

Оценка влияния потерь теплоты на оптимальную по расходу топлива производительность камерной нагревательной печи

А.К. Соколов

ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
г. Иваново, Российская Федерация
E-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Авторское резюме

Состояние вопроса: В работах по исследованию энергосберегающих режимов газовых нагревательных печей даются противоречивые оценки характера зависимостей удельного расхода топлива на нагрев металла от продолжительности нагрева или производительности печи. Представляет интерес исследование условий нагрева металла, в основном влияющих на величину оптимальной производительности печи.

Материалы и методы: Исследование выполнено с помощью приближенной аналитической математической модели печи, осуществляющей нагрев металла по двухстадийному режиму.

Результаты: Проведена серия расчетов при различных условиях работы печи. 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 ограждениях и водоохлаждаемые элементы печи, максимальная (предельная) производительность печи может быть оптимальной только при больших удельных потерях теплоты в рабочем пространстве печи.

Выводы: Доказано, что утверждения некоторых авторов об оптимальности наискорейшего режима нагрева металла могут быть корректны только для частных условий работы печей. В общем случае величина оптимальной производительности печи в значительной степени будет зависеть от потерь теплоты из рабочего пространства печи.

Ключевые слова: газовая печь, нагрев металла, оптимизация режима, энергосбережение.

Assessing the heat loss impact on the optimal chamber heating furnace capacity in terms of fuel consumption

A.K. Sokolov

Ivanovo State Power Engineering University, Ivanovo, Russian Federation
E-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Abstract

Background: The previous studies of energy-saving modes of gas heating furnaces have controversial results in terms of assessing the dependences of metal heating specific fuel consumption on the heating time or furnace capacity. Therefore, it is interesting to investigate metal heating conditions mainly affecting the value of optimum furnace capacity.

Materials and methods: The study was performed using an approximate analytical mathematical model of the furnace, heating the metal in a two-stage mode.

Results: Simulations were conducted under various conditions of furnace operation. It is shown that fuel consumption can be low both in the fastest heating mode and in slower heating modes. It has been determined that the value of the optimal furnace production capacity is strongly influenced by the loss of heat in the fencing and water-cooled furnace elements. The maximum (ultimate) capacity of the furnace can be optimal only if the specific heat losses in the furnace are high.

Conclusions: It was proved that some authors' conclusions about the optimality of the fastest mode of metal heating are valid only for particular furnace operation conditions. In general, the value of the furnace optimal production capacity largely depends on the heat loss in the furnace working space.

Key words: gas furnace, metal heating, mode optimization, energy saving.

Нагревательные печи в реальных условиях эксплуатации могут работать с производительностями ниже предельных. В работах по исследованию энергосберегающих режимов газовых нагревательных печей даются противоречивые оценки характера зависимостей удельного расхода топлива b на нагрев металла от продолжительности нагрева $b(\tau_k)$ или производительности печи. В одних работах утверждается, что минимальный удельный расход топлива на нагрев металла наблюдается при наибольшей произво-

дительности или при наискорейшем для данных условий времени нагрева $\tau_{кн}$. В других работах, наоборот, указывается, что с ростом производительности увеличивается удельный расход топлива на нагрев металла.

Для оценки зависимости расхода топлива B на нагрев металла от продолжительности нагрева $B(\tau_k)$ целесообразно использовать аналитическое описание тепловой работы печи, которое позволит упростить получение и обобщение результатов анализа, а также с помощью простейших вычислительных средств выполнить

исследования для различных условий работы печи.

Исследуем влияние производительности печи на удельный расход топлива, используя разработанную нами математическую модель двухстадийного режима нагрева [1, 2, 3].

Двухстадийный режим является естественным режимом работы камерных печей периодического действия. В первой стадии ($0 \leq Fo \leq Fo_2$) при постоянном потоке теплоты в металл q температура поверхности металла $T(X=1, Fo)$ повышается от начальной T_n до заданной T_k ($Fo = a \cdot \tau / R^2$ – число Фурье; a – температуропроводность, m^2/c ; R – эффективный размер металла, m ; $X = x/R$ – относительная координата; x – координата). Во второй стадии регулированием работы горелок поддерживается $T = T_k = const$ до достижения заданного по сечению перепада температур ΔT_k (рис. 1).

