

УДК 620:172.251:621.182.3

Гупало Е. В.
Ерёмин А. О.**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ НАГРЕВА МЕТАЛЛА В КОЛЬЦЕВОЙ ПЕЧИ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ ПРОКАТНОГО СТАНА**

В работе Карп И. Н., Зайвый А. Н. [1] отмечается, что затраты топлива на производство проката в энергетическом балансе металлургических предприятий составляют не менее 10–12 %. Доля энергозатрат в себестоимости готового проката достигает 40 %. Внедрение новых энергосберегающих технологий, использование физической теплоты уходящих дымовых газов, замена дорогостоящего природного газа вторичными энергоресурсами, оптимизация режимов работы нагревательных печей являются актуальными задачами, стоящими перед металлургическими предприятиями в современных условиях [1, 2].

Глобальное перевооружение производства, применение современных технологий и достижений науки и техники требуют огромных инвестиций, трудовых ресурсов и достаточно значительного времени. В то же время техническое перевооружение возможно осуществить поэтапным внедрением энерго- и ресурсосберегающих решений в отдельных агрегатах и цепочках производства. Такие мероприятия и технологии должны быть направлены на экономию топлива, защиту окружающей среды и получение высококачественного и конкурентоспособного конечного продукта [3].

В трубопрокатных цехах в качестве нагревательных устройств используются кольцевые печи. История развития кольцевых печей началась в 30-х годах прошлого века. За 80 лет своего существования эти нагревательные устройства прошли путь от примитивных с теплотехнической точки зрения агрегатов до высокопроизводительных устройств с современной футеровкой, эффективными горелками и теплоутилизаторами.

Как правило, крупнотоннажные кольцевые печи проектируются в расчете на высокую производительность и стабильную работу прокатных станов. В настоящее время вопросы производительности теряют свою актуальность. Повсеместное снижение производства металлопроката, заказы мелких партий труб приводят к частой перестройке прокатных станов. Кольцевые печи в таких условиях работают с неполной загрузкой, с переменной производительностью и, как следствие, высокими энергетическими затратами. Пути снижения расхода топлива в такой ситуации связаны с разработкой рациональных режимов тепловой работы печей, непосредственно зависящих от текущей производительности прокатных станов.

Целью работы является разработка энергоэффективных способов нагрева металла в кольцевых печах, работающих с переменной производительностью. Задача решается с помощью математического моделирования.

Математическая модель основывается на известных аналитических решениях нагревателей в движущемся слое [4–5].

Для расчета нагрева в отапливаемых зонах печи использовано решение задачи теплообмена в движущемся слое с распределенным подводом теплоносителя по длине теплового агрегата и заданном графике изменения среднemasсовой температуры металла. Математическая постановка задачи имеет вид.

Тепловой баланс по нагреваемому металлу:

$$\frac{d\bar{t}_m}{d\tau} = \frac{\alpha k_l}{m R \rho_m C_m} (t_d - \bar{t}_m). \quad (1)$$

Тепловой баланс по газу имеет вид:

$$B_2 V_d C_d \frac{d t_d}{d \tau} + (V_d C_d t_d - Q_n^p - Q_{\phi}) \frac{d B_2}{d \tau} = \Pi C_m \frac{d \bar{t}_m}{d \tau} + \frac{K_{кл} F_{кл} \Pi}{M_m} t_d. \quad (2)$$

Закон изменения среднemasсовой температуры металла, обеспечивающий достижение заданных параметров нагрева:

$$\bar{t}_m = \beta_1 - (\beta_1 - \bar{t}_{m1}) \exp(-\beta_2 \tau). \quad (3)$$

$$\text{Начальные условия: } \bar{T}_m|_{\tau=0} = T_{m0}, \quad \bar{T}_m|_{\tau=\tau_k} = \bar{T}_{m1}, \quad T_\partial|_{\tau=\tau_k} = T_{\partial 0}.$$

