

А.Б. Бирюков /д.т.н./, А.Н. Лебедев /к.т.н./, П.А. Гнитиёв /к.т.н./  
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (Донецк)

## МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ИТОГОВОГО УДЕЛЬНОГО РАСХОДА ТОПЛИВА НА ОТОПЛЕНИЕ ПЕЧИ

*Разработана методика оценки итогового удельного расхода топлива на отопление нагревательной печи в зависимости от годовой производительности и принятой тактики эксплуатации печи. Рассмотрены две тактики использования печного оборудования между операциями нагрева: отключение подачи топлива и поддержание некоторой минимальной температуры печи и расхода топлива для предотвращения остывания футеровки. При помощи разработанной методики оценены различные варианты годовой производительности подразделения, имеющего в своем составе одну печь с возможным диапазоном разовой садки от 20 до 100 т: 4375, 8750, 17500, 35000, 52500 т/год. Установлено, что для годовой производительности 8750 т/год и выше наиболее экономичным является отопление печи на холостом ходу между операциями нагрева, однако для случая минимальной годовой производительности и максимальной садки печи экономичнее будет отключать подачу топлива между нагревом металла. Разработанная методика полезна при планировании схемы работы печи в течение длительного периода времени и выбора рациональной стратегии работы цеха.*

**Ключевые слова:** нагрев металла, удельный расход топлива, экономия топлива.

### Постановка проблемы

Одним из наиболее распространенных критериев энергоэффективности технологий тепловой обработки металла в печах является удельный расход топлива на одну тонну металла. Поскольку печи в общем случае отапливаются разными топливами (природный газ, искусственные газы, жидкое топливо), удобно использовать величину удельного расхода условного топлива. В качестве такого принято топливо с теплотой сгорания 29,3 МДж/кг. Для конкретной печи устанавливается расход реального топлива, а затем он пересчитывается на условное топливо.

### Анализ последних исследований и публикаций

Зачастую в производственных отчетах и научных публикациях приводятся данные об удельном расходе топлива, соответствующие собственно процессу нагрева металла в печи [1]. Имеется большое количество работ, в которых показаны способы поиска рациональных конструктивных и технологических параметров печей, при которых удается достичь существенно сокращения расхода топлива [2...7].

Следует иметь в виду, что в процессе нагрева топливо расходуется на повышение теплосодержания металла, покрытие тепловых потерь и аккумуляцию футеровки. Очевидно, что удельный расход топлива напрямую зависит от массы садки печи. Но также следует иметь в виду зависи-

мость расхода топлива для осуществления технологической операции от того теплосодержания футеровки, которое имело место в момент начала операции нагрева металла.

Известно понятие базовой линии энергопотребления [8], представляющее собой линию, определенную графическим путем и описываемую соответствующим уравнением регрессии, относительно которой проводят анализ фактических расходов энергии для выбранного объекта. Удельный расход топлива может быть отражен в зависимости от производительности печи. Однако в зависимости от ритма работы печи могут быть получены отличающиеся результаты, и построение линии энергопотребления в зависимости только лишь от производительности печи затруднительно.

Более объективно было бы рассчитать удельный расход топлива как отношение годового расхода топлива на печь к массе металла, прошедшей за год тепловую обработку. Однако для обеспечения снижения удельного расхода топлива следует не только констатировать полученный результат, но заранее планировать рациональную схему работы печи.

### Цель (задачи) исследования

Целью данной работы является создание методики оценки итогового удельного расхода топлива на отопление печи (печей) в зависимости от годовой программы производства металла и принятой тактики эксплуатации печи.

**Основной материал исследования**

Расход топлива на печь периодического действия за один цикл работы определяется как

$$V_u = \frac{m_c \cdot c_m \cdot \Delta t_m}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Q_m \cdot \tau_u}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Qf_{ном} - Qf_{ост}(\tau_n)}{\eta \cdot Q_n^p},$$

где  $m_c$  – масса садки, кг;  $\Delta t_m$  – повышение среднemasсовой температуры металла в течение цикла работы печи, °C;  $c_m$  – средняя теплоемкость металла в интервале температур нагрева, Дж/(кг·K);  $\eta$  – среднеинтегральное значение коэффициента использования топлива за цикл работы печи;  $Q_n^p$  – низшая теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>;  $Q_m$  – среднеинтегральная мощность тепловых потерь через ограждающую конструкцию печи в окружающую среду в течение цикла работы печи, Вт;  $\tau_u$  – продолжительность цикла работы печи, с;  $Qf_{ном}$  – номинальное теплосодержание футеровки печи, соответствующее максимальной температуре печи в течение цикла работы печи, Дж;  $Qf_{ост}(\tau_n)$  – остаточное теплосодержание футеровки печи, с которым печь вводится в цикл работы, зависящее от времени простоя, Дж;  $\tau_n$  – продолжительность паузы после завершения предыдущего цикла работы, в течение которого печь находилась без отопления вплоть до начала текущего цикла работы, с.