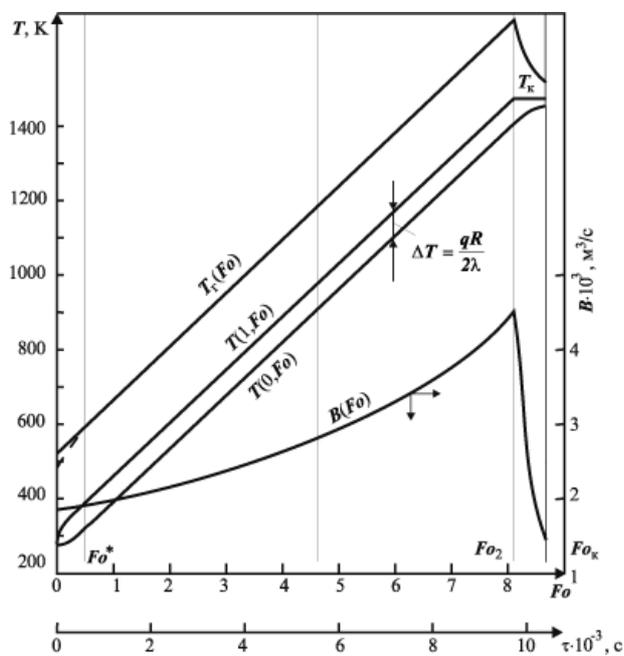


Рис. 1. Двухстадийный режим нагрева металла

Представив основные режимные параметры функцией потока теплоты q , можно получить аналитическую зависимость $B(q)$ и найти ее экстремальное значение.

Рассмотрим упрощенную математическую модель двухстадийного режима, которую можно использовать для его оптимизации. Поскольку модель приближенно описывает тепловую работу печи, предлагаемое описание взаимосвязи параметров имеет, прежде всего, методическое значение.

В первой стадии температурное поле металла можно рассчитать при граничном условии $q = const$, а во второй – при граничном условии первого рода $T = T_k = const$ и начальном параболическом распределении температур по сечению металла.

При заданных значениях эффективного размера R , начальной и конечной температур металла

T_n, T_k , конечного перепада температур ΔT_k и числа Фурье для конца нагрева $Fo_k = a \cdot \tau_k / R^2$ режим определяется однозначно и не имеет свободных оптимизируемых параметров, поэтому примем, что время нагрева Fo_k (τ_k или производительность) не задано, тогда критерий оптимальности можно представить функцией одной переменной.

Оптимизируемым параметром удобнее назначить не время, а величину потока теплоты в первом периоде q . Все параметры режима взаимосвязаны, а через значение q проще выразить величину затрат на нагрев.

Математическая модель. Примем, что теплофизические свойства нагреваемого металла умеренной массивности не зависят от температуры. Температура поверхности для квазистационарного нагрева [4] при $Fo > Fo^*$ ($Fo^* = 1/(2 \cdot \kappa)$) будет изменяться с постоянной скоростью:

$$T(1, Fo) = T_n + \frac{qR}{\lambda} \left(\kappa Fo + \frac{1}{2} - \frac{\kappa}{2(\kappa + 2)} \right), \quad (1)$$

$$Fo^* \leq Fo \leq Fo_2,$$

где κ – коэффициент формы тела ($\kappa = 1, 2, 3$ для пластины, цилиндра, шара соответственно); λ – коэффициент теплопроводности, $Вт/(м \cdot К)$.

Перепад температур по сечению тела в этот период будет постоянен:

$$\Delta T(Fo) = \frac{qR}{2\lambda} = const. \quad (2)$$

Время Fo_2 достижения конечной температуры T_k найдется из (1) при $T(1, Fo_2) = T_k$:

$$Fo_2 = \left(\lambda \frac{T_k - T_0}{qR} - \frac{1}{2 + \kappa} \right) / \kappa. \quad (3)$$

Выражения для расчета времени выдержки и потока теплоты во второй стадии нагрева запишем в виде

$$Fo_B = Fo_k - Fo_2 = D_1 \ln \left[D_2 \kappa qR / (\lambda \Delta T_k) \right], \quad (4)$$

$$q_B = q_2(Fo) = q(q_k / q)^{\frac{Fo - Fo_2}{Fo_B}}, \quad (5)$$

$$\text{где } q_k = \frac{D_3 \lambda}{D_2 \kappa R} \Delta T_k.$$

Коэффициенты D_1, D_2, D_3 , полученные из решения уравнения теплопроводности для пластины, цилиндра, шара, имеют соответственно следующие значения: $D_1 = 0,405; 0,175; 0,101$; $D_2 = 0,516; 0,278; 0,203$; $D_3 = 0,833; 0,692; 0,608$.