Здесь τ – время, с; t_∂ – текущая температура греющего газа, °С; α – коэффициент теплоотдачи излучением, Вт/(м²·К); k_1, k_2, k_3 – коэффициенты формы тела, усреднения тепловых потоков и температур соответственно; $m = (k_3 - 1) \cdot Bi / (k_2 \cdot k_3) + 1$ – коэффициент массивности тела; $Bi = \alpha \cdot R / \lambda$ – число Био; R – радиус заготовки, м; λ – коэффициент теплопроводности металла, Вт/(м·К); ρ_m – плотность металла, кг/м³; C_m – средняя удельная теплоемкость металла, Дж/(кг·К); B_2 – текущий расход топлива, м³/с; V_∂ – удельный выход продуктов сгорания, м³/м³; C_∂ – средняя удельная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/(м³·К); Q_n^p – низшая рабочая теплота сгорания топлива, Дж/м³; Q_ϕ – теплота, вносимая в печь с подогретым воздухом, Дж/м³; P – производительность печи, кг/с; $K_{кл}$ – коэффициент теплопередачи через кладку печи, Вт/(м²·К); $F_{кл}$ – площадь поверхности кладки зоны теплообмена, м²; M_m – масса нагреваемого в зоне металла, кг; β_1 и β_2 – коэффициенты закономерности изменения среднemasсовой температуры материала, °С и с⁻¹ соответственно.

Решение задачи нагрева металла в отапливаемых зонах кольцевой печи приведено в работе [4]. В ходе расчета определяется характер распределения температуры и расхода топлива в отапливаемых зонах. Рассчитывается общий расход топлива на нагрев металла, температура и расход продуктов сгорания на входе в методическую зону.

Расчет нагрева металла в методической зоне использовано аналитического решения задачи нагрева тел в противотоке при нелинейных граничных условиях. Математическая постановка задачи представлена уравнениями (4)–(8):

$$\frac{\partial T(x, \tau)}{\partial \tau} = a \left[\frac{\partial^2 T(x, \tau)}{\partial x^2} + \frac{k_1 - 1}{x} \cdot \frac{\partial T(x, \tau)}{\partial x} \right]; \quad (4)$$

$$\lambda \frac{\partial T(R, \tau)}{\partial x} = \sigma_\partial (T_\partial^4 - T^4(R, \tau)); \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial T(0, \tau)}{\partial x} = 0; \quad (6)$$

$$T(x, 0) = T_{m0}; \quad (7)$$

$$B_{20} V_\partial C_\partial (T_{\partial 0} - T_\partial) = P C_m (T_{mk} - \bar{T}_m) + K_p B_{20} V_\partial C_\partial (T_{\partial 0} - T_\partial). \quad (8)$$

$$\text{Начальные условия: } \bar{T}_m|_{\tau=0} = T_{m0}, \quad \bar{T}_m|_{\tau=\tau_k} = \bar{T}_{m1}, \quad T_\partial|_{\tau=\tau_k} = T_{\partial 0}.$$

Здесь $x = 0 \dots R$ – координата тела, м; $a = \lambda / (\rho C_m)$ – коэффициент температуропроводности металла, м²/с; T_{m0} и $T_{\partial 0}$ – температуры металла и греющего газа с которыми они вступают в теплообмен, °К; \bar{T}_{m1} – среднemasсовая температура металла на выходе из методической зоны, °К; σ_∂ – приведенный коэффициент излучения продуктов сгорания, Вт/(м²·К⁴); B_{20} – общий расход топлива на нагрев металла в отапливаемых зонах печи, м³/с; K_p – доля тепловых потерь рабочим пространством методической зоны; τ_k – продолжительность нагрева металла в методической зоне, с.

Решение задачи приведено в работе [5] и позволяет определить продолжительность нагрева металла в методической зоне (τ_k) до заданной температуры (\bar{t}_{MI}) и температуру продуктов сгорания, уходящих из этой зоны. При несоответствии расчетного значения продолжительности нагрева металла в методической зоне фактическому значению при заданной производительности печи, выполняется корректировка графика изменения среднемассовой температуры. Производится пересчет температур и расхода топлива в отапливаемых зонах, далее пересчитывается методическая зона. В ходе расчета переопределяются теплофизические свойства металла и продуктов сгорания, а так же определяются коэффициенты теплообмена на расчетных участках печи (в методической и отапливаемых зонах) при новых условиях.

Задача решается методом последовательных приближений до получения заданных условий нагрева. После этого окончательно определяются общий расход топлива, его распределение по длине печи и температура продуктов сгорания по зонам печи.

