

**Ю.Г. Качан, д-р техн. наук., Ю.Б. Лиуш**

(Украина, г. Запорожье, Запорожская государственная инженерная академия)

**В.В. Степкин, канд. техн. наук**

(Украина, г. Днепропетровск, Национальная металлургическая академия Украины)

## **ОПТИМАЛЬНОЕ УПРАВЛЕНИЕ КАМЕРНОЙ НАГРЕВАТЕЛЬНОЙ ПЕЧЬЮ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО КРИТЕРИЯ**

### **Постановка проблемы выбора оптимального режима нагрева металла**

Интенсификация процесса нагрева металла в печи сопряжена с дополнительными материальными затратами и технологическими трудностями, а выдача его в холодном или недостаточно прогретом виде отрицательно сказывается на операциях последующей механической обработки. Для каждой марки стали, сортамента заготовок существует такой график температуры поверхности металла во времени, когда средняя температура по массе заготовки при выдаче ее из печи и темп процесса нагрева обеспечивают экстремум (максимум или минимум) избранного технико-экономического показателя. Как такого единого режима нагрева, который мог бы оптимизировать процесс одновременно по всем возможным критериям, например, обеспечить и минимальное окисление металла, и расход топлива, не существует. Поэтому приходится последовательно рассматривать возможные критерии оптимизации и для каждого из них решать задачу выбора соответствующего оптимального режима нагрева.

Переменные затраты на нагрев металла определяются тремя основными факторами: окисление металла, расход топлива и амортизация печи. Принципиальных препятствий для осуществления оптимальных режимов в рассматриваемых объектах нет: при соответствующих видах огнеупоров и топливосжигающих устройств в печь можно подать и достаточно мало тепла в начале процесса и достаточно много в конце, график подачи последнего во времени может быть достаточно крутым. Наиболее существенным фактором, влияющим на температурный режим работы печи, является расход топлива. [1 - 3]. Таким образом, представляет интерес получение зависимости установившейся температуры печи от количества подаваемого топлива в единицу времени (статической характеристики камерной печи).

### **Анализ предыдущих исследований и публикаций**

В работе [4] определено изменение температуры металла, находящегося в печи камерного типа, во времени с установлением такого режима, при котором минимизируется расход тепла, полученного от сжигаемого топлива. Используемая здесь математическая модель печи не учитывает геометрии камеры. Для решения задачи оптимального нагрева металла по суммарному расходу газа на горелки с возможностью варьирования местоположения последних и вытяжных окон, наиболее приемлемой является модель, описанная в работах [5 - 6]. При этом метод оптимизации (классическое вариационное исчисление, принцип максимума, динамическое программирование и т.д.) определяется видом используемой модели камерной нагревательной печи, т.е. видом математических зависимостей, описывающих нагрев металла [7].

### **Изложение материалов разработки**

Для получения графика расхода газа в динамике предложено использовать его зависимость от температуры металла [6]. При расчете расхода газа в заданный момент времени необходимо знать температуру, которую зафиксировали установленные на печи датчики. Измерение температуры по торцевой стороне печи осуществляется термопарой ХА в комплекте с КСП-3 со шкалой 0...100 °С. По своду печи – термопарой ПП в комплекте с КСП-4 со шкалой 0...1300 °С.

В работе [6] в результате оптимизационных расчетов местоположения горелочных устройств и вытяжных окон получена зависимость распределения температуры в печи, соответствующая наибольшей концентрации тепловой энергии в зоне нагрева металла и меньшему расходу газа по сравнению с существующим их местоположением в нагревательном режиме. Для ведения, например, последующего режима отжига необходимо сформировать спектр управляющих воздействий (расхода газа на горелки), при которых соблюдается технологическая картина изменения температуры металла во времени. Этот режим состоит из таких этапов: посадка металла в печь в холодном состоянии; нагрев; выдержка; охлаждение; выдержка; нагрев; выдержка и выдача. Длительность режима составляет 1395 мин (23ч 15мин).