Удельный расход топлива определяется как

$$b_{уд} = \frac{V_u}{m_c},$$

где  $V_u$  – расход топлива для нагрева массы садки объемом  $m_c$ , кг.

В ряде случаев при наличии простоев между циклами тепловой обработки металла печь может продолжать отапливаться на холостом ходу во избежание остывания футеровки [9]. Такой подход целесообразен в случае, когда известно время простоя, а также стоимость использованного топлива для поддержания температуры сопоставима со стоимостью топлива, требуемого для достижения печью той же температуры горячего простоя после выхода из холодного состояния.

Возможен также вариант, когда между циклами работы печь продолжает работать на холостом ходу при несколько пониженной температуре для поддержания теплосодержания футеровки. Тогда, если расход топлива на поддержание теплосодержания футеровки внести в расход топлива за цикл, получаем следующее выражение:

$$V_u = \frac{m_c \cdot c_m \cdot \Delta t_m}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Q_m \cdot \tau_u}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Q_{mk} \cdot \tau_k}{\eta \cdot Q_n^p},$$

где  $Q_{mk}$  – мощность тепловых потерь через ограждающую конструкцию печи в период ее консервации, Вт;  $\tau_k$  – продолжительность периода консервации, с;  $\eta_k$  – коэффициент использования топлива в период консервации.

Важно определиться, как правильно эксплуатировать печной агрегат в течение года для обеспечения минимально возможного расхода топлива для осуществления требуемой технологической операции.

Рассмотрим задачу в простейшей постановке. На предприятии имеется одна печь или несколько одинаковых печей, работающих с одинаковой загрузкой по массе металла в течение года. Тогда при отключении отопления после завершения цикла нагрева металла получаем следующее выражение для определения годового расхода топлива:

$$V_{год} = V_u \cdot n_u = \left( \frac{m_c \cdot c_m \cdot \Delta t_m}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Q_m \cdot \tau_u}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Qf_{ном} - Qf_{ост} \frac{\tau_{год} - n_u \cdot \tau_u}{n_u}}{\eta \cdot Q_n^p} \right) \cdot n_u,$$

где  $\tau_{год}$  – продолжительность года, с;  $n_u$  – число циклов работы печи за год.

Величина  $n_u$  определяется как

$$n_u = \frac{M_{год}}{m_c},$$

где  $M_{год}$  – масса металла, прошедшего тепловую обработку в печи за один год, кг.

При отоплении пустой печи для поддержания теплосодержания футеровки имеем следующее выражение для определения годового расхода топлива:

$$V_{год} = V_u \cdot n_u = \left( \frac{m_c \cdot c_m \cdot \Delta t_m}{\eta \cdot Q_n^p} + \frac{Q_m \cdot \tau_u}{\eta \cdot Q_n^p} \right) \cdot n_u + \frac{Q_{mk} \cdot (\tau_{год} - n_u \cdot \tau_u)}{\eta \cdot Q_n^p}.$$

Рассмотрим иллюстрацию этого метода на следующем примере: печь с выкатным подом с геометрией 6×8×4 м, футеровка стен и свода выполнена из керамоволокнистого материала, подина – из плотного огнеупора. Печь предназначена для нагрева под ковку цилиндрических заготовок

весом 20 т. Минимальная садка 20 т, максимальная 100 т. Время нагрева заготовок 9 часов. Исходная среднемассовая температура металла 20 °С, конечная среднемассовая температура металла 1220 °С. Средний коэффициент использования топлива (КИТ) за цикл нагрева 0,65, КИТ при поддержании печи в режиме холостого хода 0,7. Теплоемкость металла в указанном диапазоне температур  $C_m=650$  Дж/(кг·К). Среднеинтегральная мощность тепловых потерь через ограждающую конструкцию принята равной 150 кВт.

Рассмотрены пять годовых программ нагрева заготовок – 4375, 8750, 17500, 35000, 52500 т/год.

