

**А.Б. Бирюков / д.т.н. /, В.А. Сидоров / д.т.н. /**  
 ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» (г. Донецк)

## **НОВЫЕ ПОДХОДЫ К УГЛУБЛЕННОМУ АНАЛИЗУ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПЛАМЕННЫХ ПЕЧЕЙ С УЧЕТОМ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ**

*Важной задачей металлургической отрасли является снижение удельного расхода энергии и топлива при нагреве металла. При этом не уделяется должного внимания вопросам влияния мероприятий по повышению энергоэффективности процессов нагрева металла на общий баланс потребления энергоресурсов рассматриваемого агрегата. В работе предложена методика учета потребления электроэнергии при оценке теплотехнической и технико-экономической эффективности пламенной нагревательной печи непрерывного действия, а также проведена апробация предложенной методики на конкретных примерах.*

**Ключевые слова:** пламенная печь, теплота, энергетический коэффициент, расход топлива, электропотребление.

### **Постановка проблемы**

Усилия ученых и практиков направлены на повышение эффективности пламенных печей в плане сокращения удельного расхода топлива. Традиционно, для этой цели используют интенсификацию теплообмена, повышение эффективности использования теплоты уходящих продуктов сгорания (совершенствование центральных рекуператоров, использование рекуперативных и регенеративных горелок).

Более благоприятные условия нагрева металла созданы в печах с механизированным подом, в которых обеспечивается возможность одновременного прогрева металла с трех (в печах с шагающим подом) или четырех (в печах с шагающими балками) сторон.

Зачастую, улучшение теплотехнических характеристик печи достигается за счет введения в работу устройств, потребляющих значительные количества электроэнергии.

Возможна ситуация, при которой достигается статистически подтвержденное снижение расхода топлива на несколько единиц процентов, а весь экономический эффект от экономии топлива нивелируется повышением расхода на электроэнергию.

В связи с этим существует необходимость разработки методики, которая бы позволяла оценивать теплотехническую и технико-экономическую эффективность пламенных нагревательных печей с учетом взаимного влияния различных вариантов повышения энергоэффективности для условий конкретного предприятия.

### **Анализ последних исследований и публикаций**

Вопросам определения параметров работы, оценке теплотехнической и технико-экономической эффективности процесса нагрева металла в промышленных печах различной конфигурации, определения расхода энергетических ресурсов при нагреве металла посвящены работы [1...4]. Необходимо учитывать, что расход энергетических ресурсов, при функционировании промышленных печей, является частью энергетического баланса предприятия. Созданию единой методологии для построения линий энергопотребления предприятия посвящена работа [5].

Физические и технологические основы функционирования печей, основы оценки технико-экономической и теплотехнической эффективности работы промышленных агрегатов представлены в работах [6...10].

### **Цель исследования**

Целью данной работы является разработка методики учета потребления электроэнергии при оценке теплотехнической и технико-экономической эффективности пламенной нагревательной печи непрерывного действия, анализ разработанной методики для реальных примеров работы печи, а также при её модернизации.

### **Основной материал исследования**

Величины, характеризующие эффективность работы печи непрерывного действия:

- полезный поток теплоты, передаваемый металлу  $Q_{пол}^M$ , Вт;
- полезный поток теплоты, передаваемый рабочему телу на теплоутилизаторе  $Q_{пол}^{TV}$ , Вт;
- поток теплоты, подводимый к печи с химической энергии топлива  $Q_{под}$ , Вт;
- суммарная, потребляемая всеми механизмами и устройствами, обеспечивающими работу печи, электрическая мощность  $\mathcal{E}$ , Вт;
- производительность печи  $M$ , т/ч.