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма динамического управления рассматриваемым процессом в камерной нагревательной печи. Здесь зависимость температуры металла  $t_{mij}$  от расхода газа  $V_{mi}$  во времени с шагом  $j$  определяется на основании работы [6] следующим образом:

$$t_{mij} = \frac{7,2 \cdot V_{mi} \cdot \tau[j] \cdot (Q_{in}^p[j] - i_{\theta}[j]) - 7,92 \cdot G_{on} \cdot c_{on}[j] \cdot (t_{on}^{kon}[j] - t_{on}^{nach}[j]) - 3,96 \cdot M_{kl} \cdot c_{kl}[j] \cdot (t_{in}^{nach}[j] - t_{in}^{nach}[j]) - 2 \cdot \overline{t_{kl}}[j]) + 409,94 \cdot \alpha \cdot G - 28,5 \cdot \tau[j] \cdot (Q_{kl}[j] + Q_{изл}[j])}{7,2 \cdot G \cdot C_M[j]} \quad (1)$$

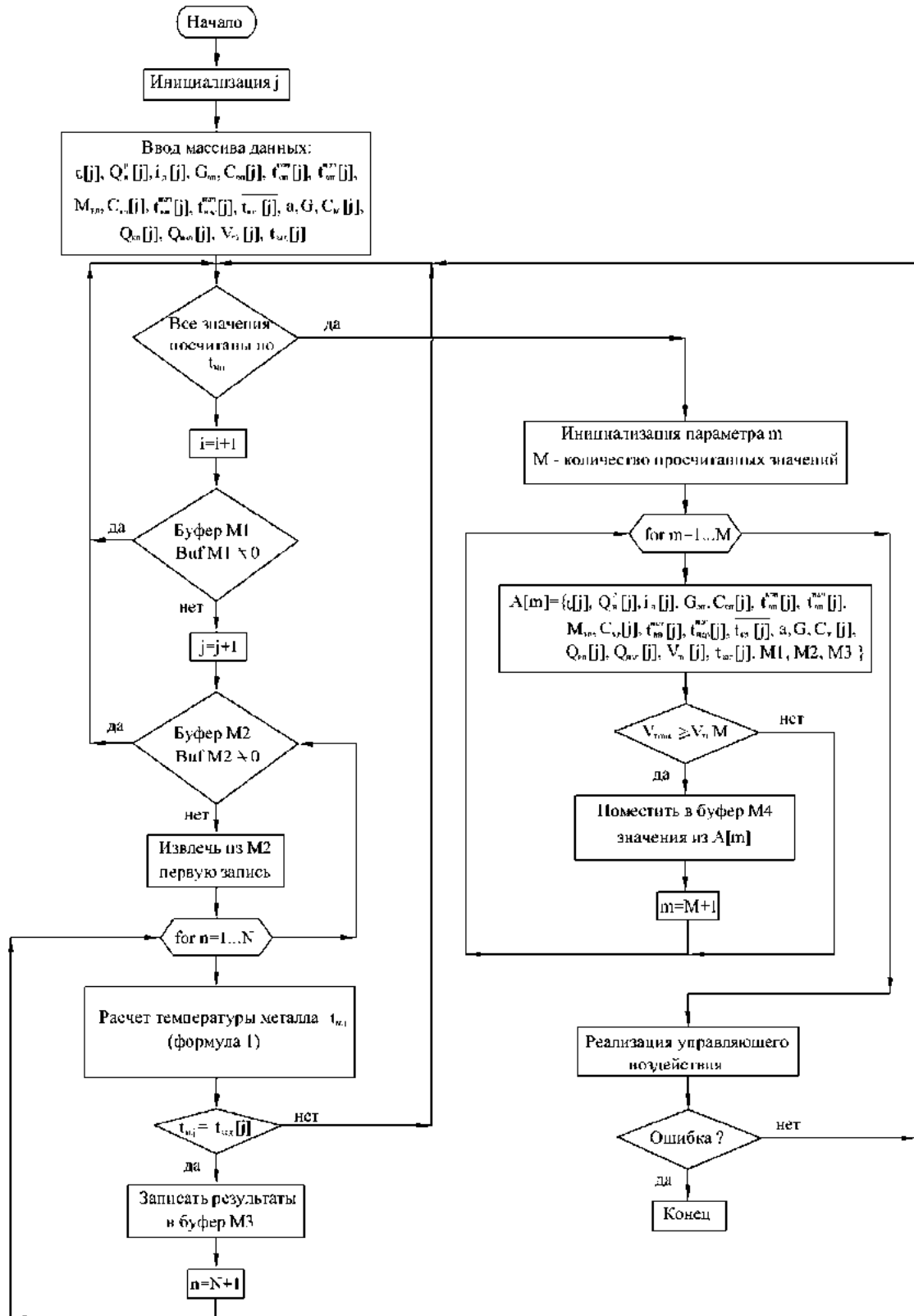


Рис. 1. Алгоритм управления процессом нагрева металла в камерной нагревательной печи

