

## Об оптимальных режимах нагрева металла в газовых нагревательных печах

Соколов А. К., доктор техн. наук

Ивановский государственный энергетический университет

Рассмотрены варианты постановки задач оптимизации и некоторые итоги исследований режимов нагрева по различным критериям оптимальности. Описаны оптимальные режимы, обеспечивающие заданные конечные температуры металла и минимумы критериев оптимальности: угара металла, расхода топлива, суммы затрат на угар и топливо, себестоимости нагрева. Показано, что в общем случае оптимальный режим или его стадию нельзя свести к простейшим закономерностям (нагрев при постоянных потоке теплоты или температуре газов, скорости роста температуры поверхности металла, расходе газа и др.), поскольку характер зависимостей режимных параметров от времени нагрева в оптимальном режиме диктуется прежде всего производительностью печи и другими заданными условиями нагрева. Доказана несостоятельность некоторых утверждений, встречающихся в литературе, относительно распространения частных и верных в определенных условиях закономерностей на все условия нагрева металла.

**Ключевые слова:** газовые нагревательные печи, нагрев металла, оптимизация режимов, выбор критериев оптимальности, расход топлива, угар металла, время нагрева.

При осуществлении процесса тепловой обработки металла в нагревательных печах должны решаться две основные задачи:

соблюдение требований технологии, включая обеспечение заданной производительности и качества нагрева;

ведение процесса с минимальными угаром и затратами топлива.

Обе задачи взаимосвязаны, многоплановы и касаются вопросов проектирования, строительства, наладки, эксплуатации нагревательных печей и управления ими. Причем первая задача — определяющая, без нее невозможно решение второй задачи, поскольку сравниваемые в процессе оптимизации режимы должны обеспечивать одинаковое качество нагрева. Однако при оптимизации совместной работы печи и прокатного стана (молота) температура металла на выходе из печи также может стать объектом оптимизации.

Эффективность оптимизации (снижение затрат на нагрев в долях или процентах) определяется глубиной постановки и решения задачи. В зависимости от нее можно оптимизировать:

1) способ нагрева (принцип действия источника энергии), способ перемещения металла (скольжение по поду, применение конвейера, шагающего пода, контейнеров и др.), режим работы (периодический, непрерывный), способы утилизации, очистки и удаления отходов и др.;

2) структуру реактора и вспомогательного оборудования (число технологических зон, места расположения источников энергии,

компоновка рабочего пространства, схема движения потоков, материалы ограждений и др.);

3) режимные и конструктивные параметры нагревательной печи.

Наиболее простыми представляются задачи выбора оптимальных режимных параметров. Возможность уменьшения расхода топлива и угара металла в действующих печах только путем совершенствования режимов нагрева (практически без капитальных затрат) считалась весьма привлекательной. Начиная с 60–70-х гг. XX века, в решении задач оптимизации печей принимали участие практически все научные школы СССР и России, работающие в области металлургической теплотехники и опубликовавшие более 200 работ. Общим критерием оптимальности  $S$  принято считать дисконтированные затраты на нагрев металла. При упрощенных постановках задач возможны решения для частных критериев оптимальности: минимума угара или расхода топлива либо времени нагрева.

Оптимизация газовых нагревательных печей математическими методами началась с использования аналитических моделей, описывающих взаимосвязи управляющих воздействий (температур газа) и температурного поля металла. Решения задач оптимизации температурных режимов нагрева (в основном термически тонких тел) по минимуму угара металла, полученные аналитическим путем, были довольно приближенными, не находили практического применения, а сделанные на

их основе выводы носили противоречивый характер.

Оптимальные режимы, приводимые в публикациях, иллюстрировали в основном применение различных методов решения экстремальных задач. Несмотря на то, что в некоторых случаях оптимальные режимы внедряли в производство, многие практические вопросы оставались без ответа из-за высокой трудоемкости моделирования процесса нагрева металла в печах.

В последние четыре десятилетия особенно интенсивно развивались исследования нагревательных печей методами математического моделирования. Но совершенствованию и оптимизации действующих печей этими методами и последующему их внедрению должны предшествовать организационно-технические мероприятия, направленные на устранение явных нарушений правил эксплуатации и повышение культуры производства. В некоторых случаях реализация простейших инженерных решений или приведение условий эксплуатации к норме давали больший эффект, чем дорогостоящая и трудоемкая оптимизация с использованием математических моделей.

