



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>  
УДК 669.187.2

Поступила 11.11.2020  
Received 11.11.2020

## ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ИСТОЧНИКОВ ТЕПЛОТЫ ПРИ ЭЛЕКТРОПЛАВКЕ МЕТАЛЛА

С. В. КОРНЕЕВ, И. А. ТРУСОВА, Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Беларусь, пр. Независимости, 65. E-mail: korneev@bntu.by

*В работе рассмотрены пути оценки эффективности использования альтернативных источников теплоты при плавке сплавов в дуговых электропечах. Основное внимание уделено увеличению производительности печей и сокращению затрат на производство. Выполнен анализ использования различных систем интенсификации плавки в дуговых печах и их основные показатели. Осуществлена оценка эффективности использования топлива в электродуговых печах. Рассчитан ожидаемый экономический эффект от внедрения альтернативных источников энергии в электрических печах. Показано, что экономический эффект от внедрения на электродуговых печах альтернативных источников энергии существенно зависит от величины повышения производительности печи.*

**Ключевые слова.** Дуговая сталеплавильная печь, газокислородные горелки, природный газ, инжекторы, тепловыделение, эффективность.

**Для цитирования.** Корнеев, С. В. Эффективность использования альтернативных источников теплоты при электроплавке металла / С. В. Корнеев, И. А. Трусова // Литье и металлургия. 2020. № 4. С. 99–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>.

## EFFICIENCY OF USING ALTERNATIVE SOURCES OF HEAT IN ELECTRIC MELTING OF METAL

S. V. KORNEEV, I. A. TRUSOVA, Belarusian National Technical University, Minsk, Belarus, 65, Nezavisimosti ave. E-mail: korneev@bntu.by

*The paper considers ways to assess the efficiency of using alternative sources of heat when melting alloys in electric arc furnaces. The focus is on increasing furnace productivity and reducing production costs. The analysis of the use of various systems for intensifying melting in arc furnaces and their main indicators is carried out. An assessment of the efficiency of fuel use in electric arc furnaces has been carried out. The expected economic effect from the introduction of alternative energy sources in electric furnaces has been calculated. It is shown that the economic effect from the introduction of alternative energy sources on electric arc furnaces depends significantly on the increase in furnace productivity.*

**Keywords.** Electric arc furnace, oxy-fuel burners, natural gas, injectors, heat generation, efficiency.

**For citation.** Korneev S. V., Trusova I. A. Efficiency of using alternative sources of heat in electric melting of metal. Foundry production and metallurgy, 2020, no. 4, pp. 99–105. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2020-4-99-105>.

### Введение

Повышение технико-экономических показателей электрических печей имеет тенденцию увеличения их мощности, так как в подавляющем большинстве случаев это приводит и к сокращению удельных энергетических затрат. Однако на современном этапе развития технологий электроплавки и конструкций электропечей возникают ограничения по дальнейшему увеличению мощности трансформаторов. Анализ удельных показателей мощности печей для плавки чугуна и стали показывает, что для современных сверхмощных электродуговых печей удельная мощность трансформаторов достигла 1100 кВт/А/т. Кроме того, доля электрической энергии в электродуговых печах, функционирующих на металлургических предприятиях, в настоящее время составляет 55–65%, т. е. остальная энергия вносится посредством сжигания топлива и за счет экзотермических реакций в ванне расплава. Для индукционных тигельных печей удельная активная мощность достигла 1000 кВт/т, т. е. анализ характеристик печей показал, что за последние 60 лет удельная мощность источников энергии увеличилась более чем в 2 раза.

Исследование максимальной скорости нагрева и плавления материалов в печах различных типов показало следующее:

- при электродуговом нагреве наблюдается высокая скорость нагрева поверхности вплоть до температур плавления, однако, как для завалки, так и для жидкого металла важен объемный теплоперенос за счет конвективной составляющей, в противном случае может наблюдаться интенсивный угар и испарение металла;
- большую скорость нагрева можно получить при индукционном нагреве, ограничением мощности в данном варианте могут являться только ограничение мощности источника питания, высота мениска в индукционных тигельных печах, выдавливание металла из канала в индукционных канальных печах и более интенсивный износ тигля при циркуляции металла;
- для индукционных печей скорость нагрева зависит от правильного подбора размерных параметров печи и ее частоты в зависимости от вида применяемой металлошихты;
- при нагреве и плавлении металла в печах сопротивления скорость нагрева зависит от мощности тепловыделения нагревателей и их температуры, а так как нагрев является косвенным, то и от параметров теплообмена, при этом существенным ограничением является максимальная температура материала нагревателей и срок их службы;
- ограничением скорости нагрева в топливных печах является мощность источника теплоты (расход топлива), а также конечная температура нагрева, так как нагрев с использованием топлива имеет низкий КПД в области высоких температур;
- при высокотемпературном нагреве ограничением скорости нагрева является также калориметрическая и адиабатическая температура горения топлива.