Для записи законов изменения температуры газов $T_r(Fo)$ примем, что теплообмен в рабочем пространстве отвечает закону конвективной теплоотдачи:

$$q = \alpha_\Sigma [T_r - T(1, Fo)]. \quad (6)$$

И, учитывая (1), (5), запишем:

$$T_r(Fo) = T_n + \frac{qR}{\lambda} \left(\kappa Fo + \frac{1}{2} - \frac{\kappa}{2(\kappa + 2)} \right) + \frac{q}{\alpha_\Sigma}, \quad (7)$$

$$0 \leq Fo \leq Fo_2,$$

$$T_r(Fo) = T_k + \frac{q}{\alpha_\Sigma} \left(q_k/q \right)^{\frac{Fo-Fo_2}{Fo_B}}, \quad Fo_2 < Fo \leq Fo_k, \quad (8)$$

где α_Σ – коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·К).

Следует отметить, что закон (7), справедливый для диапазона $Fo^* \leq Fo \leq Fo_2$, распространен и на участок $0 \leq Fo \leq Fo^*$, где он приближенно описывает реальное изменение температуры газа.

Допуская, что теплоемкость газов не зависит от температуры, а их температура одинакова во всем объеме печи, суммарный расход топлива можно найти интегрированием уравнения баланса теплоты:

$$B_\Sigma = \frac{R^2 F_H}{a} \int_0^{Fo_k} \frac{F_H[q(Fo) + q_n]}{Q_T - c_T(T_r(Fo) - 273)} dFo = \frac{R^2 F_H}{a} \times \left[\int_0^{Fo_2} \frac{q + q_n}{Q_T - c_T(T_r(Fo) - 273)} dFo + \int_0^{Fo_B} \frac{q \left(\frac{q_k}{q} \right)^{\frac{Fo}{Fo_B}} + q_n}{Q_T - c_T(T_r(Fo) - 273)} dFo \right], \quad (9)$$

где q_n – потери теплоты из рабочего пространства на 1 м² эффективной площади поверхности металла F_H , Вт/м²; Q_T – химическая и физическая теплота топлива и воздуха, идущего на горение; $c_T = c \cdot V^n$ – теплоемкость продуктов сгорания, на 1 м³ топлива, Дж / (К·м³), (м³ топлива); c – теплоемкость продуктов сгорания, Дж / (К·м³); V^n – удельный объем продуктов сгорания 1 м³ топлива с коэффициентом расхода воздуха n .

Интегрируя (9) с учетом законов изменения температуры газов (7), (8), получим

$$B_\Sigma = \frac{R^2 F_H}{a} \left\{ \frac{\lambda(q + q_n)}{c_T q R k} \ln \frac{Q_T - c_T(T_r(Fo=0) - 273)}{\Theta - c_T q / \alpha_\Sigma} + Fo_B \left[\left(\frac{\alpha_\Sigma}{c_T} + \frac{q_n}{\Theta} \right) \ln \frac{\Theta - c_T q_k / \alpha_\Sigma}{\Theta - c_T q / \alpha_\Sigma} / \ln \frac{q}{q_k} + \frac{q_n}{\Theta} \right] \right\}, \quad (10)$$

где $\Theta = Q_T - c_T(T_k - 273)$, $T_r(Fo=0)$ – температура газа в начальный момент времени:

$$T_r(Fo=0) = T_H + \frac{qR}{\lambda(k+2)} + \frac{q}{\alpha_\Sigma}. \quad (11)$$

Исследование режимов нагрева металла. Рассмотрим пример расчета параметров двухстадийного режима нагрева металла.

Определим расход топлива для режима нагрева пластины $R = 0,1$ м из стали 45 от $T_H = 273$ К до $T_k = 1473$ К и $\Delta T_k = 20$ в атмосфере продуктов сгорания природного газа ($Q_T = 35,9 \cdot 10^{16}$ Дж/м³, $c_T = 14500$ Дж/(м³·°С)) с коэффициентом расхода воздуха, близким к единице, при $\alpha_\Sigma = 213$ Вт/(м²·К) и ограничении на температуру газа $T_r \leq T_r^{на} = 1673$ К.