Решения задач оптимизации имели в основном частный характер и не смогли выявить каких-либо общих закономерностей, характерных для оптимальных режимов, и общих правил конструирования оптимального рабочего пространства нагревательных печей. Долгое время на очень важные для практики вопросы не было достоверных ответов. В учебных пособиях (за редким исключением) до сих пор нет разделов “Оптимальные режимные и конструктивные параметры нагревательных печей”, хотя проблема оптимизации решается около 40 лет. Более того, в ряде работ появлялись утверждения относительно закономерностей оптимальных режимов нагрева: “наискорейший режим оптимален по величине угара металла и расходу топлива”; “режим с постоянной скоростью роста среднemasсовой температуры оптимален по расходу топлива”; “чтобы экономить топливо на нагрев и уменьшать потери металла с окалиной, необходимо интенсифицировать процесс лишь к концу требуемого времени нагрева, т. е. в последних по ходу металла зонах печи (принцип экономичного управления нагревом)” и др. Подобные рекомендации без указания конкретной области их применения недостаточно корректны и могли ввести в заблуждение практиков. Видимо,

настала необходимость подведения итогов исследований режимов нагрева металла.

Рассмотрим некоторые важные для теории и практики результаты работ, которые можно считать более или менее доказанными в исследованной области параметров.

**Постановка задачи оптимизации режимов нагрева металла.** При проектировании печи (печи) создается под прокатный стан для обеспечения его номинальной (или максимальной) производительности, если задачи оптимизации параметров прокатного стана и печи решаются независимо. Поэтому задача оптимального проектирования должна решаться при заданной производительности (времени нагрева  $\tau_k$ ).

Для действующих печей производительность также определяется работой стана (печь должна подготовить столько металла, сколько может прокатать стан). Следовательно, оптимизация режима нагрева будет заключаться в выборе режимных и конструктивных параметров печи при заданной ее производительности с учетом заданных технологических ограничений на параметры ее работы и конечные температуры металла (среднемассовую температуру  $T_{ср.к}$  или температуру поверхности  $T_k$  и перепад температур в металле  $\Delta T_k$ ).

При расчете заключительных стадий нагрева металла должна решаться обратная задача теплопроводности, которая состоит в определении температур реактора (среды  $T_c$ , газа  $T_r$ ), при которых материал за заданное время нагреется до необходимых температур, одинаковых для всех сравниваемых режимов.

В [1] предложен довольно эффективный алгоритм определения температур среды  $T_c$ , обеспечивающих нагрев материала за определенное время до заданных  $T_k$  и  $\Delta T_k$  или до  $T_{ср.к}$  и  $\Delta T_k$ . Алгоритм не зависит от метода расчета температурного поля и практически не требует настройки. Для нахождения температур среды обычно требуется четыре-девять расчетов температурного поля металла.

В реальных условиях работы производительность прокатного стана может отличаться от номинальной. Тогда отыскиваются (рассчитываются) оптимальные режимы для серии производительностей или продолжительностей нагрева  $\tau_i$  ( $\tau_{min} \leq \tau_i \leq \tau_{max}$ ), где  $\tau_{min}$  и  $\tau_{max}$  — минимальное и максимально возможное (допустимое) время нагрева. Оптимальные режимы могут реализоваться с помощью режимных карт или программ управления.

Решение задач оптимизации режимов нагрева для нескольких значений  $\tau_i$  позволяет составить режимные карты, в которых указываются режимные параметры  $U_i^*$  (температуры печи, расходы топлива и др.), обеспечивающие минимум критерия оптимальности при заданном времени нагрева  $\tau_i = \tau_{ki}$  и заданном качестве нагрева металла с учетом возможных ограничений на параметры работы печи.

По зависимости критерия оптимальности, например удельного расхода топлива  $S$ , от времени нагрева можно определить оптимальное время нагрева  $\tau_{\text{опт}}$  или производительность, при которой будет обеспечиваться минимум миниморум критерия оптимальности  $S$ .

Математическая формулировка задачи имеет вид

$$S = \min \{S_i = S(U_i, \tau_i) = \min_{U_i^*}, \\ \tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max}, \quad i = 1, 2, 3, \dots\},$$

где  $U_i^* = (u_{i1}, u_{i2}, \dots, u_{in})$  — вектор оптимальных параметров для заданного времени нагрева  $\tau_i$ ;  $S_i$  — минимальное значение критерия оптимальности для времени нагрева  $\tau_i$ .

Решение задачи в такой постановке целесообразно проводить в два этапа. На первом этапе следует найти оптимальные параметры  $U_i^*$  для серии производительностей (времен нагрева  $\tau_{\min} \leq \tau_i \leq \tau_{\max}$ ) и определить табличную зависимость  $S_i(\tau_i)$ . На втором этапе можно найти минимальное значение  $S$  табличной функции  $S_i(\tau_i)$ :  $S = \min(S_i)$ , а по нему — оптимальное время нагрева  $\tau_{\text{опт}}$  и соответствующую ему производительность печи. С этой производительностью печь может функционировать в тех случаях, когда суточная (недельная или месячная) программа работы прокатного стана ниже номинальной и, следовательно, имеется возможность выбора оптимальной производительности печи.