Традиционно коэффициент полезного действия (К.П.Д.) печи определяется как отношение полезно используемой теплоты (передаваемой металлу) к подводимой к печи теплоте. В данной работе эту величину (как и в случае анализа эффективности котельных агрегатов) предлагается называть К.П.Д. брутто. Также, поскольку именно нагрев металла является основным назначением печи, предложено различать два типа значений К.П.Д.: рассчитанное из учета только полезной теплоты, воспринятой металлом, и рассчитанное из учета суммы теплоты, воспринятой металлом и переданной рабочему телу на теплоутилизаторе.

К.П.Д. брутто из учета нагрева металла без учета и с учетом работы теплоутилизатора:

$$\eta_{брутто}^M = \frac{Q_{пол}^M}{Q_{под}}; \eta_{брутто}^{M+TV} = \frac{Q_{пол}^M + Q_{пол}^{TV}}{Q_{под}}$$

Для комплексного учета эффективности использования тепловой и электрической энергии используем по аналогии два значения К.П.Д. нетто:

К.П.Д. нетто из учета нагрева металла с учетом и без учета работы теплоутилизатора:

$$\eta_{нетто}^M = \frac{Q_{пол}^M}{Q_{под} + \mathcal{E}}; \eta_{нетто}^{M+TV} = \frac{Q_{пол}^M + Q_{пол}^{TV}}{Q_{под} + \mathcal{E}}$$

При оценке эффективности теплообменных аппаратов широко используется понятие энергетического коэффициента, который представляет собой отношение количества переданной теплоты к затратам энергии на перемещение потоков. Таким образом, большие значения энергетического коэффициента говорят о большей эффективности теплообменного аппарата.

Однако, при разработке инструментария для решения поставленной задачи, принято решение использовать вспомогательный коэффициент (названный коэффициентом электропотребления), представляющий по сути величину, обратную энергетическому коэффициенту.

Коэффициент электропотребления пламенной печи, как и абсолютное электропотребление является аддитивной величиной и определяется как сумма составляющих, соответствующих расходу электроэнергии на привод вентилятора, дымососа, механизмов перемещения металла, циркуляционных насосов системы охлаждения:

$$E = E_{\mathcal{E}} + E_{\mathcal{D}} + E_M + E_H = \frac{\mathcal{E}}{Q_{под}} = \frac{\mathcal{E}_{\mathcal{E}} + \mathcal{E}_{\mathcal{D}} + \mathcal{E}_M + \mathcal{E}_H}{Q_{под}},$$

где  $\mathcal{E}_{\mathcal{E}}$ ,  $\mathcal{E}_{\mathcal{D}}$ ,  $\mathcal{E}_M$ ,  $\mathcal{E}_H$  – электрические мощности, потребляемые на привод вентилятора, дымососа, механизмов перемещения металла, циркуляционных насосов системы охлаждения, Вт;

$E_{\mathcal{E}}$ ,  $E_{\mathcal{D}}$ ,  $E_M$ ,  $E_H$  – соответствующие компоненты общего коэффициента электропотребления.

Тогда с использованием коэффициента электропотребления печи устанавливаем связь между К.П.Д. брутто и К.П.Д. нетто:

$$\eta_{нетто} = \frac{Q_{пол}}{Q_{под} + E \cdot Q_{под}} = \frac{Q_{пол}}{Q_{под} \cdot (1 + E)} = \frac{\eta_{брутто}}{1 + E}.$$

Взаимосвязь между коэффициентом электропотребления и удельными расходами теплоты (Дж/т) и электроэнергии (кВт·ч/т) устанавливается в следующем виде:

$$E = \frac{3,6 \cdot 10^6 \cdot e_{\text{уд}}}{q_{\text{уд}}}$$

Также для технико-экономического анализа эффективности работы печи предлагается ввести понятие стоимостного коэффициента электропотребления печи, который представляет собой отношение эксплуатационных затрат на электроэнергию к затратам на топливо:

$$E_C = \frac{3\mathcal{E}}{3m} = \frac{Q_{пол}}{\eta_{брутто}} \cdot \frac{E}{3,6 \cdot 10^6} \cdot \frac{C_{\mathcal{E}}}{1000} = \frac{Q_{пол}}{\eta_{брутто} \cdot Q_{н.р.}} \cdot \frac{C_T}{1000} = \frac{E}{3600} \cdot \frac{Q_{н.р.}}{C_T} \cdot C_{\mathcal{E}}$$