Закон изменения остаточного теплосодержания футеровки при остывании принят в следующем виде и представлен на рис. 1:

$$Qf_{ост} = Qf_{ном} \cdot \exp(-0,000005 \cdot \tau_n).$$

Согласно расчетным оценкам номинальное тепловое содержание подины для принятых исходных данных составляет  $5 \cdot 10^{10}$  Дж.

Ниже, на рис. 2, представлены результаты исследования зависимости среднегодового удельного расхода условного топлива для разных тактик работы печного оборудования в зависимости от массы садки печи.

Анализируя полученные результаты, можно выделить три различные категории: с наличием равноэффективной экономии двух случаев (рис. 2а); со сходящейся эффективностью при возрастании единичной массы садки печи (рис. 2б, в) и с расходящейся эффективностью при возрастании единичной массы садки печи (рис. 2г, д).

При детальном рассмотрении результатов на рис. 2а можно увидеть, что при загрузке печи от 20 до 60 т наиболее рациональным будет вариант, при котором печь поддерживают в режиме холостого хода между циклами нагрева металла.

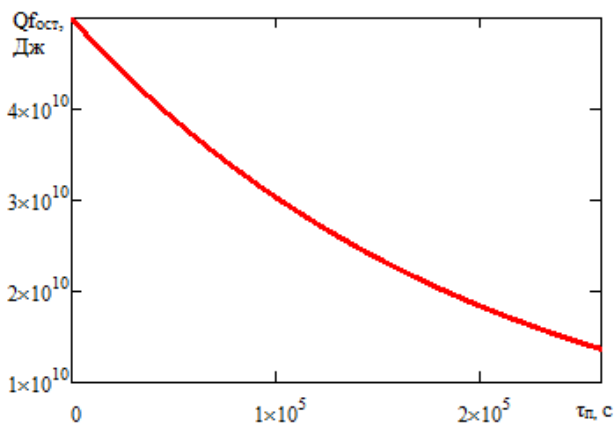


Рис. 1. Изменение остаточного теплосодержания футеровки в зависимости от времени простоя

В случае если садка печи составляет от 60 до 100 т, эффективнее будет отключать подачу топлива между циклами нагрева. Это происходит потому, что для малой годовой производительности печи, равной 4375 т/год, при увеличении разовой садки перерыв в работе печи между садками существенно увеличивается.

В случае годовой производительности печи 8750 т/год (рис. 2б) наблюдается стремление к пересечению двух кривых. В относительном выражении разница находится в диапазоне от 15 до 4 % для условий увеличения единоразовой садки от 20 до 100 т. Однако во всем диапазоне рассматриваемой загрузки печи наиболее эффективным является вариант поддержания печи в режиме холостого хода между циклами нагрева металла.

При годовой производительности 17500 т/год (рис. 2в) для минимальной единичной садки в 20 т оба рассматриваемых варианта дают идентичные результаты экономии топлива. При увеличении единичной садки печи до 100 т наблюдается увеличение эффективности применения тактики поддержания печи в режиме холостого хода между операциями нагрева в пределе до 11 % по сравнению с вариантом отключения печи.

При годовой производительности 35000 т/год (рис. 2г) минимальной садкой является 40 т, что связано с увеличением годовой производительности и длительности каждой технологической операции, при которых невозможно снизить минимальную садку мене 40 т, т.к. в противном случае печь не выйдет на заданную годовую производительность. На данном графике наблюдается совпадение удельного расхода топлива, которое составляет 48 кг/т металла для садки 40 т, после чего при увеличении единичной садки печи наблюдается расхождение графиков, при котором более выгодным является вариант перевода печи в режим холостого хода между операциями нагрева.

Разница между рассматриваемыми вариантами в относительном выражении находится в диапазоне от 0 до 6 %.

Для последней рассматриваемой годовой производительности 52500 т/год минимально возможная садка печи составит 60 т. Как и в предыдущем случае, при минимальной садке печи оба рассматриваемых способа экономии показывают идентичные результаты – на уровне 46 кг/т нагреваемого металла. По мере увеличения массы садки появляется разница между вариантами использования печи между операциями нагрева. При этом максимальная относительная разница в удельном потреблении топлива составляет 3,4 %.