**Совершенствование и оптимизация.** В последние годы стали появляться исследования, в которых вместо термина “совершенствование” используется “оптимизация”. Оптимизацией стали считать выбор *лучшего из нескольких рассмотренных* вариантов. Следует отметить, что согласно “Толковому словарю русского языка” С. И. Ожегова и Н. Ю. Шведовой *совершенствовать — делать лучше, совершеннее, а оптимизировать — выбрать наилучший из возможных вариантов*. Следовательно, при оптимизации необходимо доказывать, что оп-

тимальный вариант — *наилучший из возможных*. Другими словами, оптимизация — это совершенствование, но доведенное до предела.

**Режимы нагрева с минимальным угаром металла.** Критический анализ некоторых известных аналитических решений по минимуму угара дан в [2], где отмечены два основных недостатка предлагаемых режимов нагрева металла:

трудность их реализации в нагревательных печах;

некорректность вывода о целесообразности неограниченного увеличения времени нагрева для оптимального режима.

В [3] показано, что зависимость угара металла  $U$  от заданного конечного времени нагрева  $U(\tau_k)$  имеет минимум, а время  $\tau_{k.o.y.}$ , при котором  $U(\tau_k) = \min$ , больше предельно допустимого  $\tau_{k.n.}$  (наискорейшего). Расчеты были выполнены для известного двухстадийного режима нагрева: постоянный поток теплоты в первом периоде —  $q = \text{const}$  и постоянная температура поверхности металла во втором периоде —  $T_{\text{п}} = T(1, \text{Fo}) = \text{const}$  (Fo — число Фурье, безразмерное время нагрева). В той же работе сделано сравнение по величине угара режимов с убывающей, возрастающей и постоянной скоростью роста температуры  $T(1, \text{Fo})$  в первом периоде. Для режима с возрастающей скоростью  $T(1, \text{Fo})$  угар оказался больше.

При более точном математическом описании процессов, когда температурное поле металла  $T(X, \text{Fo})$  и угар металла рассчитывали численно-аналитическими методами, а минимум функции  $U(\tau_k)$  находили методами направленного поиска, было установлено, что оптимальный по величине угара режим  $T(1, \text{Fo})$  может описываться различными законами, вид которых зависит от  $\tau_k$ , заданного конечного перепада температур в металле  $\Delta T_k$  и других параметров. Пример таких режимов для нескольких  $\Delta T_k$  показан на рис. 1. Величины угара металла для оптимальных режимов нагрева стальной пластины толщиной  $R = 0,3$  м и различных значений  $\Delta T_k$  и  $\text{Fo}_k$  приведены в табл. 1, откуда следует, что минимум  $U(\text{Fo}_k)$  находится около значений  $\text{Fo}_k = 2, 2, 1$  соответственно для  $\Delta T_k = 50, 100, 200$  К. Расчеты показали, что в пределах погрешности расчета значения  $U(\text{Fo}_k)$  при  $\text{Fo}_k > 2$  можно полагать постоянными, т. е. при увеличении  $\text{Fo}_k$  сверх  $\text{Fo}_{\text{опт}} \approx 2$  угар металла для *оптимальных* (по угару) режимов остается практически одина-

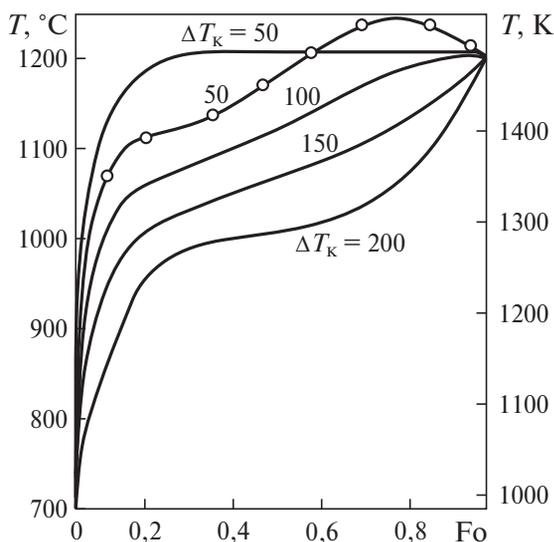


Рис. 1. Режимы  $T(1, Fo)$  с минимальным окислением для различных степеней прогрева металла  $\Delta T_k$  при  $Fo_k = 1$  (—○— режим без ограничения на температуру поверхности)

ковым. Для  $\Delta T_k = 200$  K функция  $U(Fo_k)$  очень слабо зависит от  $Fo_k$ . Теоретически при увеличении времени нагрева угар должен уменьшаться (для оптимального по угару режима), но это снижение при  $Fo_k > Fo_{opt}$  будет практически незаметно. Однако от задания  $\Delta T_k$  величина угара зависит весьма существенно, что указывает на актуальность оптимизации совместной работы комплекса печь — прокатный стан и выбора оптимального значения  $\Delta T_k$  по суммарным затратам на нагрев и обработку металла давлением.