Примем величину потока теплоты в первом периоде $q = 42600$ Вт/м² и следующие параметры процессов теплообмена: $k = 1$, $D_1 = 0,405$; $D_2 = 0,516$; $D_3 = 0,833$, $F_H = 1$ м², $a = 8,34 \cdot 10^{-6}$ м²/с,

$\lambda = 30$ Вт/(м·К), $q_n = 10000$ Вт/м² (на 1 м² открытой площади поверхности металла).

1. Проверим, будет ли выполняться ограничение на температуру газа в конце первого периода $T_{r,2}$:

$$T_r(Fo_2) = T_k + q/\alpha_\Sigma = 1473 + 42600/213 = 1673 \text{ К.}$$

Температура газа в конце первого периода равна предельной $T_r^{на} = 1673$ К, следовательно, поток теплоты $q = 42600$ Вт/м² и производительность печи также являются предельными величинами, а время нагрева – наискорейшим.

Определим остальные режимные параметры по величине $q = 42600$ Вт/м².

2. Время первого периода Fo_2 вычислим по (3):

$$Fo_2 = \left(30 \frac{1473 - 273}{1 \cdot 42600 \cdot 0,1} - \frac{1}{2+1} \right) / 1 = 8,12.$$

Время нагрева до начала квазистационарного режима $Fo^* = 1/(2 \cdot k) = 1/(2 \cdot 1) = 0,5$ значительно меньше $Fo_2 = 8,12$, следовательно, погрешность от распространения закона (7) на участок $0 \leq Fo \leq Fo^*$ невелика:

$$Fo_1 = 30 \frac{973 - 273}{1 \cdot 42600 \cdot 0,1} - \frac{1}{3} = 4,6.$$

3. Время выдержки при $T_k = 1473$ К определим по формуле (4):

$$Fo_B = 0,405 \cdot \ln \left(0,516 \frac{1 \cdot 42600 \cdot 0,1}{30 \cdot 20} \right) = 0,53.$$

Тогда общее время пребывания металла в печи составит

$$Fo_k = Fo_2 + Fo_B = 8,65 \text{ или}$$

$$\tau_k = Fo_k R^2/a = 10380 \text{ с} = 2,88 \text{ ч.}$$

4. Температуры поверхности металла при $Fo = Fo^*$ 0,5 составит

$$T(1,Fo) = 273 + \frac{42600 \cdot 0,1}{30} \left(1 \cdot 0,5 + \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1+2)} \right) = 391 \text{ К.}$$

5. По (7), (11) определим температуры газов для $Fo = 0$, Fo^* , Fo_2 , которые будут равны $T_r(Fo) = 520,3$; 591,1; 1673 К.

6. Рассчитаем величину потока теплоты в конце нагрева q_k (см. (5)):

$$q_k = 0,833 \cdot 30 \cdot 20 / (0,516 \cdot 0,1 \cdot 1) = 9700 \text{ Вт/м}^2,$$

и определим по ней температуры газов в середине второй стадии нагрева:

$$Fo_{B/2} = Fo_2 + Fo_B / 2 = 8,12 + 0,53/2 = 8,38,$$

$$T_r(Fo = 8,38) = 1473 + \frac{42600}{213} \left(\frac{9700}{42600} \right)^{0,5} = 1569$$

и в конце второго периода по (8) при $Fo = Fo_k$:

$$T_r(Fo_k) = 1473 + 9700/213 = 1519.$$

7. Расход топлива для интересующих моментов времени $B(Fo)$ определим по формуле

$$B(Fo) = \frac{q + q_n}{Q_T - c_T(T_r(Fo) - 273)} = \frac{q + q_n}{\Theta}. \quad (12)$$

Например, при $q_n = 10000$ Вт/м² для $Fo = 0$ получим

$$B(0) = \frac{1000(42,6 + 10)}{(35,9 \cdot 10^6 - 14500(520 - 273))} = 1,628 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}.$$

Расходы топлива для других моментов времени составят: $B(\text{Fo}_2) = 3,371 \cdot 10^{-3}$, $B(\text{Fo}_k) = 1,103 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

