учет взаимосвязанных тепловых, электромагнитных, гидродинамических и других явлений, помимо существенного увеличения времени расчетов, возможны ошибки, искажающие качественную картину взаимосвязи технологических параметров.

Основной задачей расчетов нагрева является определение времени нагрева объекта до необходимой температуры либо определение температуры объекта, достигаемой за конкретное время нагрева. Критерием окончания нагрева служит достижение объектом необходимой температуры поверхности (которую, как правило, можно контролировать) и допустимого перепада температур по сечению объекта. Если происходит нагрев под пластическую деформацию, а распределение тепловых потоков по поверхности симметричное, то фактическим критерием окончания нагрева является достижение центральной точки сечения необходимой температуры (диапазона температур) пластической деформации.

Вторая задача – определение энтальпий объектов, на основании чего находят требуемый расход топлива и коэффициент полезного действия нагревательного устройства (печи). Для данной задачи

актуальна погрешность средней по объему материала температуры.

Помимо приведенных задач, для повышения эффективности производства решают более сложные задачи оптимизации нагрева.

При выдаче из печи заготовки должны разогреться до температур обработки давлением  $T_M(\bar{r}, t_k) \approx T_{\text{вых}}$ , причем для обеспечения качества продукции максимальный перепад температур по сечению заготовки не должен превышать заданного максимального значения  $\Delta T_M(\bar{r}, t_k) \leq \Delta T_{\text{вых}}$ , а во время всего процесса нагрева – некоторого максимального значения  $\Delta T_M(\bar{r}, t) \leq \Delta T_{\text{нар}}(T_M)$  (зависит от предела текучести металла при заданной температуре) для недопущения пластических деформаций (искривления) заготовки или трещинообразования для «хрупких» марок стали.

Время нагрева заготовки  $t_k = L / \vartheta_M$  также определяется производительностью технологической линии. В связи с этим можно сформулировать задачу оптимизации работы нагревательной печи следующим образом: определить для нагревательной печи с заданными конструктивными параметрами (геометрические размеры, конструкция футеровки, система отопления печи, максимальная и минимальная производительность) и заданным временем нагрева заготовок  $t_k$  оптимальный режим работы горелок, соответствующий минимальному топливопотреблению и окалинообразованию (стоимость топлива + стоимость потерь металла с окалиной  $\rightarrow \min$ ) на единицу массы обрабатываемого металла при сохранении требуемых температурных условий  $T_M(\bar{r}, t_k) \approx T_{\text{вых}}$ ,  $\Delta T_M(\bar{r}, t_k) \leq \Delta T_{\text{вых}}$  и  $\Delta T_{M1}(\bar{r}, t) \leq \Delta T_{\text{нар}}(T_M)$ .

**Анализ источников ошибок, возникающих при моделировании тепловых процессов.** Для минимизации ошибок, возможных при моделировании, рассмотрим причины их возникновения.

1. Излишнее упрощение на этапе физического моделирования. Ключевым моментом при моделировании любых металлургических процессов является определение главных и второстепенных факторов, оказывающих влияние на исследуемые характеристики. На данном этапе важно найти приемлемую размерность решаемой задачи и основные механизмы теплообмена.

2. Излишнее усложнение модели. При наличии большого числа второстепенных факторов необходимо предварительно оценить их влияние на процесс и определить, какими из них можно пренебречь. Например, при радиационном нагреве металла в электрических печах естественной конвекцией можно пренебречь либо использовать постоянные значения коэффициентов теплоотдачи, рассчитанные отдельно. Для многих случаев достаточно использовать двумерную модель и при этом иметь погрешность, не превышающую погрешность из-за недостаточной информации о физических характеристиках материалов.

3. Недостаточность (неточность) информации о свойствах объектов. Актуально для термомеханических свойств сталей различных марок в зависимости от температуры при ограничениях на скорость нагрева из-за термических напряжений, а также теплофизических характеристик материалов при высоких температурах.

4. Ошибки, допущенные при формулировке модели. Ошибки возникают при переходе от физической модели к математической с использованием алгоритмов расчета. Данные ошибки выявляются при сопоставлении расчетных и экспериментальных данных, а также на основе тестовых задач, имеющих большой диапазон изменяемых параметров.