Расчеты оптимальных режимов для пластин различной толщины  $R$  показали, что при прочих равных условиях характер оптимального режима в виде  $T(1, Fo)$  не зависит от  $R$ , но величина угара для них примерно прямо пропорциональна значению  $R$  (угар учитывали на одной поверхности). Снижение угара металла при оптимизации режима для заданных значений  $T_k$ ,  $\Delta T_k$  и  $\tau_k$  по разным оценкам может составить от 1 до 8 %. Однако оптимальные режимы только по угару металла имеют больше теоретическое значение. Их реализация связана с увеличением затрат на топливо, поэтому, возможно, она имеет смысл только для очень дорогих марок сталей.

**Режимы нагрева с минимальным расходом топлива.** Результаты наиболее детального исследования режимов четырехзонной секционной печи приведены в [4, 5]. Они позволяют сделать следующие основные выводы:

Таблица 1

$Fo_k$	$\Delta T_k$	Угар металла, кг/м <sup>2</sup>
1	50	2,81
	100	2,08
	200	1,28
2	50	2,51
	100	1,97
	200	1,29
3	50	2,53
	100	1,97
	200	1,31

удельный расход топлива при снижении производительности от предельной до оптимальной может уменьшиться на 35 – 40 %;

характер оптимального распределения температур газа по зонам установки (повышение или понижение по ходу перемещения металла, номер зоны с наибольшей температурой) зависит от заданного времени нагрева. При высоких производительностях для термически массивного металла наибольшая температура газа должна быть в одной из первых зон, а при очень низких — в последней зоне. При сокращении времени нагрева наибольшее значение температуры газа в зонах смещается к началу печи (при производительности, близкой к предельной, наибольшее значение наблюдалось во второй зоне печи);

температура газа в последней зоне (для термомассивного металла) очень слабо зависит от времени нагрева  $\tau_k$  (ее значение определяется заданными температурами  $T_{ср,k}$  и  $\Delta T_k$ , устанавливаемыми в зависимости от марки стали и толщины нагреваемого металла);

оптимальный режим нельзя свести к одному из классических режимов (нагрев при постоянном потоке теплоты или температуре газов, постоянной скорости роста температуры поверхности металла) или к двум таким режимам, поскольку характер зависимостей режимных параметров от времени нагрева в оптимальном режиме диктуется заданными условиями нагрева, и прежде всего — производительностью печи;

перегрев поверхности металла с последующим охлаждением (подстуживанием) в печи

эффективен только при высоких производительностях;

эффект оптимизации режимов нагрева с невысокой производительностью при уточнении температур газа в первых зонах печи на  $\pm (50 \div 100)$  К для заданных значений  $\tau_k$ ,  $T_{ср.к}$  и  $\Delta T_k$  довольно невелик и может составлять 1 – 2%. Следовательно, оптимальной (в пределах погрешности расчетов или регулирования) может быть серия режимов, различающихся по температурам газов в первых зонах печи на  $\pm (50 - 75)$  К. При повышении производительностей области оптимальных значений температур газа в первых зонах печи, где удельные расходы топлива превышают минимальные не более чем на 1%, сокращаются (сужаются). Поэтому отклонения режимов от оптимальных при высоких производительностях приведут к большим перерасходам топлива. Эффект оптимизации количества и длин зон печи также повышается с ростом производительности печи;

оптимальный режим нагрева в первых зонах установки, пока не проявляются ограничения на температуры металла, кладки, газов, близок к режиму нагрева с постоянным (одинаковым) расходом топлива, м<sup>3</sup>/с на 1 м длины активного пода печи;

обнаружено наличие закономерности, связывающей оптимальные значения температур газа в первых зонах установки функцией  $T_{г2} = f(T_{г1})$ . Однако для других печей параметры функции  $T_{г2} = f(T_{г1})$  потребуют уточнения. Использование найденной закономерности позволит уменьшить трудоемкость поиска оптимальных режимов и составления технологических инструкций по опытным данным.

Некоторые закономерности, найденные методом математического моделирования, ранее использовались на практике (были обнаружены эмпирически), что указывает на достоверность проведенного исследования.