где  $3_{\mathcal{E}}$ ,  $3_m$  – затраты на электроэнергию и топливо соответственно, руб/с;

$C_{\mathcal{E}}$  – стоимость электроэнергии, руб/(кВт·ч);

$C_m$  – стоимость топлива, руб/(1000 м<sup>3</sup>);

$Q_{н.р.}$  – теплота сгорания топлива, Дж/м<sup>3</sup>.

Для анализа предложенной методики необходимо рассмотреть несколько вариантов

Табл. 1. Параметры нагревательной печи для различных вариантов ее функционирования

Параметр	Ед.изм.	Анализируемые варианты				
		1	2	3	4	5
Производительность печи	т/ч	120	120	120	120	120
Полезная тепловая мощность	МВт	25,73	25,73	25,73	25,73	25,73
Подводимая тепловая мощность	МВт	50,45	50,45	50,45	50,45	50,45
Тепловая мощность, переданная рабочему телу	МВт	15,14	15,14	15,14	15,14	15,14
Потребляемая мощность насосов гидропривода шагающего пода	кВт	110	90	110	110	90
Потребляемая мощность дымососа	кВт	110	110	66	110	66
Суммарная электрическая мощность на привод вентиляторов	кВт	90	90	90	103,5	103,5
Электрическая мощность на привод насосов системы охлаждения	кВт	30	22	30	30	22
Расход топлива	м <sup>3</sup> /с	1,462	1,462	1,462	1,329	1,329
Теплота сгорания топлива	кДж/ м <sup>3</sup>	34500	34500	34500	34500	34500
Стоимость электроэнергии	руб/кВтч	4,9	4,9	4,9	4,9	4,9
Стоимость природного газа	руб/м <sup>3</sup>	15,16	15,16	15,16	15,16	15,16
$\eta_{\text{брутто}}^M$	-	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100	0,5100
$\eta_{\text{нетто}}^M$	-	0,5066	0,5069	0,5070	0,5065	0,5072
$\eta_{\text{брутто}}^{M+TU}$	-	0,8101	0,8101	0,8101	0,8101	0,8101
$\eta_{\text{нетто}}^{M+TU}$	-	0,8047	0,8051	0,8054	0,8045	0,8056
E	%	0,6739	0,6184	0,5867	0,7007	0,5580
E <sub>c</sub>	%	0,2088	0,1916	0,1817	0,2170	0,1728

функционирования печи непрерывного действия с учетом и без учета мероприятий по её модернизации, а также рассчитать предлагаемые методикой параметры эффективности.

Для расчета параметров теплотехнической и технико-экономической выбрано несколько вариантов параметров работы печи (таблица 1):

базовый вариант (вариант 1) без каких-либо энергосберегающих мероприятий; вариант 2 – замена устаревшего электрооборудования на более современное с меньшей потребляемой мощностью (электродвигатель насоса гидропривода, электродвигатель привода насосов системы охлаждения); вариант 3 – частотное регулирова-

ние электродвигателя дымососа, позволяющее снизить соответствующую статью электропотребления на 40%; вариант 4 – реконструкция отопительной системы, позволяющая сократить расход топлива на 10%, однако влекущая за собой повышение расхода электроэнергии на привод вентиляторов на 15%; вариант 5 – комплексная модернизация, предполагающая одновременную реализацию всех мероприятий по вариантам 2, 3 и 4.

В таблице 1 отображены параметры работы нагревательной печи и расчетные параметры эффективности для различных вариантов функционирования агрегата.

Изменения К.П.Д. нетто с учетом и без учета работы теплоутилизатора, а также изменения

предложенных параметров технико-экономической эффективности – коэффициента электропотребления печи и стоимостного коэффициента отобраны на рис.1...4.