В качестве объекта исследования выбрана четырехзонная кольцевая печь с проектной производительностью 65 т/ч для нагрева трубных заготовок перед прошивкой. Длины зон: неотапливаемая методическая – 16,5 м, 1-я сварочная – 23,7 м, 2-я сварочная – 17,0 м и томильная зона – 13,4 м. Моделировали нагрев цилиндрических слитков диаметром 0,425 м углеродистой стали от 20 °С до 1280 °С с заданным конечным перепадом температуры по сечению заготовки 20 °С. Исследовали изменение технико-экономических показателей работы печи при изменении ее производительности от 65 т/ч до 25 т/ч. С базовым способом нагрева металла при постоянной длине отапливаемых зон (Способ 1) сравнивали два предлагаемых способа: с изменением длины отапливаемых зон (Способ 2) и с обеспечением постоянного закона изменения среднемассовой температуры металла по длине отапливаемых зон (Способ 3).

Существующий (базовый) способ нагрева при постоянной длине отапливаемых зон осуществляется путем изменения температуры греющего газа по длине печи в зависимости от ее производительности. Результаты расчета существующего способа нагрева металла для различных производительностей печи представлены на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что при таком способе нагрева график изменения среднемассовой температуры по длине рабочего пространства изменяется. С уменьшением производительности с 65 т/ч до 25 т/ч температура металла на входе в отапливаемые зоны уменьшается с 580 °С до 440 °С.

Перевод печи с низкой производительности на более высокую должен осуществляться постепенно, в противном случае через некоторый промежуток времени возникнет необходимость остановки печи на подогрев.

Удельный расход условного топлива в зависимости от производительности печи показан на рис. 2 (кривая 1). Из рисунка видно, что для рассматриваемой печи минимальный расход условного топлива 50 кг/т обеспечивается при производительности 45 т/ч. Увеличение или уменьшение производительности печи сопровождается увеличением удельного расхода топлива.

Из литературы известно, что минимальный расход топлива обеспечивается изменением длины отапливаемых зон в зависимости от производительности [6] за счет отключения или включения части горелочных устройств, вплоть до целых зон отопления (Способ нагрева 2). С увеличением длины методической зоны снижается температура дыма на выходе из печи, и улучшаются показатели топливоиспользования. Результаты расчетов температуры греющего газа и нагреваемого металла по длине печи при изменении её производительности представлены на рис. 3. Как видно, изменение длины методической неотапливаемой зоны с 16,5 м до 53 м снижает температуру уходящего дыма из печи до 290 °С. Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи показана на рис. 2 (кривая 2). Реализация этого способа нагрева не требует больших инвестиций и связана лишь с модернизацией системы автоматики и управления горелками. Недостатком способа является то, что повышение производительности связано с разогревом вновь включенных отапливаемых зон до рабочей температуры. В связи с инерционностью футеровки этот процесс довольно длительный.

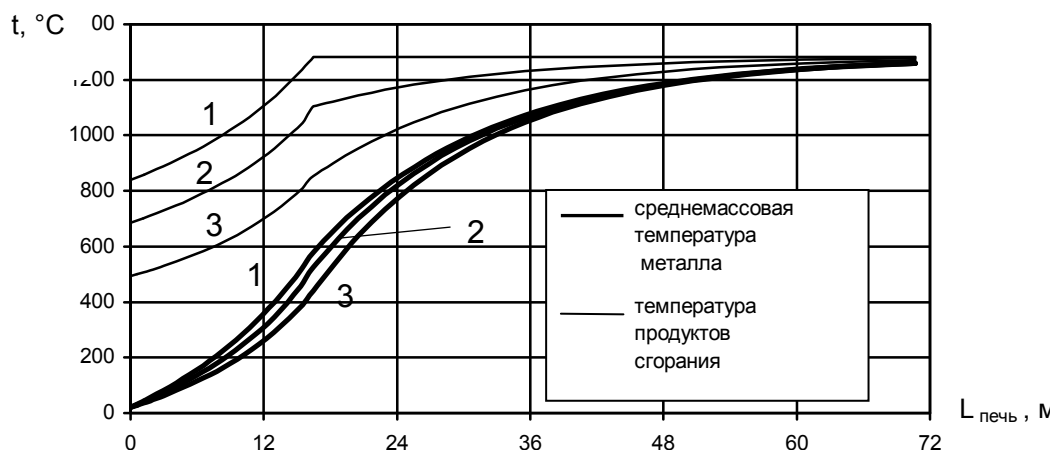


Рис. 1. Распределение температур по длине печи при существующем (базовом) способе нагрева металла (способ 1). Цифры у кривых соответствуют производительности: 1 – 65 т/ч; 2 – 45 т/ч; 3 – 25 т/ч