При $\Theta = Q_T - c_T(T_k - 273) = 35,9 \cdot 10^6 - 4500(1473 - 273) = 18,5 \cdot 10^6$ суммарный расход топлива найдется по (10):

$$B_{\Sigma} = \frac{0,1^2 \cdot 1}{8,34 \cdot 10^{-6}} \left\{ \frac{30(42600 + 10000)}{14500 \cdot 42600 \cdot 0,1 \cdot 1} \times \right. \\ \times \ln \frac{35,9 \cdot 10^6 - 14,5 \cdot 10^3(520,3 - 273)}{18,5 \cdot 10^6 - 14500 \cdot 42600/213} + \\ \left. + 0,53 \left[\left(\frac{213}{14500} + \frac{10000}{18,5 \cdot 10^6} \right) \times \right. \right. \\ \left. \left. \times \frac{\ln \frac{18,5 \cdot 10^6 - 14500 \cdot 9700/213}{18,5 \cdot 10^6 - 14500 \cdot 42600/213}}{\ln \frac{42600}{9700} + \frac{10000}{18,5 \cdot 10^6}} \right] \right\} = 23,52 \text{ м}^3.$$

Рассчитаем суммарный расход топлива B , м^3 , и время нагрева τ_k , ч, в зависимости от потока теплоты q в первом периоде нагрева. Результаты расчета приведены на рис. 2.

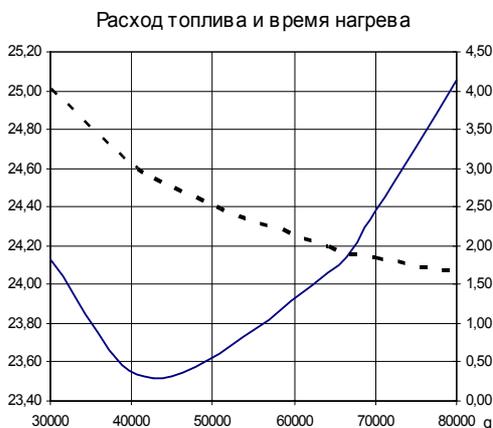


Рис. 2. Зависимости расхода топлива B , м^3 , и времени нагрева τ_k , ч, от потока теплоты q для первого периода нагрева пластины $R = 0,1$ м (функция τ_k показана пунктиром, шкала справа)

Минимум расхода топлива, а также удельного расхода условного топлива соответствует $q_{\text{опт}} = 43000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ (рис. 2) и конечному времени нагрева в диапазоне $2,3 \leq \tau_k \leq 1,8$ ч, что соответствует производительности $0,4 \text{ т}/(\text{ч} \cdot \text{м}^2)$ (1 м^2 активной площади пода).

Отметим, что минимумы функций $B(q)$ находятся на границе допустимой области, а это затрудняет поиск экстремума численными методами при использовании более сложных математических моделей и режимов нагрева.

Для принятых исходных данных возможная эффективность оптимизации по топливу в рассмотренном диапазоне изменения q составляет 6 %. С учетом ограничения на температуру газа возможный эффект будет еще меньше.

На рис. 3 приведены аналогичные функции, рассчитанные для более массивной пластины $R = 0,2$ м в диапазоне $20000 \leq q \leq 50000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ при тех же исходных данных. Величина предельного потока теплоты по условию $T_r \leq T_r^{\text{нд}} = 1673 \text{ К}$ составила $q_{\text{нд}} = 49000 \text{ Вт}/\text{м}^2$. Оптимальный поток теплоты по расходу топлива получился рав-

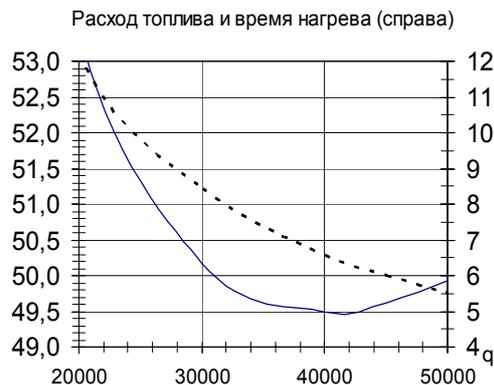


Рис. 3. Зависимости расхода топлива B , м^3 и времени нагрева τ_k , ч, от потока теплоты q для первого периода нагрева пластины $R = 0,2$ м (τ_k – пунктир, шкала справа)

ным $q = 41000 \text{ Вт}/\text{м}^2$.