Расчет оптимальных управляющих воздействий начинается с ввода данных, которые оказывают влияние на температуру металла  $t_{mij}$  согласно выражению (1). Их массив представляет собой набор значений параметров во времени с шагом  $j$  (интервалы измерения температуры в камере печи):

- время нагрева  $\tau[j]$ , с (от 0 до 1395 мин, с шагом 15 мин, т.е.  $j = 93$ );
- низшая теплота сгорания топлива  $Q_n^p[j]$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- энтальпия уходящих продуктов сгорания  $i_\partial[j]$ , Дж/м<sup>3</sup>;
- общая масса опорных устройств, загруженных в камеру печи  $G_{on}$ , кг;
- теплоемкость материала опорных устройств  $C_{on}[j]$ , Дж / кг·К;
- начальная и конечная температуры опорных устройств  $t_{on}^{нач}[j], t_{on}^{кон}[j]$ , °С;
- масса кладки  $M_{кл}$ , кг; теплоемкость материала кладки  $C_{кл}[j]$ , Дж / кг·К;
- температура на внутренней и наружной поверхностях кладки в конце предыдущего нагрева  $t_{вн}^{нач}[j], t_{нар}^{кон}[j]$ , °С;
- средняя температура кладки после остывания  $\overline{t_{кл}}[j]$ , °С;
- экспериментальное значение угара металла  $\alpha$  [6];
- садка печи  $G$ , кг; теплоемкость металла  $C_M[j]$ , Дж / кг·К;
- потери тепла теплопроводностью через кладку  $Q_{кл}[j]$ , Вт;
- потери тепла излучением через открытые отверстия  $Q_{изл}[j]$ , Вт;
- расход газа на горелку  $V_{mij}$ , м<sup>3</sup>/ч;
- заданная температура нагрева металла согласно технологии  $t_{задj}$ , °С.

Программа, используя весь спектр управляющих воздействий  $n$  на одном шаге, с учетом ограничений по расходу топлива, рассчитывает на основании выражения (1)  $t_{mij}$  все возможные варианты перевода объекта управления из состояния  $i$  в состояние  $i+1$ , при  $j=1$ . На основании условно поданного расхода газа анализируется температура  $t_{M(i+1)j}$  и сравнивается с заданной  $t_{задj}$ . В случае, если значения полученной температуры  $t_{mij}$  не соответствуют необходимой температуре  $t_{задj}$ , то берется другой расход газа  $V_{mi}$ .

Если указанная температура достигнута, то в буфер М3 заносятся параметры последнего шага  $j$  расчета во времени и ставится метка, что результат достигнут и расчет завершен. В противном случае, сохраняются параметры текущего шага, и процесс расчета продолжается для следующего набора управляющих воздействий  $V_{mi}$ . При этом в буфере М1 содержатся все расчетные значения параметров управляющих воздействий  $V_{mi}$  и температур  $t_{mi}$  при  $j=1$ , а в буфере М2 – уже рассчитанные ранее значения  $t_{mij}$  и  $V_{mij}$  для всех  $j$ .