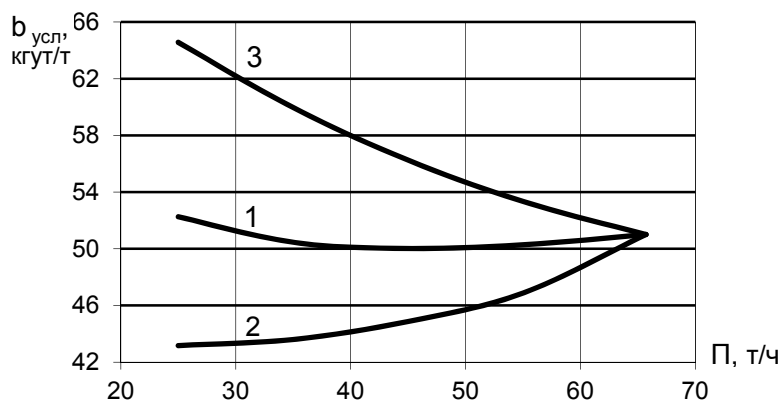


Рис. 2. Зависимость удельного расхода условного топлива от производительности печи при различных способах нагрева: 1 – базовый способ нагрева; 2 – с изменением длины отапливаемых зон; 3 – с обеспечением постоянного распределения среднemasовой температуры металла по длине отапливаемых зон

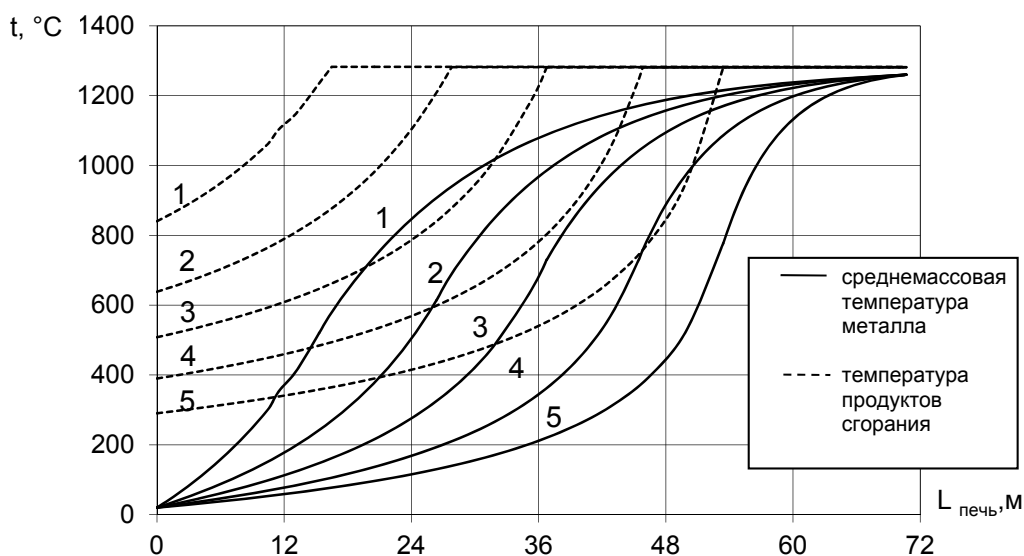


Рис. 3. Распределение температур по длине печи при способе нагрева с изменением длины отапливаемых зон (Способ 2). Цифры у кривых соответствуют производительности печи: 1 – 65 т/ч; 2 – 55 т/ч; 3 – 45 т/ч; 4 – 35 т/ч; 5 – 25 т/ч

В результате обработки результатов моделирования получена аппроксимирующая зависимость линейного типа общей длины отапливаемых зон (м) от заданной производительности (т/час):

$$L = 0,9065\Pi - 6,2917. \quad (9)$$

Известно, что для обеспечения требуемого качества нагрева необходимо, чтобы закон изменения среднемассовой температуры металла вдоль печи не изменялся и соответствовал распределению при максимальной производительности. Расчеты показывают, что рассмотренные ранее способы нагрева не позволяют выполнить это условие. Энтальпия и расход продуктов сгорания на выходе из отапливаемых зон недостаточны, для того, чтобы нагреть металл до заданной температуры на существующей длине методической зоны (см. рис. 3). Увеличение расхода греющего газа без изменения его температуры на выходе из отапливаемых зон может быть достигнуто за счет сжигания топлива в первой отапливаемой зоне с повышенным коэффициентом расхода воздуха.