Возможный эффект оптимизации в диапазоне $30000 \leq q \leq 50000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ($5,5 \leq \tau_k, \leq 8,5$ ч) может составить $50,2 - 49,5 = 0,7 \text{ м}^3$ ($\sim 1,4 \%$) – по топливу.

Для более массивной пластины $R = 0,2$ м (рис. 3) минимальный расход топлива (удельный расход условного топлива) наблюдается практически для того же значения $q_{\text{опт}} = 42000 \text{ Вт}/\text{м}^2$ ($\tau_k = 6,4$ ч), что и для пластины $R = 0,1$ м, которое, однако, меньше предельного значения $q_{\text{нд}} = 42300 \text{ Вт}/\text{м}^2$, а время нагрева $\tau_k = 6,2$ ч немного меньше наискорейшего ($\tau_k = 6,4$ ч).

По уравнению баланса теплоты для рабочего пространства печи можно сделать вывод, что на зависимость $B_{\Sigma}(\tau_k)$ в основном влияет величина потерь теплоты, так как количество теплоты на нагрев металла не зависит от τ_k (все рассматриваемые режимы должны обеспечивать одинаковое качество нагрева!).

Проиллюстрируем и оценим влияние величины потерь теплоты q_n на положение оптимума.

На рис. 4 приведены результаты расчета пластины $R = 0,1$ м при $a = 7,00 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $\alpha_{\Sigma} = 250 \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$, $T_k = 1373 \text{ К}$ (остальные параметры приняты такими же, как в примере расчета) с различными потерями теплоты – $q_n = 5, 15, 25 \text{ кВт}/\text{м}^2$ (м^2 верхней поверхности пластины).

Величина предельного потока теплоты по условию $T_r \leq T_r^{\text{нд}} = 1673 \text{ К}$ для этого примера

составила $q_{нд} = 74 \text{ кВт/м}^2$ (наискорейшее время нагрева - $\tau_{к,мин} = 1,9 \text{ ч}$).

Величины удельных потерь теплоты q_n были подобраны таким образом, чтобы минимумы расхода топлива находились при различных значениях q и τ_k , близких к середине и границам исследованного диапазона. При $q_n = 5, 15, 25 \text{ кВт/м}^2$ оптимальные потоки получились равными $q_{опт} = 30, 60, 74 \text{ кВт/м}^2$, а оптимальное время нагрева - $\tau_k = 4,4; 2,3; 1,9 \text{ ч}$ соответственно.

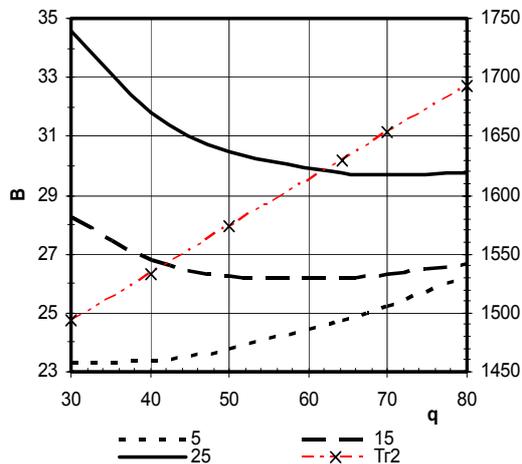


Рис. 4. Зависимости расхода топлива $V, \text{ м}^3$, и температуры газа $T_{г2}, \text{ К}$ (шкала справа) от потока теплоты q для первого периода нагрева при различных потерях теплоты - $q_n = 5, 15, 25 \text{ кВт/м}^2$

Анализ полученных данных позволяет сделать вывод, что минимальный расход топлива может быть как при наискорейшем режиме нагрева ($B_{\Sigma} = \min$ при $\tau_k = \min, q_n = 25 \text{ кВт/м}^2$), так и при режимах нагрева с временем нагрева больше наискорейшего ($q_n < 25 \text{ кВт/м}^2$). Наискорейший режим нагрева может быть оптимальным по расходу топлива только при больших удельных потерях теплоты в рабочем пространстве печи.

При небольших потерях теплоты, например, для печи без водоохлаждаемых элементов минимальный расход топлива должен быть при производительностях печи ниже предельной.