5. Погрешность расчетной программы. Данная погрешность всегда имеет место при численных расчетах, однако при правильном выборе алгоритмов и параметров она является несущественной.

**Размерность задачи.** Ключевым моментом, влияющим на точность моделирования процессов нагрева, является выбор размерности задачи. Рассмотрим влияние размерности задачи на решение внутренней задачи теплопроводности в нагреваемых заготовках.

В зависимости от конфигурации заготовок возможно решение как 3D-, так и 2D- и 1D-задач. Выбор данных задач определяется комплексом факторов, основными из которых являются необходимая точность и трудоемкость решения (затраты на построение модели и использование компьютерных ресурсов программой), а также необходимость ответственности размерности заготовок и печи.

Проиллюстрируем основные закономерности появления ошибок при понижении размерности задачи, представив параметры в безразмерном виде. Полагаем, что решение трехмерной задачи дает точное решение (без учета погрешностей численного решения, которыми из-за малости пренебрегаем). В процессах нагрева в печных агрегатах в большинстве случаев справедливо задание граничных условий III рода, которое можно записать в следующем виде:

$$-\lambda(T) \frac{\partial T(\tau)}{\partial \vec{n}} = \alpha(T)(T_c - T_n(\tau)).$$

Решая уравнение теплопроводности, для заданного числа  $Bi$  находим безразмерную температуру

$$\Theta_x = \frac{T_x - T_0}{T_c - T_0},$$

где  $T_x$  – искомая температура;  $T_0$  – начальная температура;  $T_c$  – температура греющей среды.

Определяем погрешность вычисления температуры  $\varepsilon(\Theta) = |\Theta(D) - \Theta(D-1)|$ . Здесь  $\Theta(D)$  – температура, полученная при решении задачи с размерностью  $D$ .

Основным критерием выбора размерности задачи применительно к условиям нагрева является отношение конечной температуры нагрева объекта к температуре среды теплоносителя либо температуре печи:

$$K_{mo} = T_x / T_T,$$

где  $T_x$  – расчетная температура объекта;  $T_T$  – температура теплоносителя.

Вторым критерием, влияющим на уровень погрешности и выбор размерности задачи, служит критерий соотношений геометрических размеров по осям координат:

$$K_n = n = L_i / R.$$

Здесь  $L_i$  – длина или ширина объекта в зависимости от рассматриваемой задачи 3D или 2D;  $R$  – характерный размер по сечению (наименьший из размеров по трем координатам).

Для определения текущих значений погрешности на протяжении процесса нагрева (охлаждения) необходимо также использование критериев  $Bi$  и  $Fo$ .

На рис. 1 показаны уровни погрешности расчета температуры центра призматического объекта с сечением в виде квадрата при понижении размерности задачи 3D→1D для граничных условий III рода при  $Bi = 1$  и  $n = 1$  в случае его нагрева до температуры, равной половине температуры среды и 0,9 температуры среды. В первом случае от-