Данные, представленные в таблице 1 и на рис.1...4 показывают различную эффективность модернизации нагревательных печей. Высокую эффективность демонстрируют мероприятия по модернизации электрооборудования агрегата (варианты 2 и 3). Мероприятия, направленные на снижение расхода топлива, но не учитывающие повышение расхода электроэнергии требуют особо тщательного анализа (вариант 4).

Наивысшую технико-экономическую эффективность демонстрирует вариант с комплексной модернизацией печи (вариант 5).



Рис. 1. Изменение К.П.Д. нетто без учета работы теплоутилизатора для различных вариантов работы нагревательной печи

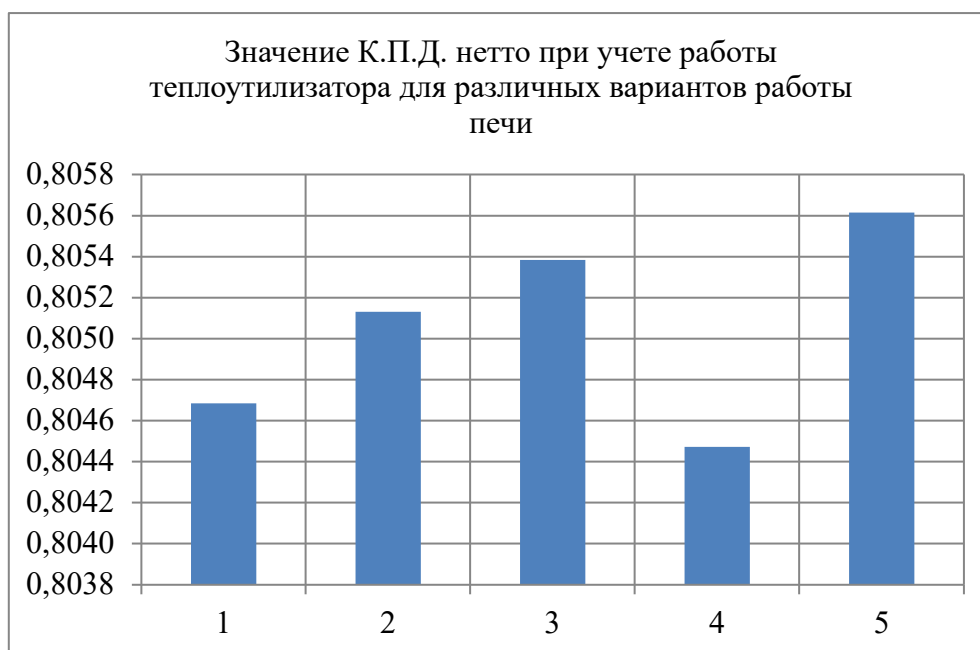


Рис. 2. Изменение К.П.Д. нетто с учетом работы теплоутилизатора для различных вариантов работы нагревательной печи



Рис. 3. Изменение значения коэффициента электропотребления E для различных вариантов работы нагревательной печи