Представляет интерес определение условий, при которых $B_{\Sigma} = \min$ при $\tau_k = \min$.

Количество топлива, подаваемого в печь, $B_{\Sigma}, \text{ м}^3$, можно разделить на две части:

- топливо, идущее на нагрев металла

$$B_{\Sigma,м} = Q_M / q_r; \tag{13}$$

- топливо, идущее на компенсацию потерь теплоты в кладку и водоохлаждаемые элементы печи

$$B_{\Sigma,п} = Q_n / q_r, \tag{14}$$

где Q_M - количество теплоты, затраченное на нагрев металла, Дж:

$$Q_M = (\lambda / a) \cdot R \cdot F_H = (T_k - T_H - 2 \cdot \Delta T_k / 3); \tag{15}$$

Q_n - количество теплоты, теряемое из рабочего пространства теплопроводностью и излучением, Дж:

$$Q_n = q_n \cdot \tau_k; \tag{16}$$

q_r - количество теплоты, которую в рабочем пространстве оставляют продукты сгорания топлива (на м^3 топлива):

$$q_r = Q_T - c_T \cdot T_{г,ср} \text{ или } q_r = (Q_M + Q_n) / B_{\Sigma}. \tag{17}$$

На рис. 5 показаны зависимости $B_{\Sigma}(q), B_{\Sigma,п}(q), B_{\Sigma,м}(q)$ для $q_n = 5$ и 25 кВт/м^2 . Они хорошо иллюстрируют структуру баланса теплоты и знак производной $dB_{\Sigma}(q)/dq$, которая определяет характер изменения функции $B_{\Sigma}(q)$ при росте производительности q .

Количество топлива B_{Σ} при $q_n = 5 \text{ кВт/м}^2$ минимально для $q_{опт} = 30$, а при $q_n = 25 \text{ кВт/м}^2$ для $q_{опт} = 80$, т. е. вблизи предельной производительности.

Функции $B_{\Sigma,м}(q)$ для обоих значений $q_n = 5$ и 25 кВт/м^2 имеют положительную производную и, естественно, совпадают.

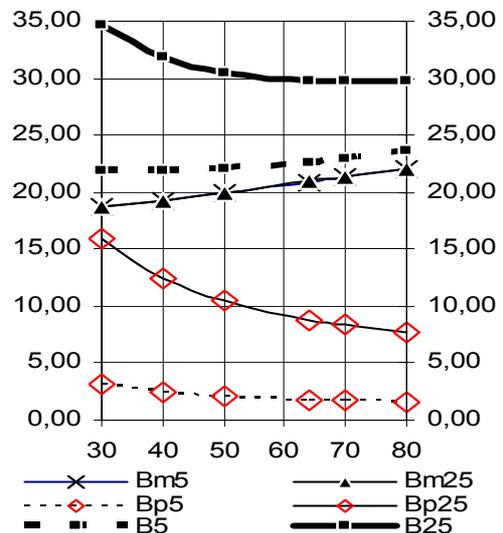


Рис. 5. Зависимости суммарного количества топлива $B = B_{\Sigma}(q)$, количества топлива на нагрев металла $B_m = B_{\Sigma,м}(q)$ и на компенсацию потерь $B_p = B_{\Sigma,п}(q)$ от q (цифры в обозначениях - удельные потери $q_n, \text{ кВт/м}^2$)

Значения обеих функций $B_{\Sigma,п}(q)$ с ростом q снижаются, так как сокращается время нагрева (см. формулу (16)).

Количество топлива $B_{\Sigma,п}(q)$, идущее на компенсацию потерь теплоты при $q_n = 25 \text{ кВт/м}^2$, с ростом q снижается более быстро. Именно это и определяет смещение минимума $B_{\Sigma}(q)$ в сторону больших значений производительности q .

Таким образом, можно считать, что причиной снижения количества топлива B_{Σ} при увеличении q является условие

$$-dB_{\Sigma,п}(q)/dq > dB_{\Sigma,м}(q)/dq. \tag{18}$$

Расчет величин относительных потерь теплоты $\delta_n = 100 \cdot Q_n / (B_{\Sigma} \cdot Q_r)$ показал, что для принятых условий ($q = 30 \dots 80 \text{ кВт/м}^2$) они изменяются в широких диапазонах:

10...3,9 % ($q_n = 5 \text{ кВт/м}^2$);
23,4...10,2 % ($q_n = 15 \text{ кВт/м}^2$);
31,8...15,3 % ($q_n = 25 \text{ кВт/м}^2$).