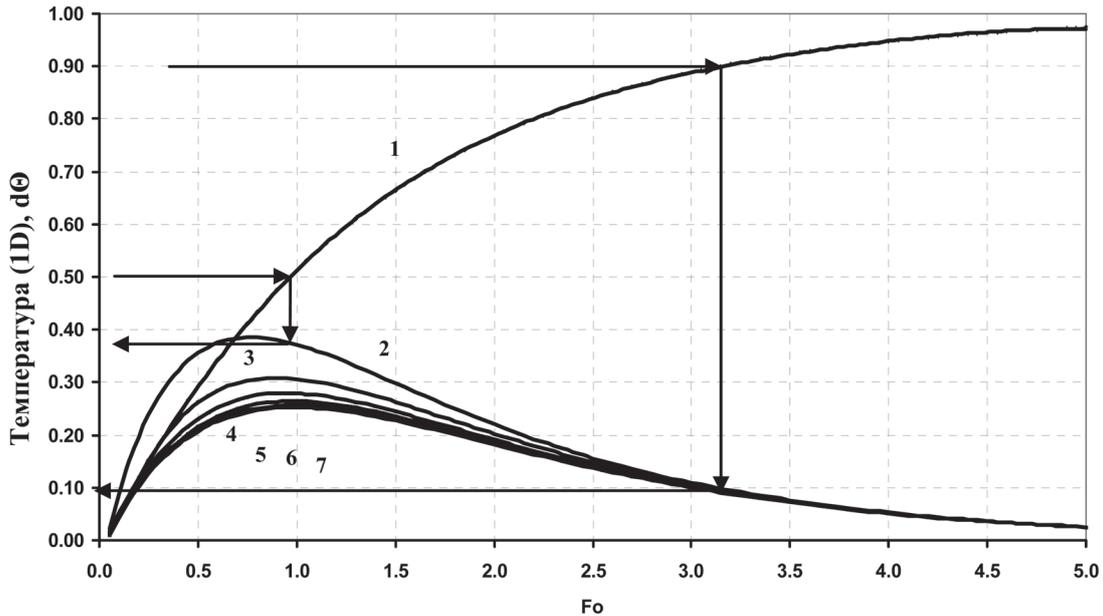


Рис. 1. Зависимость погрешности понижения размерности задачи 3D→1D для граничных условий III рода при  $Bi = 1$  и  $n = 1-6$  (иллюстрация влияния критерия  $K_{mo}$  на величину погрешности): 1 – температура центра объекта, полученная при решении одномерной задачи; относительные погрешности: 2 –  $n = 1$ ; 3 – 2; 4 – 3; 5 – 4; 6 – 5; 7 – 6

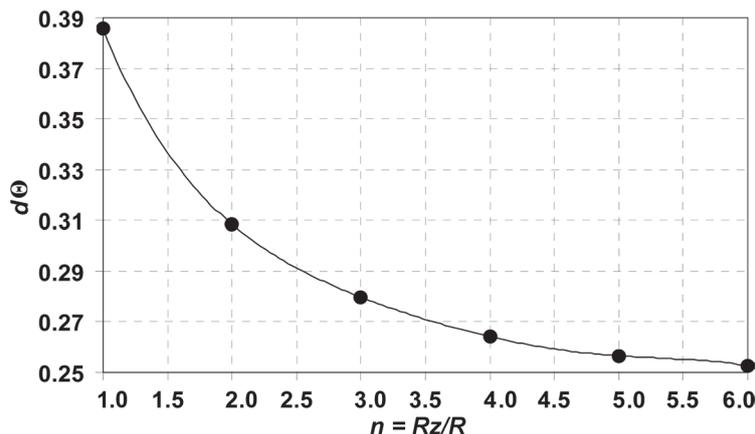


Рис. 2. Зависимость максимальной погрешности понижения размерности задачи 3D→1D для граничных условий III рода при  $Bi = 1$  от длины объекта квадратного поперечного сечения

носительная погрешность составляет 0,375, а во втором – 0,1.

При изменении числа Био относительная погрешность не изменяется.

Таким образом, данный критерий, связанный с условиями нагрева и показывающий отношение искомой температуры нагрева к температуре теплоносителя, является основным при анализе применимости той или иной модели нагрева или охлаждения.

На рис. 2 показана зависимость максимальной погрешности понижения размерности задачи 3D→1D для граничных условий III рода при  $Bi = 1$  от длины объекта квадратного поперечного сечения.

Таким образом, при отношении длины заготовки к характерному размеру более пяти раз, можно понижать размерность задачи при моделировании нагрева без существенной потери точности.

На рис. 3 показана зависимость относительной погрешности понижения размерности задачи от времени нагрева в виде числа Фурье.

Для зависимости погрешности понижения размерности задачи от числа Фурье (времени) характерен максимум, положение которого зависит от критерия Био и соотношения геометрических размеров по осям координат. Это связано с тем, что концы объекта нагреваются быстрее и поток через их поверхность при росте температуры поверхности быстро уменьшается.

При изменении числа Био характер погрешности не изменяется, а максимум погрешности находится в первой трети общего времени нагрева объекта до температуры, равной 0,95 температуры среды (рис. 4).