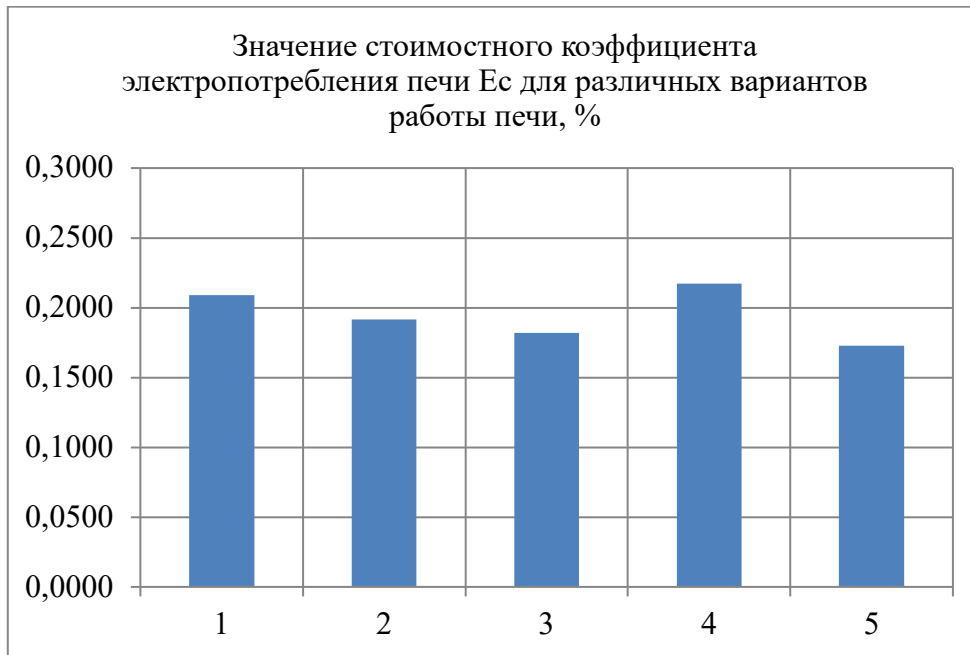


Рис. 4. Изменение значения стоимостного коэффициента электропотребления E для различных вариантов работы нагревательной печи

Повышение коэффициента электропотребления  $E$  и стоимостного коэффициента электропотребления  $E_c$  (рис. 3 и 4) для варианта 4 функционирования печи демонстрируют эффект, выражающийся в повышении влияния потребления электрической энергии на общую эффективность функционирования нагревательной печи непрерывного действия.

Особенно важно, в этой ситуации, подчеркнуть, что сокращение потребления топлива может не компенсировать увеличение потребления электрической энергии.

Максимальный технико-экономический эффект достигается при проведении комплексной модернизации, которая затрагивает все аспекты функционирования нагревательной печи.

Полученные данные наглядно свидетельствуют о том, что при планировании мероприятий по повышению эффективности промышленных нагревательных печей необходимо учитывать влияние изменения электропотребления агрегата на общую эффективность процесса нагрева металла. Для каждого предприятия необходим индивидуальный комплексный подход

при проведении модернизации нагревательных печей.

### Выводы

В работе предложена методика учета потребления электроэнергии при оценке теплотехнической и технико-экономической эффективности пламенной нагревательной печи непрерывного действия. Приведены выражения для расчета параметров эффективности процессов нагрева металла, позволяющие оценить теплотехнический и экономический эффекты при проведении модернизации печей непрерывного действия. Рассмотрены несколько вариантов модернизации работы печей и с помощью предложенной методики определены параметры эффективности, проведен их анализ и взаимное влияние. Установлено, что мероприятия по снижению электропотребления в процессе нагрева металла могут иметь больший эффект, чем мероприятия, направленные на снижение расхода топлива, но не учитывающие повышение электропотребления. Негативный эффект при модернизации пламенных печей также может возникнуть при несоблюдении баланса между расходом топлива, его теплотехническими характеристиками и стоимостью. Наибольший же технико-экономический эффект имеют комплексные мероприятия, учитывающие все аспекты взаимного влияния параметров модернизации. В качестве общего вывода, следует подчеркнуть необходимость комплексного индивидуального подхода при проведении модернизации процессов нагрева металла в нагревательных печах непрерывного действия промышленных предприятий.

### Список литературы

1. Бирюков, А.Б. Современные аспекты использования рекуперативных горелок для отопления пламенных печей / А.Б. Бирюков // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. 2015. – №8(1388). – С. 73-79.
2. Бирюков, А.Б. Методика прогнозирования теплотехнической эффективности использования рекуперативных горелок/ А.Б. Бирюков, П.А. Гнителиев, Я.С. Власов // Вестник

Ивановского государственного энергетического университета. – 2018. – №1. – С. 13-19.