Обобщенные результаты моделирования тепловой работы кольцевой печи при третьем способе нагрева металла представлены на рисунках 2 (линия 3) и 4.

Полученная по результатам моделирования зависимость коэффициента расхода воздуха в первой сварочной зоне от производительности печи (т/ч) представлена уравнением:

$$n = 2,21 - 0,0173\Pi. \quad (10)$$

Расчёты по формуле (10) показывают, что при необходимости уменьшения производительности от 65 до 25 т/ч коэффициент расхода воздуха в первой отапливаемой зоне придется увеличить с 1,1 до 1,8. Это связано с применением горелок, способных работать в широком диапазоне регулирования по соотношению топливо – воздух без опасности срыва пламени.

Распределение температуры вдоль печи в зависимости от ее производительности согласно способу нагрева 3 представлено на рис. 4.

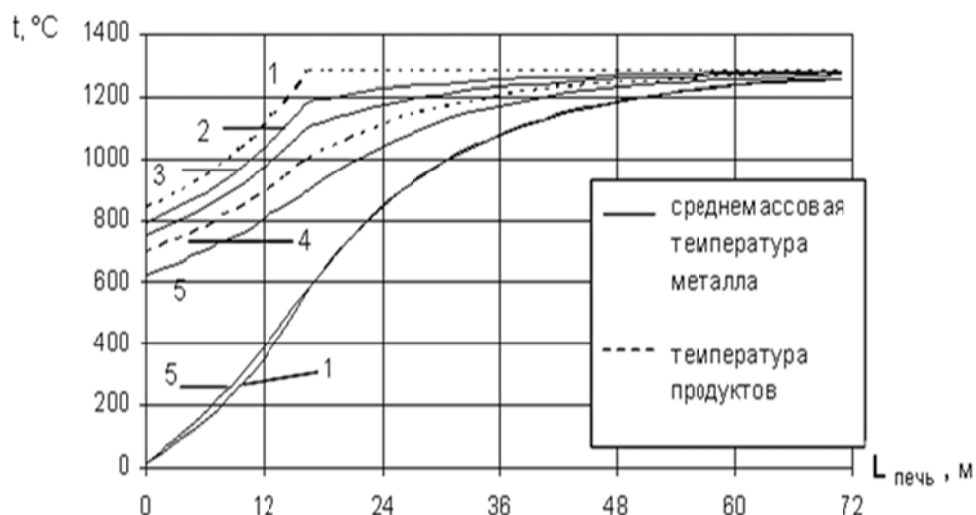


Рис. 4. Распределение температур по длине печи при способе нагрева, обеспечивающем постоянное распределение среднемассовой температуры металла по длине отапливаемых зон (Способ 3). Цифры у кривых соответствуют производительности печи:

1 – 65 т/ч; 2 – 55 т/ч; 3 – 45 т/ч; 4 – 35 т/ч; 5 – 25 т/ч.

Реализация способа нагрева 3 также не вызывает затруднений, кроме оговоренной выше необходимости применения специальных горелок. Однако, как видно из рис. 2 (линия 3), удельный расход условного топлива при уменьшении производительности печи возрастает и достигает своего максимального значения при минимальной производительности печи.

По сравнению с рассмотренными ранее способами нагрева, способ 3 является самым энергозатратным в исследованном диапазоне изменения производительности. Однако следует отметить, что в области максимальных значений производительности печи он может быть применен без опасности значительного перерасхода топлива.

ВЫВОДЫ

Реализация рассмотренных способов нагрева металла в кольцевой печи не требует больших инвестиций и предполагает минимальную реконструкцию системы сжигания топлива и автоматического управления технологическим процессом.