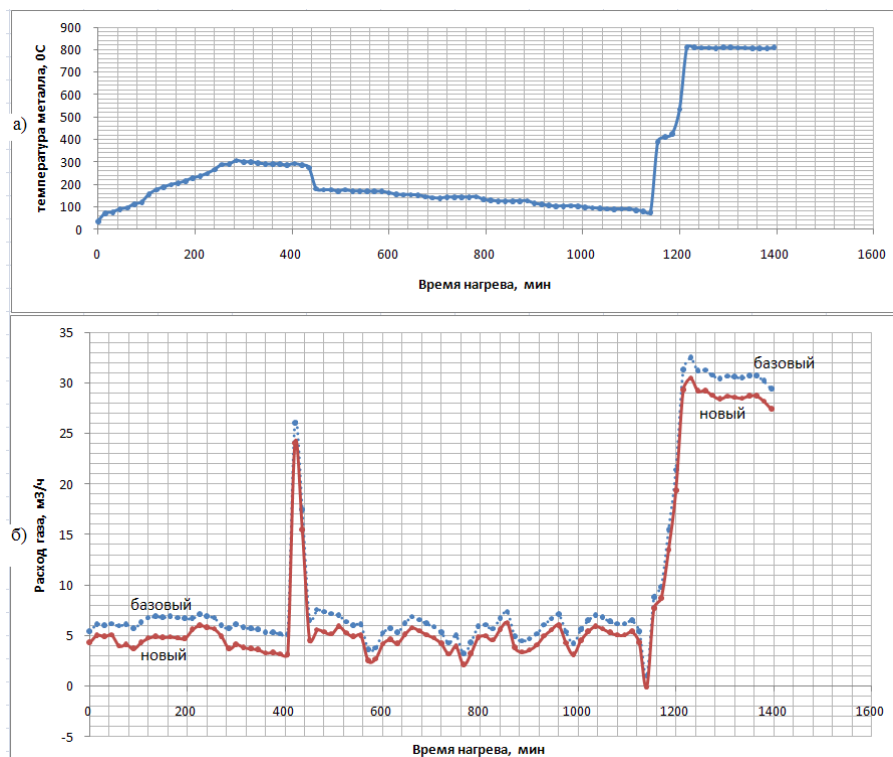
По окончании определения всех возможных значений  $t_{mij}$  на шаге  $i+1$  из буфера М1 в буфер М2 считываются параметры всех значений  $t_{mi}$ , которые не достигли требуемого значения для предыдущего шага расчета. Тогда процесс перебора ведется  $r \cdot n$  раз для шага  $i+2$ , где  $r$  – количество незавершенных операций. При получении необходимого результата в буфере М3 ставится метка. Процедура расчета продолжается до момента, пока все значения не будут соответствовать заданным.

После получения всех возможных управляющих воздействий  $V_{mi}$ , которые достигли  $t_{задj}$ , определяется динамика нагрева металла во времени, обеспечивающая минимум расхода газа. При этом берется начальное значение последнего и сравнивается со следующим по шагу; если оно меньше, то записывается в исходную переменную, т.е. прибавляется шаг  $M$  и процедура повторяется. Затем методом перебора определяется минимальное значение рассматриваемого расхода газа. Из буфера М4 извлекается вся полученная последовательность значений оптимальных параметров, которые до этого были отмечены соответствующими метками. Эта задача решается методом рекурсии, т.е. постепенного перебора значений по записям буфера М4, которые содержат нужную информацию.

Процесс перебора длится до тех пор, пока не будет пересмотрено все содержание буфера М4. Вся информация, удовлетворяющая рассматриваемому условию, заносится в связанный список. На следующем этапе с учетом этого списка, осуществляется управление процессом нагрева металла.

Анализируя на каждом шаге полученные ошибки, в случае превышения допустимого значения температуры  $t_{задj}$ , система управления отправляет в буфер М4 дополнительную метку-информацию о текущем состоянии процесса и дает команду на пересчет.

Ниже приведены графики изменения температуры во времени для конструкционной марки стали 40Г (рис. 2, а) при базовом режиме расхода газа и полученном согласно предложенному алгоритму (рис. 2, б).



**Рис. 2. Кривые изменения температуры (а) и расхода газа (б) в процессе нагрева металла**

Как видим из рис. 2, максимум расхода природного газа соответствует периоду «нагрев-выдержка» (1140 - 1395мин). Благодаря новому расположению горелочных устройств и вытяжных окон [5, 6], а также предложенному алгоритму (рис.1), на этом наиболее энергоемком участке удалось снизить потребление газа на 13% – его средний расход на печь изменился с 22,92 (м³/ч) на 19,94 м³/ч.