3. Бирюков, А.Б. Современные аспекты использования регенеративных горелок для отопления пламенных печей / А.Б. Бирюков // Черная металлургия. Бюллетень научнотехнической и экономической информации. – 2015. – №11(1391). – С. 31-36.
4. Бирюков, А.Б. Методика оценки итогового удельного расхода топлива на отопление печи / А.Б. Бирюков, А.Н. Лебедев, П.А. Гнителиев // Вестник Донецкого национального технического университета. – 2019. – №4. – С.62-67.
5. Сафьянц, С.М. Создание методики определения линий энергопотребления предприятия / С.М. Сафьянц, А.Б. Бирюков, А.С. Сафьянц // Вестник НТУ" ХПИ". – 2016. – №9(1181). – С. 151-158.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Heat and mass transfer / S.I. Ginkul [et al.]. – Donetsk: Nord-Press, 2006. – 292 p.
10. Частухин, В.И. Тепловой расчет промышленных парогенераторов: Учеб. пособие для вузов по спец. "Пром. теплоэнергетика" / В. И. Частухин, Е. Л. Заречанский, С. М. Константинов и др. Под ред. В. И. Частухина. - Киев: Вища школа, 1980. – 183 с.
11. Сидельковский, Л.Н. Парогенераторы промышленных предприятий. / Л.Н. Сидельковский, В.Н. Юренин – М.: Энергия; Издание 2-е, перераб. и доп., 1978 г. – 336 с.

A.B. Biryukov /Dr. Sci. (Eng.)/ V.A. Sidorov / Dr. Sci. (Eng.)/  
Donetsk National Technical University (Donetsk)

## NEW WAYS OF PROFOUND ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF FLAME FURNACES TAKING INTO ACCOUNT THE CONSUMPTION OF ELECTRICAL ENERGY

**Background.** One of the ways to improve energy efficiency of industrial flame furnaces is to reduce energy consumption of heating process. But when it comes to the real modernization in industry we face the absence of complex methods that enable us to take into account all of the factors. For example reducing of the consumption of natural gas may lead to increasing of the electrical energy consumption. Also we have to consider the change of the energy resources cost. In order to achieve the optimum effect of flame furnaces modernization it is necessary to build a new method of energy efficiency analysis that allow considering all of the technical and economic aspects.

**Materials and/or methods.** Some current methods of energy efficiency analysis enable us to determine the coefficient of efficiency of flame furnaces. In order to take into account the influence of electrical energy consumption this study proposes new two parameters – the coefficient of electrical energy consumption and the cost parameter of electrical energy consumption. Both parameters make it possible to estimate the effect of modernization more accurate.

**Results.** This study represents the derivation of the new energy efficiency parameters for flame furnaces. In order to analyze the introduced parameters the study represents a few scenarios of modernization that includes reducing of electrical energy consumption, reducing of fuel consumption, changing of fuel parameters and complex modernization. The results of estimation showed the best scenario and the interference of parameters of modernization.

**Conclusion.** The study shows the importance of complex ways to determine the economic and energy efficiency of heating process in flame furnaces. The introduced method of energy efficiency analysis enables us to determine the most appropriate scenario for modernization of flame furnaces.

**Keywords.** Flame furnace, heat, energy coefficient, fuel consumption, electrical energy consumption.

#### Сведения об авторах

##### А.Б. Бирюков

SPIN-код: 3186-0680  
 ORCID iD: 0000-0002-8146-2017  
 Телефон: +7 (856) 301-08-61  
 Эл. почта: birukov.donntu@mail.ru

##### В.А. Сидоров

Телефон: +7 (949) 312-79-13  
 Эл. почта: sidorov\_va58@mail.ru

Статья поступила 14.02.2022 г.  
 ©А.Б. Бирюков, В.А. Сидоров, 2022  
 Рецензент д.т.н. И.А. Бершадский