**Анализ возмущений.** В типичную систему управления входят объект, регулятор, привод и дат-

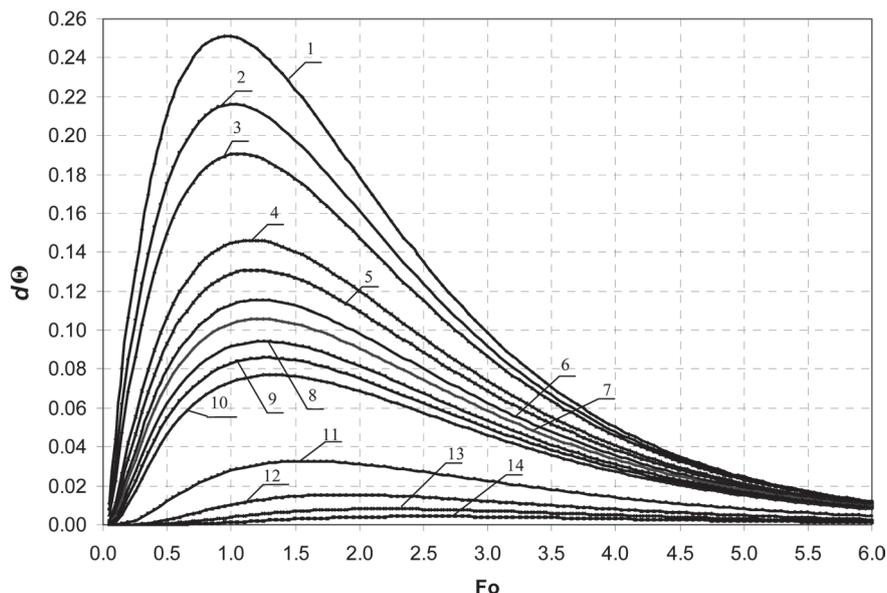


Рис. 3. Зависимость погрешности перехода от 2D к 1D-задаче для граничных условий III рода при  $Bi = 1$  и различном соотношении размеров по осям координат ( $n = 1-6$ ): 1 –  $n = 1$ ; 2 – 1,1; 3 – 1,2; 4 – 1,4; 5 – 1,5; 6 – 1,6; 7 – 1,7; 8 – 1,8; 9 – 1,9; 10 – 2; 11 – 3; 12 – 4; 13 – 5; 14 – 6

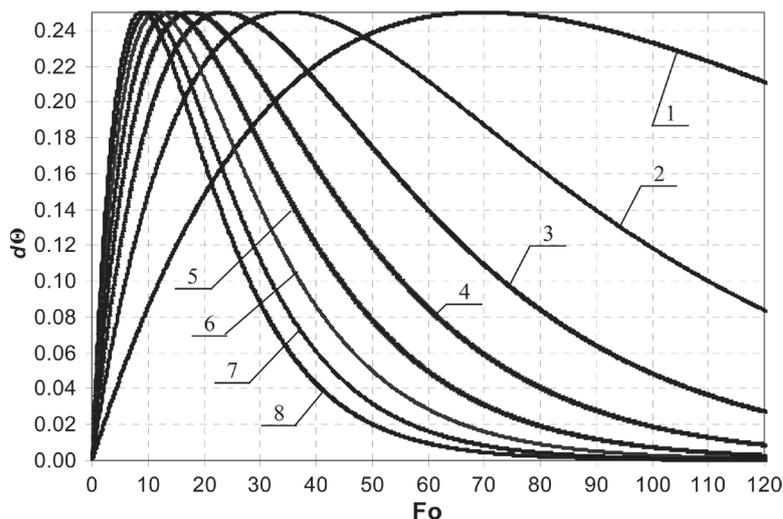


Рис. 4. Зависимость погрешности перехода от 2D к 1D-задаче для граничных условий III рода при соотношении размеров по осям координат  $n = 1$ : 1 –  $Bi = 0,01$ ; 2 – 0,02; 3 – 0,03; 4 – 0,04; 5 – 0,05; 6 – 0,06; 7 – 0,07; 8 – 0,08

чики и связи между ними. С помощью датчиков чаще всего измеряются те характеристики объекта, которыми нужно управлять.