В [4, 5] впервые графически представлены зависимости удельного расхода топлива  $b$  в области оптимума от температур газов в двух первых зонах  $b(T_{г1}, T_{г2})$  четырехзонной печи, которые позволяют лучше понять особенности управления процессом нагрева, когда режимные параметры достигают предельных значений. Важно отметить, что функция  $b(T_{г1}, T_{г2})$  имеет один минимум (ранее предполагалось наличие нескольких минимумов). Оптимум может находиться на границе допустимых значений параметров и не совпадать с минимумом функции  $b(T_{г1}, T_{г2})$ , что

Таблица 2

№ п/п	$\Delta T_k$	$Fo_k = 2,5$			$Fo_k = 3,0$		
		$N_p$	$B$ , кг/т	$У$ , кг/т	$N_p$	$B$ , кг/т	$У$ , кг/т
1	30	1	70,95	2,20	1	66,3	2,01
2		24	60,1	2,02	32	52,7	1,94
3	40	1	67,7	2,03	1	63,9	1,87
4		30	58,0	1,88	28	51,5	1,80
5	50	1	64,8	1,88	1	61,7	1,74
6		30	56,3	1,74	29	50,3	1,67
7	60	1	71,5	1,83	1	59,8	1,62
8		30	54,9	1,62	30	49,2	1,56

обычно создает определенные трудности при поиске оптимума численными методами с учетом ограничений штрафными функциями.

Согласно данным [6] можно считать, что эффективность оптимизации температурных режимов проходных печей (разница удельных расходов топлив в режимах, обеспечивающих одинаковое качество нагрева) с отводом всех газов из первой по ходу металла зоны (при прочих равных параметрах) будет еще меньше, чем печей с распределенным отводом газов или печей периодического действия. Детальные исследования методических печей с большими потерями теплоты в водоохлаждаемые элементы пока неизвестны, поэтому закономерности оптимальных режимов для них могут быть несколько иными. В [6] дана оценка сокращения *относительного* расхода топлива в зависимости от снижения температуры уходящих газов. Для печей с низким КПД *абсолютное* уменьшение расхода топлива при совершенствовании режимов должно быть выше.

В [7] приведены результаты исследований режимов печи периодического действия с учетом угара металла. При всех исследованных условиях нагрева оптимизация по расходу топлива приводила к снижению угара металла.

В табл. 2 показаны расходы условного топлива  $B$  и величины угара металла  $У$  в исходных ( $N_p = 1$ ) и оптимальных ( $B = \min$ ) режимах  $N_p > 1$  (где  $N_p$  — номер расчета при поиске оптимума методом покоординатного спуска). Расчеты выполнены для пластины из стали Р18 толщиной  $R = 0,2$  м,  $F_H = 1$  м<sup>2</sup>, нагреваемой от температуры  $T(X, 0) = T_H =$

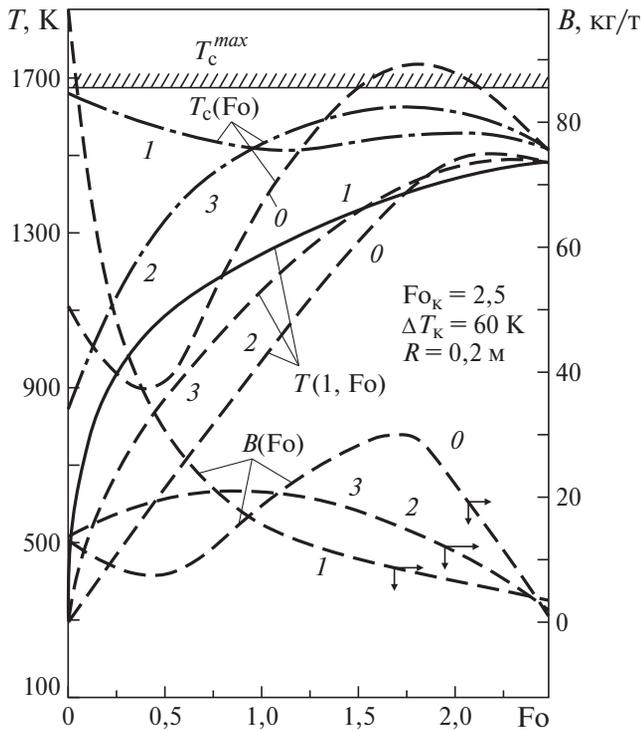


Рис. 2. Графики изменения параметров при различных режимах нагрева металла:

0 — исходный; оптимальные: 1 — по угару металла; 2 — по расходу топлива; 3 — по затратам на угар и топливо ( $T_c = T_r$ )

= 293 К до  $T_k = 1473$  К,  $\Delta T_k = 30, 40, 50, 60$  К за время  $Fo_k = 2,5$  и  $3,0$  при калориметрической температуре  $T_{кал} = 2173$  К,  $q_{п} = 1745$  Вт/м<sup>2</sup> (потери теплоты на 1 м<sup>2</sup> площади поверхности металла),  $\alpha = 262$  Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $\sigma = 0$  и ограничениях:  $T(1, \tau) < 1481$  К,  $773 \leq T_{гj} \leq 1673$  К ( $\alpha$  и  $\sigma$  — коэффициенты конвективного и радиационного теплообменов). Исходные режимы ( $N_p = 1$ ), задаваемые произвольно, не соответствовали режимам, применяемым на практике, поэтому эффект оптимизации получился довольно большим.