Наиболее экономичным, с точки зрения расхода топлива, является способ нагрева металла с изменением длины отапливаемых зон печи в зависимости от необходимой производительности. Чем ниже производительность печи, тем более обосновано применение этого способа нагрева. Однако перевод печи на высокую производительность предполагает длительный период разогрева зон печи до рабочего состояния.

Способ нагрева с постоянным распределением среднетемпературной температуры металла по зонам печи практически безынерционен и позволяет получить требуемое качество нагрева металла при изменении производительности в широком диапазоне. Однако он оказывается наиболее затратным, с точки зрения расхода топлива за исключением области максимальных производительностей печи.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карп И. Н. *Энергосберегающие технологии в металлургии* / И. Н. Карп, А. Н. Зайвый // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2006. – № 1. – С. 13–20.
2. Карп И. Н. *Энергосбережение в Украине : проблемы и пути решения* / И. Н. Карп // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 2004. – № 4. – С. 3–13.
3. Губинский В. И. *Актуальные задачи реконструкции нагревательных печей* / В. И. Губинский // *Металлургическая теплотехника : сборник научных трудов НМетАУ. В двух книгах. – Книга первая. – Днепропетровск : Пороги, 2005. – С. 149–156.*
4. Ольшанский В. М. *Нагрев тел в прямо- и противотоке с распределенным подводом теплоносителя по длине печи* / В. М. Ольшанский, Е. В. Гупало // *Теория и практика металлургии. – Днепропетровск : ГМетАУ. – № 5. – 1999. – С. 24–26.*
5. Ольшанский В. М. *Нагрев тел излучением в прямо- и противотоке с учетом потерь тепла через кладку печи* / В. М. Ольшанский, Е. В. Гупало // *Металлы и литье Украины. – 2000. – № 7–8. – С. 23–26.*
6. *Анализ режимов нагрева металла в проходных печах при переменном темпе нагрева* / Ю. С. Борбоц, Л. А. Гузов, А. Н. Минаев, В. М. Ольшанский, Ю. И. Розенгарт // *Изв. вузов. Черная металлургия. – 1977. – № 10. – С. 147–150.*

REFERENCES

1. Karp I. N. *Jenergosberegajushhie tehnologii v metallurgii* / I. N. Karp, A. N. Zajvyj // *Jekotehnologii i resursosberezhenie*. – 2006. – № 1. – S. 13–20.
2. Karp I. N. *Jenergosberezhenie v Ukraine : problemy i puti reshenija* / I. N. Karp // *Jekotehnologii i resursosberezhenie*. – 2004. – № 4. – S. 3–13.
3. Gubinskij V. I. *Aktual'nye zadachi rekonstrukcii nagrevatel'nyh pechej* / V. I. Gubinskij // *Metallurgicheskaja teplotehnika : sbornik nauchnyh trudov NMetAU. V dvuh knigah. – Kniga pervaja. – Dnepropetrovsk : Porogi, 2005. – S. 149–156.*
4. Ol'shanskij V. M. *Nagrev tel v prjamo- i protivotoke s raspredelennym podvodom teplonositelja po dljne pechi* / V. M. Ol'shanskij, E. V Gupalo // *Teorija i praktika metallurgii. – Dnepropetrovsk : GMetAU. – № 5. – 1999. – S. 24–26.*
5. Ol'shanskij V. M. *Nagrev tel izlucheniem v prjamo- i protivotoke s uchetom poter' tepla cherez kladku pechi* / V. M. Ol'shanskij, E. V. Gupalo // *Metally i lit'e Ukrainy. – 2000. – № 7–8. – S. 23–26.*
6. *Analiz rezhimov nagreva metalla v prohodnyh pechah pri peremennom tempe nagreva* / Ju. S. Borboc, L. A. Guzov, A. N. Minaev, V. M. Ol'shanskij, Ju. I. Rozengart // *Izv. vuzov. Chernaja metallurgija. – 1977. – № 10. – S. 147–150.*

Гупало Е. В. – канд. техн. наук, доц. НМетАУ

Ерёмин А. О. – д-р техн. наук, доц. НМетАУ

НМетАУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепропетровск.

E-mail: ktemp@ktemp.dp.ua

Статья поступила в редакцию 18.10.2014 г.