На объект действует окружающая среда или внешние возмущения. Большинство возмущений носят случайный характер. Кроме того, датчики измеряют параметры не точно, а с некоторой ошибкой. Для управления очень важен вопрос о том, изменяются ли характеристики объекта со временем. Самый простой вариант при моделировании – считать, что все параметры объекта определены (заданы) точно так же, как и внешние воздействия. Ситуация осложняется тем, что математическая модель с определенными граничными условиями основана на физических, а не технологических параметрах процесса. Технологические факторы ча-

сто содержат случайные величины (колебания химического состава металла, открытие различных окон и заслонок, особенности конкретных регуляторов и управляющих устройств, колебания производительности и т. д.).

На рис. 5 показаны зависимости расхода газа в течение 1 сут при нагреве заготовок сечением  $125 \times 125$  мм под прокатку в методической печи мелкосортного стана. Из рисунка видны довольно существенные колебания расхода с различной амплитудой ( $150-500 \text{ м}^3/\text{ч}$ ), что не связано с простоями на стане. Во время простоев или перевалки расход газа снижается до уровня  $1000-1200 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Действие различных факторов реального производства приводит к тому, что при одних и тех же условиях, принимаемых при моделировании на-

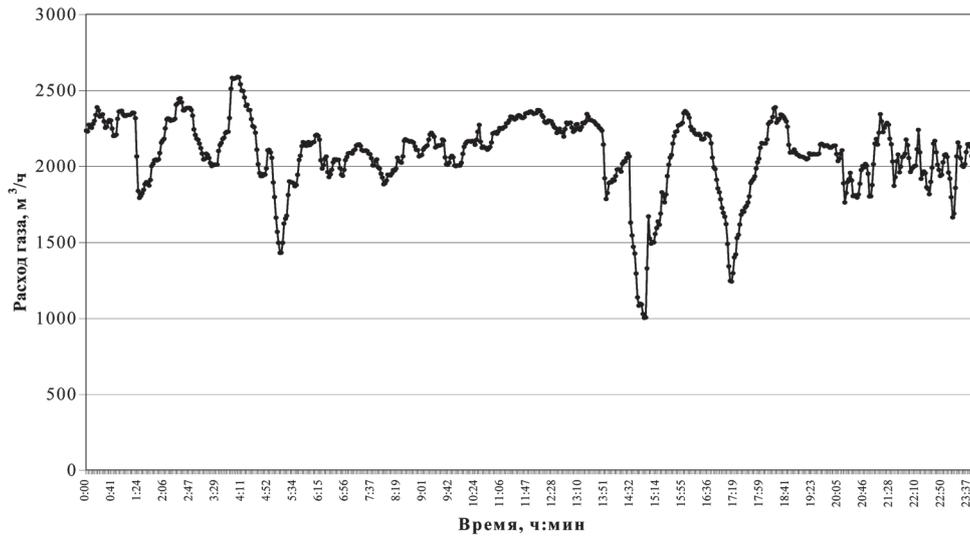


Рис. 5. Зависимость расхода газа на печи мелкосортного стана в течение 1 сут

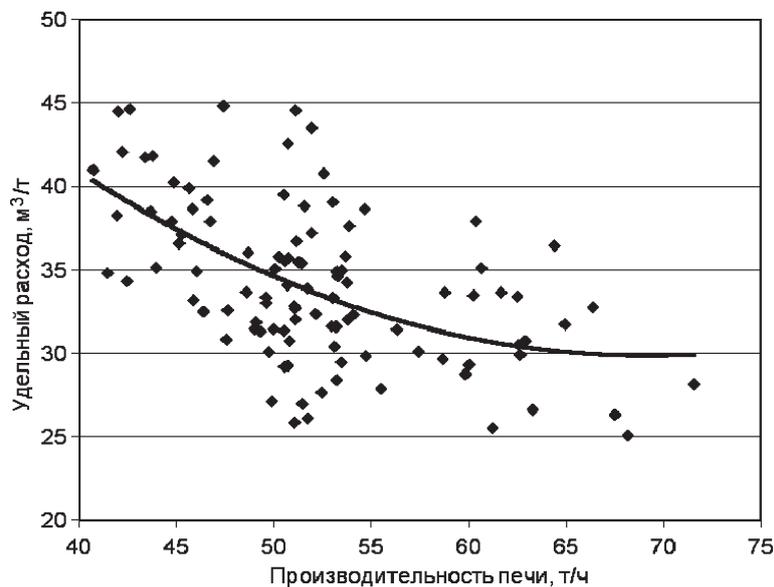


Рис. 6. Зависимость удельного расхода топлива от производительности методической печи с шагающим подом