Сравнительный анализ полученных результатов приведен в таблице.

**Данные, полученные в результате сравнительного анализа расхода газа в процессе отжига металла за базовым и предложенным режимами**

|                          |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |       |
|--------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $\tau[j]$ , мин          | 1080  | 1095  | 1110  | 1125  | 1140  | 1155  | 1170  | 1185  | 1200  | 1215  | 1230  |
| $V_{тб}$ , м³/ч          | 6,17  | 6,51  | 5,44  | 1,01  | 8,80  | 9,85  | 15,49 | 21,40 | 31,32 | 32,49 | 31,22 |
| $V_{тн}$ , м³/ч          | 5,07  | 5,41  | 4,34  | 0,08  | 7,70  | 8,74  | 13,49 | 19,40 | 29,32 | 30,49 | 29,15 |
| Экономия от $V_{тн}$ , % | 17,8  | 16,9  | 20,2  | 92    | 12,5  | 11,3  | 12,9  | 9,3   | 6,4   | 6,2   | 6,6   |
| $\tau[j]$ , мин          | 1245  | 1260  | 1275  | 1290  | 1305  | 1320  | 1335  | 1350  | 1365  | 1380  | 1395  |
| $V_{тб}$ , м³/ч          | 31,25 | 30,76 | 30,41 | 30,68 | 30,60 | 30,49 | 30,73 | 30,71 | 30,19 | 29,42 | 29,42 |
| $V_{тн}$ , м³/ч          | 29,08 | 28,54 | 28,25 | 28,72 | 28,45 | 28,24 | 28,65 | 28,14 | 28,25 | 27,15 | 27,02 |
| Экономия от $V_{тн}$ , % | 6,9   | 7,2   | 7,1   | 6,4   | 7,0   | 7,4   | 6,8   | 8,4   | 6,4   | 3,7   | 8,2   |

**Выводы**

В результате оптимизационных расчетов процесса нагрева металла в камерной нагревательной печи был получен спектр управляющих воздействий (расход газа на горелки) во времени с интервалом в 15 мин. За счет соответствующего расположения горелочных устройств и вытяжных окон для отвода продуктов сгорания [5, 6], а также с учетом оптимальных управляющих воздействий на наиболее энерго-

емком учатске нагрєва (рис.2) бєло достигнуто сниженє расхода природного газа на 13% по сравнению с показателями действующей печи.

### **Список литературы**

1. Малый С.А. Экономичный нагрев металла/ С.А. Малый. – М.: «Металлургия», 1967. – 192с.
2. Бутковский А.Г. Оптимальное управление нагревом металла/ А.Г. Бутковский, С.А. Малый, Ю.Н. Андреев. – М.: «Металлургия», 1972. – 440с.
3. Управление нагревом металла. Изд. 2-е перераб. и доп. / Бутковский А.Г., Малый С.А., Андреев Ю.Н. – М.: Металлургия, 1981. – 272с.
4. Поливанчук А.С. Моделирование процесса нагрева металла в камерной печи при минимизации расхода топлива/ А.С. Поливанчук, С.В. Василец// Автоматизация технологических объектов та процесів. Пошук молодих. / Збірник наукових праць XI науково-технічної конференції аспірантів та студентів в м. Донецьку 17–20 травня 2011 р. – Донецьк, ДонНТУ, 2011, С. 64–68.
5. Качан Ю.Г. О повышении энергоэффективности камерных нагревательных печей с выкатным подом путем изменения положения горелочных устройств/ Ю. Г. Качан, В.В. Степкин, Ю. Б. Лиуш //Теория и практика металлургии.- 2012.-№5-6.-С.87-91.
6. Качан Ю.Г. Оптимизация нагревательных газовых печей с выкатным подом по критерию энергоэффективности/ Ю. Г. Качан, В.В. Степкин, Ю. Б. Лиуш// Металлургическая и горнорудная промышленность.-2013.-№3.-С.123-125.
7. Автоматизация металлургических печей/ В.Ю. Каганов, О.М. Блинов, Г.М. Глинков, В.А. Морозов. – М.: «Металлургия», 1975. – 376с.

*Рекомендовано до друку: д-ром техн. наук, проф. Волковим А.В.*