Минимумы расхода топлива наблюдались при $\delta_n = 10 \%$ ($q_n = 5 \text{ кВт/м}^2$, $q = 30 \text{ кВт/м}^2$), $\delta_n = 12,5 \%$ ($q_n = 15 \text{ кВт/м}^2$, $q = 60 \text{ кВт/м}^2$), $\delta_n = 15,3 \%$ ($q_n = 25 \text{ кВт/м}^2$, $q = 80 \text{ кВт/м}^2$).

Анализ величин δ_n показывает, что по ним сложно оценивать характер зависимости $B_{\Sigma}(q)$. Возможно, поэтому попытка аналитического определения границ выполнения условия $B_{\Sigma} = \min$ при $\tau_k = \min$ пока оказалась безуспешной.

Проведенные исследования доказывают, что величина оптимальной производительности печи в значительной степени зависит от величины удельных потерь теплоты из рабочего пространства теплопроводностью. В частных случаях при больших потоках теплоты из рабочего пространства печи (кВт/м^2) оптимальным по расходу топлива может быть наискорейший режим.

Важно подчеркнуть, что минимум более общего критерия оптимальности – суммарных затрат на нагрев металла – будет наблюдаться при сравнительно больших производительностях печи, поскольку часть удельных расходов (амортизационные отчисления, зарплата и др.) будут снижаться с ростом производительности печи. Следовательно, наискорейший режим может быть оптимальным по суммарным затратам на нагрев металла при сравнительно меньших удельных потерях теплоты из рабочего пространства теплопроводностью.

Более точное значение оптимальной производительности для конкретных печей должно определяться с помощью более сложных математических моделей.

Соколов Анатолий Константинович,
ФГБОУВПО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»,
доктор технических наук, профессор кафедры безопасности жизнедеятельности,
телефон (4932) 26-99-37,
e-mail: sokolov@bjd.ispu.ru

Математическая модель исследованного режима, естественно, содержит много допущений, особенно при описании внешнего теплообмена и потерь теплоты. Однако с ее помощью легко исследовать режимы нагрева металла, в том числе в процессе обучения.

Список литературы

1. Бровкин Л.А., Соколов А.К. О режиме нагрева в промышленных печах с минимальным окислением // Изв. вузов. Черная металлургия. – 1979. – № 7. – С. 161–165.
2. Соколов А.К. Моделирование и оптимизация режимов нагрева металла в промышленных печах: дис. ... канд. техн. наук. – Иваново, 1975. – 156 с.
3. Бровкин Л.А., Соколов А.К. Экономичный режим работы печи периодического действия // Тепломассообмен в промышленных установках: сб. тр. – Иваново, 1972. – № 1. – С. 94–100.
4. Бровкин Л.А. Температурные поля тел при нагреве и плавлении в промышленных печах: учеб. пособие. – Иваново, 1973. – 364 с.

References

1. Brovkin, L.A., Sokolov, A.K. O rezhime nagreva v promyshlennykh pechakh s minimal'nym okisleniem [On heating modes in industrial furnaces with minimum oxidation]. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya*, 1979, no. 7, pp. 161–165.
2. Sokolov, A.K. *Modelirovanie i optimizatsiya rezhimov nagreva metalla v promyshlennykh pechakh*. Diss. kand. tekhn. nauk [Simulation and optimization of metal heating modes in industrial furnaces. Cand. tech. sci. diss.]. Ivanovo, 1975. 156 p.
3. Brovkin, L.A., Sokolov, A.K. Ekonomichnyy rezhim raboty pechi periodicheskogo deystviya [Economy mode of batch furnace operation]. *Sbornik trudov: «Tepломассообмен v promyshlennykh ustanovkakh»* [Collected works «Heat-mass exchange in industrial installations»]. Ivanovo, 1972, no. 1, pp. 94–100.
4. Brovkin, L.A. *Temperaturnye polya tel pri nagreve i plavlenii v promyshlennykh pechakh* [Temperature fields of bodies heated and melted in industrial furnaces]. Ivanovo, 1973. 364 p.