Из табл. 2 видно, что удельные расходы топлива и угар металла уменьшаются при увеличении  $Fo_k$  и  $\Delta T_k$ . Например, при увеличении перепада  $\Delta T_k$  в 2 раза расход топлива снижается на 9 %, а угар — на 24 % ( $Fo_k = 2,5$ ). При  $Fo_k = 3,0$  эти величины составили соответственно 7 и 24 %. При  $\Delta T_k = 30$  К увеличение безразмерного времени нагрева  $Fo_k$  с 2,5 до 3,0 приводит к снижению расхода топлива на 14 %, а угара — на 4 %.

Один из оптимальных режимов ( $B = \min$ ) по данным табл. 2 ( $Fo_k = 2,5$ ,  $\Delta T_k = 60$  К) представлен на рис. 2 под номером 2. Расход топлива  $B(Fo)$  в оптимальном режиме для

принятых условий расчета сначала возрастает, а затем снижается.

Характер режимов нагрева — законов изменения  $T(R, \tau)$ ,  $T_r(\tau)$ , положение максимумов этих функций, оптимальных по расходу топлива или угару металла, в значительной степени зависят от конечного времени нагрева, заданного конечного перепада температур в металле и других параметров. Для термически тонкого металла или термически массивного при определенных условиях (низкая производительность, большие значения  $\Delta T_k$  и др.) возможны оптимальные режимы, для которых “действительно необходимо интенсифицировать процесс ... в последних по ходу металла зонах печи” [8]. Однако для термически массивного металла во время выдержки или в томильной зоне температуры газов и потоки теплоты в металл, как правило, должны быть ниже, чем на предыдущей стадии нагрева. Следовательно, в таких случаях принцип экономичного управления нагревом [8], который упоминался в начале статьи, будет нарушаться.

**Режимы с минимальными затратами на нагрев металла.** Затраты на операцию нагрева в газовых печах включают удельные стоимости окислившегося металла, сгоревшего топлива и расходы, которые почти не зависят от режима нагрева при заданной производительности: амортизационные отчисления, фонд заработной платы и др.

Представляет интерес сравнение режимов нагрева, рассчитанных для различных критериев оптимальности:

$$\text{угара металла } S^Y = S_Y Y;$$

$$\text{расхода топлива } S^T = S_T B;$$

суммарных затрат на угар и топливо  $S^{Y+T} = S_Y Y + S_T B$ , где  $S_Y$  и  $S_T$  — удельные стоимости угара и условного топлива;

себестоимости нагрева  $S_H = S_Y Y + S_T B + S^{BP.Y}$  (где  $S^{BP.Y} = S_{BP} \tau_k / G$  — удельная стоимость времени работы печи,  $G$  — масса садки, т;  $S_{BP}$  — стоимость единицы времени работы печи без учета затрат на топливо и угар, у.е./с).

На рис. 2 показаны четыре режима: исходный и оптимальные по угару металла, расходу топлива и суммарным затратам на угар и топливо. Характеристики режимов при  $S_Y = 750$  у.е./кг,  $S_T = 224$  у.е./кг приведены в табл. 3.

Расход топлива  $B(Fo)$  для режима с минимальным угаром  $S^Y = \min$  имеет наибольшее значение в начальный момент времени. Функция  $B(Fo)$  для режима с  $S^T = \min$  име-

Таблица 3

Критерий оптимальности	$Y$ , кг/т	$B$ , кг/т	$S^{y+t}$ , у.е./т
Нет	1,88	64,8	1595
$S^y$	1,69	77,6	1770
$S^T$	1,75	56,3	1495
$S^{y+t}$	1,75	56,3	1495

ет максимум. В режиме с  $S^y = \min$  суммарные затраты на угар и топливо  $S^{y+t}$  выше, чем в режиме  $S^{y+t} = \min$ , на 12,5 %. Следовательно, оптимизация только по угару металла приводит в данном случае к увеличению суммарных затрат на угар и топливо  $S^{y+t}$ .

Величина угара металла (см. табл. 3) в режимах с минимальным расходом топлива  $S^T = \min$  незначительно отличается от величины угара в режиме с минимальным угаром металла  $S^y = \min$ :  $1,75 - 1,69 = 0,06$  кг/т (3,5 %). Поэтому при данном соотношении цен  $S_T/S_y$  режимы с  $S^T = \min$  и  $S^{y+t} = \min$  совпадают.