грева заготовок, реальный удельный расход топлива на нагрев заготовок может существенно колебаться. На рис. 6 показана зависимость удельного расхода топлива от производительности методической печи с шагающим подом мелкосортного стана.

Эти данные необходимо учитывать при сопоставлении расчетных данных и полученных при реальной эксплуатации либо экспериментах.

**Учет работы рекуперативной установки при моделировании печного нагрева.** При определении расхода топлива используют результаты расчета теплового баланса печи с учетом теплоты, вносимой в печь с подогретым воздухом. При моделировании работы многозонных печей необходимо учитывать балансовые соотношения каждой зоны. При изменении производительности печи объемы подаваемого топлива и воздуха и соответ-

ственно удаляемых из печи продуктов сгорания изменяются. Изменяются также и температуры продуктов сгорания и подогреваемого воздуха. Кроме того, для печей периодического действия расход газа изменяется во времени в процессе нагрева садки заготовок от максимального в начале нагрева до минимального перед выгрузкой. Температура продуктов сгорания, удаляемых из печи, при этом возрастает по мере нагрева заготовок.

На рис. 7 показана зависимость расхода природного газа, подаваемого на печь, от времени нагрева заготовок, полученная путем замеров на экспериментальной камерной печи.

Уменьшение расхода топлива, а также расхода воздуха и продуктов сгорания объясняется снижением теплового потока на поверхность садки при возрастании температуры ее поверхности. При наличии периода выдержки расход может снижаться

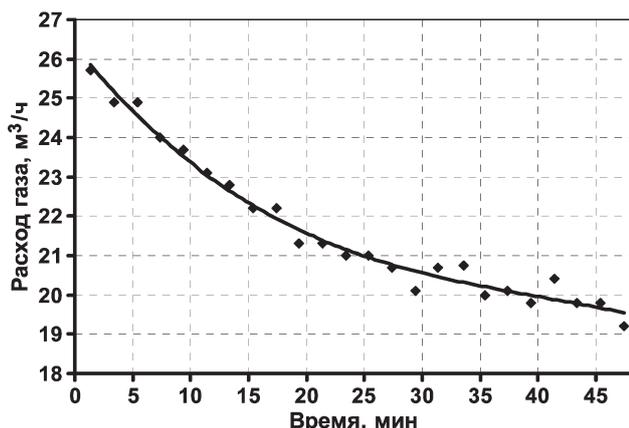


Рис. 7. Расход природного газа при разогреве печи с садкой из холодного состояния

до крайне малых значений (для компенсации тепловых потерь печи). В свою очередь рекуперативная установка проектируется исходя из конкретного расхода топлива и температуры продуктов сгорания, удаляемых из рабочего пространства. Это приводит к отличию реальных температур подогрева воздуха в процессе эксплуатации от проектных.

Экспериментальные данные свидетельствуют о том, что температура подогрева воздуха в реальных условиях работы печей может изменяться более чем в 2 раза, что необходимо учитывать при определении расхода топлива, а также исследовании энергоэффективных режимов нагрева.

Температура подогрева воздуха в рекуператоре зависит как от температуры дымовых газов, так и расхода природного газа на печь, поэтому температура подогрева при различных режимах работы печи будет различной. С уменьшением расхода топлива в печи температура нагрева будет возрастать, несмотря на уменьшение коэффициента теплопередачи. Данные факты свидетельствуют о том, что при разработке энергосберегающих режимов нагрева применительно к методическим печам в модель работы печи необходимо включать подмодель работы системы рекуперации тепла, что позволит более адекватно описывать реальный физический процесс.