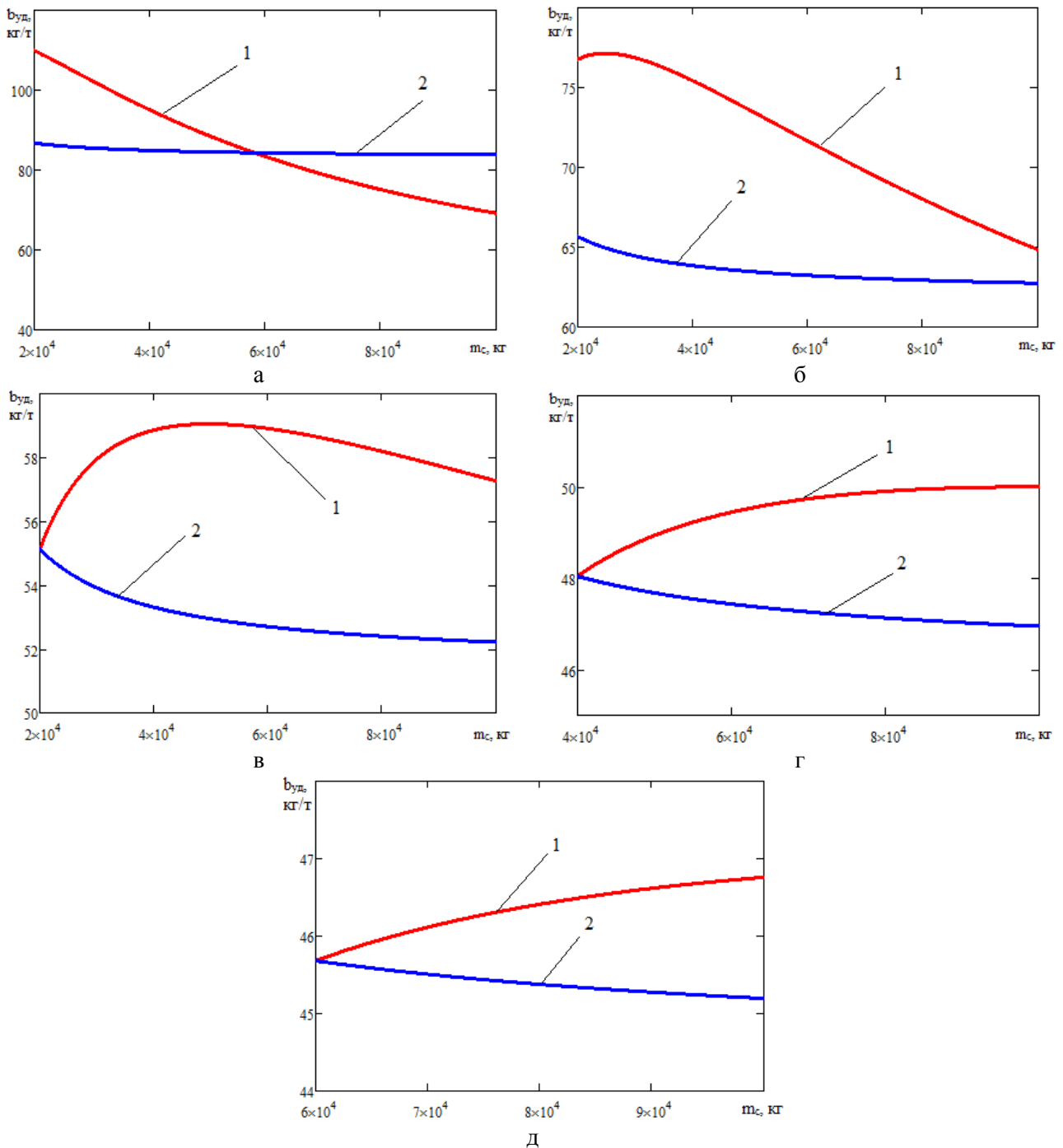


Рис. 2. Зависимость среднегодового удельного расхода условного топлива для разных стратегий работы печного оборудования от массы садки печи:

1 – отключение топлива между циклами нагрева металла;

2 – поддержание печей в режиме холостого хода между циклами нагрева металла:

а – для годовой производительности по металлу 4375 т/год; б – 8750 т/год;

в – 17500 т/год; г – 35000 т/год; д – 52500 т/год

Оценив различные варианты годовой загрузки печи и различные варианты разовой садки печи, можно сделать вывод, что практически для всех рассмотренных вариантов годовой производительности нагревательной печи наиболее рациональным способом снижения удельного расхода топлива на работу печи в течение года является поддержание печи в ре-

жиме холостого хода между циклами нагрева металла. Исключением является работа печи с малой годовой загрузкой и существенной массой разовой садки, при которых возникают длительные перерывы между садками. В таком случае рациональным будет отключение подачи топлива между операциями нагрева металла в печи.