Режимы с минимальной себестоимостью нагрева  $S_H = \min$  рассчитаны для радиационно-конвективного нагрева —  $\alpha = 46,5$  Вт/(м<sup>2</sup> · К),  $\sigma = 2,91$  Вт/(м<sup>2</sup> · К<sup>4</sup>) — пластины из малоуглеродистой стали площадью  $F_H = 1$  м<sup>2</sup> и толщиной  $R = 0,2$  м с теплофизическими параметрами, зависящими от температуры в печи периодического действия. Удельные потери теплоты в кладку  $q_{п2}$  приняты постоянными и равными 1745 Вт/м<sup>2</sup> площади поверхности металла. Зависимость угара металла от времени и температуры  $T(1, \tau)$ , К, представлена в виде

$$dY^2 = 8,18 \cdot 10^{-6} \exp [5, 50 \cdot 10^{-3} T(1, \tau)] dt,$$

где  $\tau$  — время, с.

Удельную стоимость времени работы печи  $S^{вр.у}$ , у.е./т, определяли при  $G = 1,57$  т и  $S_{вр} = 0,872$  у.е./с. Минимум  $S_H$  находили путем выбора оптимального времени нагрева  $Fo_K$  для режимов с  $S^{y+t} = \min$ , рассчитанных в диапазоне  $2 \leq Fo_K \leq 4,5$  при  $T_{кал} = 2173$  К. Зависимости технико-экономических показателей режимов от располагаемого времени нагрева  $Fo_K$  показаны на рис. 3.

Как видно из рисунка, в области безразмерного времени нагрева  $2 < Fo_K < 2,75$ , близкого к наискорейшему, себестоимость нагрева слабо зависит от времени нагрева и имеет наименьшее значение. Таким образом, для принятых условий расчета минимальная

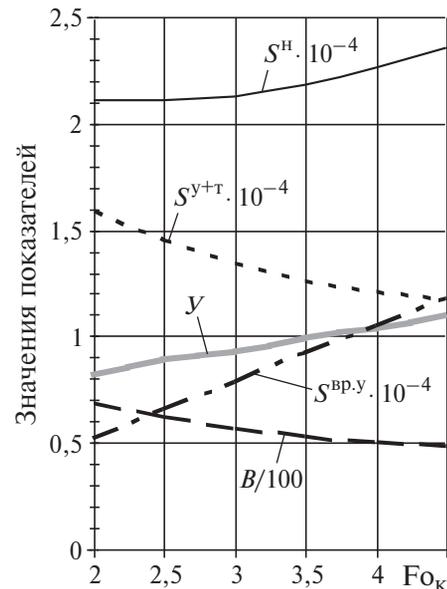


Рис. 3. Зависимости технико-экономических показателей режимов нагрева металла с минимальными затратами на угар и топливо от  $Fo_K$

себестоимость нагрева металла наблюдается в области наискорейшего времени нагрева (при максимальной производительности).

При увеличении времени нагрева сверх оптимального (в данном случае  $Fo_{опт} \approx 2$ ) себестоимость нагрева  $S_H$  и затраты  $S^{вр.у}$ , естественно, возрастают, удельный расход топлива  $B$  и суммарные затраты на топливо и угар  $S^{y+t}$  уменьшаются, а угар металла  $Y$  увеличивается. Необходимо отметить, что зависимость показателей режимов от  $Fo_K$  при другом соотношении стоимостей  $S_T$ ,  $S_y$  и  $S_{вр}$  в принципе может измениться.

На рис. 4 приведены режимы нагрева с  $S^{y+t} = \min$  для трех различных значений  $Fo_K$ , близких к оптимальному. Режимы при  $Fo_K = 2,2$  и  $2,5$  обеспечивают минимальную себестоимость нагрева. Следует обратить внимание на динамику изменения расхода топлива  $B(Fo)$ . При малом конечном времени нагрева, соответствующем минимальной себестоимости нагрева, расход топлива почти линейно снижается в ходе процесса от наибольшего значения в начальный момент времени. С увеличением располагаемого времени нагрева у функции  $B(Fo)$  появляется максимум, который соответствует примерно моменту времени  $Fo \approx 1/3 Fo_K$  (при дальнейшем увеличении  $Fo_K$  максимум смещается в сторону больших значений  $Fo$ ).