Учитывая, что потери теплоты с уходящими газами составляют одну из наиболее существенных статей расходной части, тепловой баланс должен быть дополнен условием, что температура воздуха, подаваемого на горение, является функцией температуры уходящих из печи газов, подаваемых в рекуператор, коэффициента теплопередачи от дымовых газов к воздуху, площади поверхности рекуператора и теплоемкости и расхода дымовых газов и воздуха:

$$T_B = T_{B0} + \Delta T_B(T_{yx,r}, k, F, W_1, W_2).$$

Коэффициент теплопередачи от дымовых газов к воздуху в свою очередь зависит от скорости движения теплоносителей и условий обтекания поверхностей, т. е. определяется конкретной конструкцией рекуператора, поэтому подмодель работы рекуперативной системы для печи должна разрабатываться с учетом конкретного типа рекуператора.

При анализе энергоэффективности режимов нагрева и определении общего энергетического КПД нагревательных печей необходимо учитывать работу привода вентилятора подачи воздуха на горение, а также дымососа. Это связано с тем, что повышение производительности печей приводит к увеличению количества подаваемого воздуха и удаляемых дымовых газов, что отражается на энергопотреблении приводов.

**Учет контролируемых элементов.** Температурный режим нагревательных печей, как правило, задается в виде графика зависимости температуры печи от времени нагрева для печей периодического действия и графика зависимости температуры печи от координаты по длине печи для печей непрерывного действия (проходных и методических).

Процесс нагрева обеспечивается за счет подачи в рабочее пространство печи необходимого количества топлива. Однако автоматическая система работает на поддержание именно температурного уровня процесса. Значение измеряемой температуры зависит не только от погрешности термопары, но и от места ее установки, поэтому при моделировании следует обеспечить одинаковые условия контроля температуры в реальной печи и ее модели [2].

При использовании бесконтактных методов измерения температуры вопросы методики измерения являются определяющими в отношении точности.

Хотя многие приборы бесконтактного измерения температуры имеют высокую точность измерений (обычно 1,0–1,5% от измеряемой величины), реальная погрешность измерений может быть значительно выше вследствие различных факторов, основными из которых являются.

1. Наличие рядом с контрольным объектом более нагретых тел. Этот фактор существенно искажает измерения за счет отражения поверхностью измеряемого объекта излучения от соседних тел. Ошибка измерений может достигать десятков процентов. Она не устраняется даже при использовании более сложных приборов, основанных на методе спектрального отношения.

2. Ошибки, связанные с неточностью определения излучательной способности объекта. Для

большинства пирометров чаще используются более простые, однолучевые методы регистрации сигнала, так что указанная проблема может быть весьма актуальной.

3. Ослабление сигнала при распространении от объекта съемки к прибору. Эти потери зависят от расстояния до измеряемого объекта, степени прозрачности атмосферы, спектрального диапазона и не всегда могут быть учтены в полной мере.

Таким образом, при моделировании наиболее целесообразным является определение исходных данных в виде параметров, поддающихся измерению и контролю в процессе работы агрегата. Например, температура печи должна определяться

по маркерам, соответствующим местам установки термопар, либо условиям измерения пирометрами и т. д.

**Выводы.** Исследования влияния различных факторов на точность моделирования процессов нагрева металла показывают, что анализ основных закономерностей теплофизических процессов, предшествующий моделированию работы тепловых агрегатов, может способствовать упрощению расчетных моделей без существенной потери точности, а игнорирование изменяющихся производственных факторов может, наоборот, приводить к ошибкам при параметрической идентификации моделей или сопоставлении результатов моделирования и производственных данных.

### Литература

1. Корнеев С. В. Область применения одно-, двух- и трехмерных моделей нагрева и охлаждения // Весті НАН Беларусі. Сер. фіз.-тэхн. навук. 2008. № 3. С. 318–402.
2. Трусова И. А., Корнеев С. В., Менделев Д. В., Ратников П. Э. Влияние конструктивных параметров нагревательной печи на равномерность распределения температур при радиационном нагреве // Литье и металлургия 2010. № 4, С. 198–204.