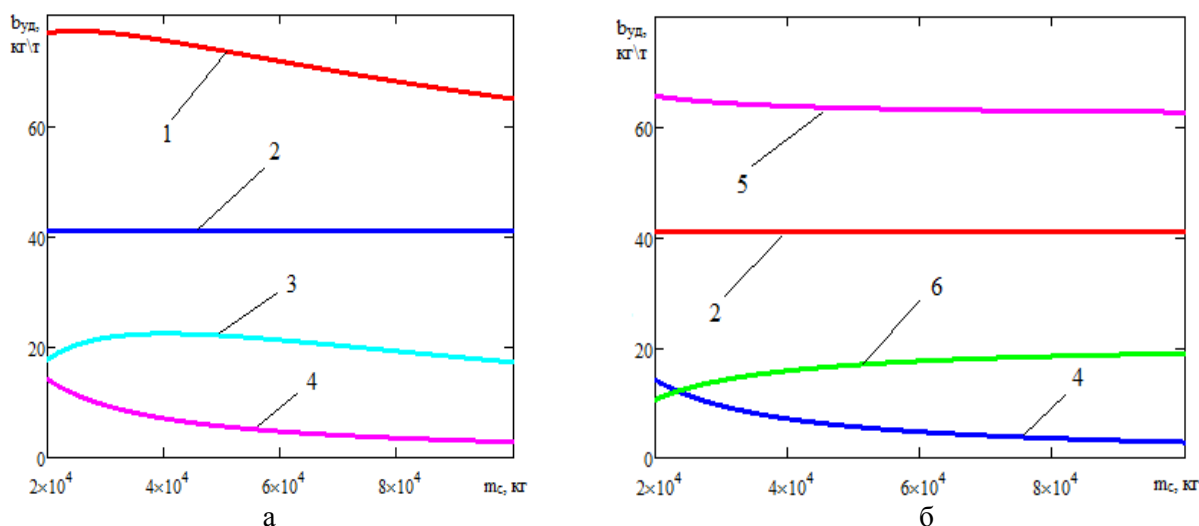


Рис. 3. Зависимость составляющих среднегодового удельного расхода условного топлива для разных стратегий работы печного оборудования от массы садки печи для годовой производительности по металлу 8750 т/год:

- 1 – итоговый удельный расход топлива при отключении топлива между циклами нагрева металла;
- 2 – на повышение теплосодержания металла; 3 – на аккумуляцию теплоты кладкой;
- 4 – на покрытие мощности тепловых потерь в окружающую среду в течение циклов нагрева;
- 5 – итоговый удельный расход топлива при поддержании печей в режиме холостого хода между циклами нагрева металла; 6 – на покрытие мощности тепловых потерь в окружающую среду при работе на холостом ходу:
- а – для режима отключения подачи топлива между циклами нагрева металла;
- б – для режима поддержания печи в режиме холостого хода между циклами нагрева металла

На рис. 3 для годовой производительности печи по металлу 8750 т/год показано изменение составляющих итогового удельного расхода топлива в зависимости от массы разовой садки печи для двух исследуемых тактик работы печи: для случая отключения подачи топлива между циклами нагрева металла и для случая поддержания печи в режиме холостого хода между циклами нагрева металла. Характер поведения составляющих итогового удельного расхода топлива в полной мере поясняет характер поведения итоговых кривых.

**Выводы**

Решение задачи энергосбережения всегда является актуальной задачей для промышленности. Возрастающие стоимости энергоресурсов, нерегулярная загрузка производства вынуждают исследовать способы экономии ресурсов с поиском оптимальных решений для каждой технологии при различных режимах работы оборудования. В данной работе разработана методика оценки итогового удельного расхода условного топлива для нагревательной печи, которая позволяет сравнивать удельные расходы топлива с учетом двух тактик использования печного оборудования между операциями нагрева: с учетом отключения подачи топлива и при подаче топлива в режиме холостого хода. В результате проведен-

ного анализа установлено, что наиболее эффективным способом экономии энергоресурсов при нагреве металла в печах является поддержание печей в режиме холостого хода между циклами нагрева металла. Практически при любой существенной годовой загрузке печи данный способ экономии топлива показывает лучший эффект. Однако при малых годовых производительностях печи и большой единоразовой массе садки эффективнее отключать подачу топлива между операциями нагрева.