Расчеты показали, что задание различной степени прогрева металла  $\Delta T_K$  не меняет принципиального характера экономичных ре-

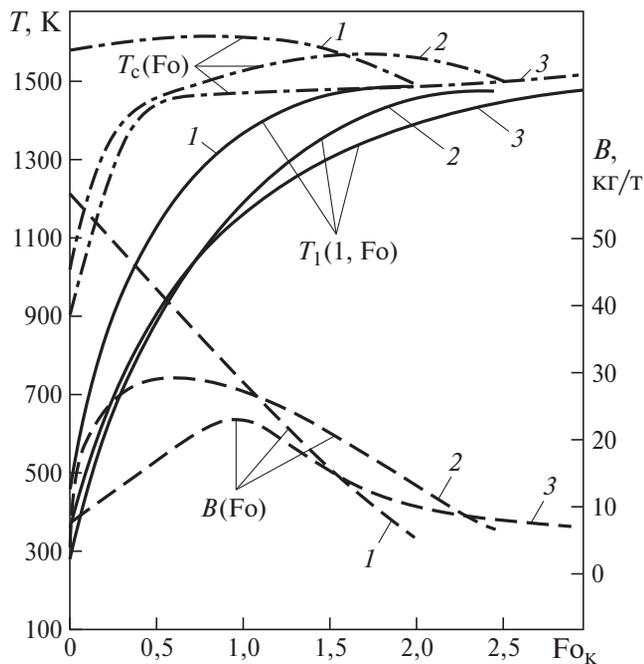


Рис. 4. Графики режимов, оптимальных по затратам на угар и топливо ( $\Delta T_k = 50$  К,  $R = 0,2$  м):

1–3 —  $Fo_k = 2, 2,5$  и 3 соответственно

жимов. При уменьшении  $\Delta T_k$  максимум расхода топлива смещается к началу процесса нагрева, т. е. так же, как при уменьшении времени нагрева. Увеличение перепада температур  $\Delta T_k$  с 40 до 60 К (с 200 до 300 К/м), т. е. в 1,5 раза, приводит к снижению затрат на угар и топливо на 6,4 %, а себестоимости нагрева — на 4,2 %.

Отмеченные закономерности, характерные для оптимальных режимов, сохраняются и при более сложном математическом описании тепловой работы нагревательной печи. Более подробно результаты моделирования и оптимизации газовых нагревательных печей описаны в [9, 10]. В [11] показано, что минимальный расход топлива может быть как при наискорейшем режиме нагрева, так и при нагреве с временем больше наискорейшего. Установлено, что на величину оптимальной производительности печи значительное влияние оказывают потери теплоты в ограждения и водоохлаждаемые элементы печи. Максимальная (предельная) производительность ее может быть оптимальной только при больших удельных потерях теплоты из рабочего пространства печи.

### Выводы

1. Характер оптимальных режимов (закон изменения во времени температур по-

верхности металла, газов, расходов топлива) зависит от многих факторов и в общем случае определяется прежде всего производительностью печи и другими заданными условиями нагрева (конечными температурами металла, ограничениями в виде неравенств, соотношением стоимостей металла, топлива, постоянных затрат). При производительностях печи ниже предельной оптимальный режим в пределах погрешности расчетов (регулирования) может быть реализован серией режимов, отличающихся в начальной стадии по температурам газов на  $\pm 50 \div 100$  К.

2. Приведенные в статье описания оптимальных режимов показывают несостоятельность некоторых утверждений, встречающихся в литературе, относительно возможности распространения частных и верных в определенных условиях закономерностей на все условия нагрева металла.

### Список литературы

1. Соколов А. К. К расчету нагрева металла до заданных параметров. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2000, № 2.
2. Бровкин Л. А. О реализации режимов нагрева, минимизирующих окисление металла. — Изв. вузов. Черная металлургия, 1969, № 12.
3. Бровкин Л. А., Соколов А. К. О режиме нагрева в промышленных печах стали с минимальным окислением. — Изв. вузов. Черная металлургия, 1972, № 7.
4. Соколов А. К. О минимизации расхода топлива на нагрев металла в секционной печи. — Изв. АН. Энергетика, 2007, № 2.
5. Соколов А. К. О влиянии ограничений на выбор оптимальных режимов нагрева металла в секционной печи. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2007, № 1.
6. Соколов А. К. Оценка эффективности энергосбережения при снижении температуры уходящих газов. — Изв. вузов. Черная металлургия, 2007, № 10.
7. Ревун М. П., Соколов А. К. Адаптивные системы управления процессами нагрева металла: Монография. — Запорожье: Изд-во ЗГИА, 1998.
8. Панферов В. И. О принципе экономического управления нагревом металла и его реализации в АСУ ТП методических печей. — Изв. вуз. Черная металлургия, 2007, № 10.
9. Соколов А. К. Математическое моделирование нагрева металла в газовых печах. — Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 2011.
10. Соколов А. К. Совершенствование и оптимизация нагрева металла в газовых печах методом математического моделирования. — Иваново: Ивановский гос. энергетич. ун-т, 2012.
11. Соколов А. К. Оценка влияния потерь теплоты на оптимальную по расходу топлива производительность камерной нагревательной печи. — Вестник ИГЭУ, 2013, вып. 6.

sokolov@bjd.ispu.ru