**Список литературы**

1. Курбатов, Ю.Л. *Металлургические печи: учеб. пособие для вузов* / Ю.Л. Курбатов, Ю.Е. Василенко. – Донецк: ГВУЗ «ДонНТУ», 2013. – 388 с.
2. Бирюков, А.Б. *Математические модели тепловой обработки металла в печах* / А.Б. Бирюков, П.А. Гнитиёв // *Черная металлургия*. – 2016. – №11(1403). – С. 56-63.
3. Ткаченко, В.Н. *Математическое моделирование, идентификация и управление технологическими процессами тепловой обработки материалов*. – Киев: Наукова думка, 2008. – Т.13. – 244 с. (сер.: задачи и методы: математика, механика, кибернетика).
4. Biryukov, A.B. *Mathematical model for studying of metal air-cooling process in furnaces* / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev, A.I. Voloshin // *Steel in*

- Translation. – 2015. – No.7. Vol. 45. – P. 534-538.
5. Гинкул, С.И. Прогнозная математическая модель процесса нагрева металла в печах с шагающими балками / С.И. Гинкул [и др.] // *Металлург.* – 2018. – №1. – С. 24-28.
  6. Biryukov, A.B. Experimental investigation of convective heat exchange in chamber furnaces at heat treatment of cylindrical solids / A.B. Biryukov, P.A. Gnitiev // *Thermophysics and Aeromechanics.* – 2016. – No.3. Vol.23. – P. 467-472.
  7. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul [et al.]. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 292 p.
  8. Сафьянц, С. М. Создание методики определения линий энергопотребления предприятия / С.М. Сафьянц, А.Б. Бирюков, А.С. Сафьянц // *Вісник НТУ «ХП».* – Харків: НТУ «ХП», 2016. – № 9(1181). – С. 151-158. (серія: енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування).
  9. Мастрюков, Б.С. Расчеты нагревательных печей. – М.: Металлургия, 1986. – 376 с.

**A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.), A.N. Lebedev /Cand. Sci. (Eng.), P.A. Gnitiev /Cand. Sci. (Eng.)/**  
*Donetsk National Technical University (Donetsk)*

### METHOD OF ESTIMATION OF FINAL SPECIFIC FUEL CONSUMPTION FOR HEATING THE FURNACE

**Background.** *In the practice of machine-building enterprises, one of the essential technological operations is the heating of forging ingots under high-pressure processing. Currently, all industrial enterprises set rational use of energy resources one of the main tasks. The objective of this paper is to create a method for assessing the final specific fuel consumption for metal heating, taking into account the tactics of using shop furnace equipment between heating operations.*

**Materials and/or methods.** *The final specific fuel consumption for heating the furnace is estimated for a long period of operation of the furnace in the overhaul period as the ratio of the total fuel consumption per furnace to the weight of the metal that has undergone heat treatment. It is possible to take into account two tactics of using the furnace: between heating operations, the furnace is switched off, or between heating operations, the maintenance of predetermined furnace temperature is ensured to prevent cooling of the lining due to the fuel supply.*

**Results.** *Based on the engineering method of research using the proposed methodology, the results obtained of the influence of single charge parameters and an annual performance on the choice of reducing the fuel consumption for metal heating. Determined that for significant annual productivity for any possible charge, it will be more rational to heat the furnace at idle to preserve the heat absorption of the furnace lining. However, for the case of low annual productivity with the significant charge mass, it is advisable to turn off the fuel supply between metal heating operations.*

**Conclusion.** *With the help of the proposed calculation method, it is possible to determine the rational mode of operation of the heating furnace, depending on the specific operating conditions. This method is useful when planning the operation scheme of the furnace for a long period and to choosing a rational strategy of the shop.*

**Keywords:** *metal heating, specific fuel consumption, fuel economy.*

#### Сведения об авторах

**А.Б. Бирюков**

SPIN-код: 3186-0680  
 Author ID: 7006918782  
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017  
 Телефон: +380 (62) 301-08-61  
 Эл. почта: birukov.ttf@gmail.com

**А.Н. Лебедев**

Телефон: +380 (62) 301-08-38  
 Эл. почта: lan@donntu.org

**П.А. Гнитиёв**

SPIN-код: 1943-4196  
 Author ID: 56916104300  
 ORCID iD: 0000-0001-9266-7969  
 Телефон: +380 (66) 671-34-71  
 Эл. почта: gnitiev.pavel@gmail.com

*Статья поступила 02.09.2019 г.*

*© А.Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, П.А. Гнитиёв, 2019*

*Рецензент д.т.н., доц. Н.И. Захаров*