Таким образом, при сопоставимой мощности газовый нагрев обеспечивает быстрый подъем температуры металла, но по мере увеличения температуры металла растет температура уходящих продуктов сгорания, что снижает мощность, передаваемую металлу, при этом скорость и экономичность нагрева падают.

Электродуговые печи конструктивно наиболее приспособлены для эффективного использования альтернативных источников энергии. В высокомоощных электродуговых печах системы интенсификации плавки посредством сжигания природного газа и инъекции твердого и жидкого топлива получили распространение уже достаточно давно, на печах малой емкости только внедряются в последнее время.

Другие типы электропечей конструктивно менее подходят для непосредственной установки систем интенсификации плавки, однако данный подход также используется, но различные источники теплоты при этом используются в разных агрегатах. Примером могут служить так называемые дуплекс-процессы или использование внешнего предварительного подогрева металлошихты в установках подогрева.

### Анализ данных опытной эксплуатации систем интенсификации плавки

Рассмотрим примеры использования различных систем интенсификации плавки и их основные показатели по данным работ [1–3, 6, 7], результаты которых приведены в таблице. Система PYREJET™, впервые внедренная фирмой «American Combustion (ACI)» в середине 80-х годов, состоит из нескольких настенных инжекторов, может сочетать несколько многофункциональных инжекторов PYREJET™ и кислородно-топливных горелок Purox. PYREJET™ также оснащен сменной трубой для впрыска углерода, расположенной вблизи осевой линии горелки. В другом варианте (для печи емкостью 150 т жидкой стали, работающей с долей металлизированного сырья более 50%) при установке системы PyreJet получены результаты, приведенные в [2].

#### Результаты эксплуатации систем интенсификации электроплавки на различных предприятиях

Параметр (изменение)	Установленная система, значения параметров согласно литературному источнику					
	PYREJET™, [2]	PYREJET™, [1]	PYREJET +AlarcPC™, [3]	JetBOx, [6]	JetBOx, [6]	CoJet [7]
Потребление электроэнергии, кВт·ч/т	-57 (-9,3 %)	-22 (-5,3 %)	-35	-27	-12	-45
Потребление природного газа, м <sup>3</sup> /т	+2,7	+1,5	+2	+2,5	+0,4	+10 (КОКСОВЫЙ)
Потребление кислорода, м <sup>3</sup> /т	+13 (+92,9%)	+4 (+11,5 %)	+10	-7,6	+3,3	+10
Потребление углерода, кг/т		+3 (+23 %)	+2	-5	+0,3	-0,3
Время плавки, мин		-3 (-5 %)	-6	-1,4		-4,2
Время под током, мин	-8 (-8,3 %)		-4	-1,5	-0,3	
Выход годного металла, %		0		+1,5		0
Расход электродов, кг/т	-0,1 (-4,2 %)		-0,2	-0,12		

Также приведены результаты внедрения системы PYREJET+AlarcPC™ при выплавке углеродистых сталей на предприятии Vallourec (Франция) [3]. Для эффективного использования энергии дожигания инжекторы PC должны устанавливаться вблизи источников генерации CO.

Компания BSE предложила решение по системе интенсификации VLB и CarbJet, в котором VLB размещаются в боковой стенке в водоохлаждаемых коробках без выступания внутрь печи. В настоящее время в мире работает более 190 фурм-манипуляторов BSE, дополнительно установлено около 20 LM2s (фурма-манипулятор с автоматическим замером температуры). С 1999 г. установлено более 40 систем VLB. Были достигнуты следующие показатели: среднее снижение потребления электроэнергии – 40 кВт·ч/т, уменьшение времени под током – 5,2 мин. Например, 90-тонная печь работала с системой предварительного подогрева лома и была оснащена пятью горелками и фурмой-манипулятором BSE. Для повышения энергоэффективности в стеновых панелях были установлены четыре системы VLB для работы в сочетании с фурмой-манипулятором. Время под током и потребление электроэнергии были снижены соответственно на 3 мин (9%) и 37 кВт·ч/т (10%) с увеличением расхода кислорода на 2,4 м<sup>3</sup>/т и снижением расхода газа на 0,3 м<sup>3</sup>/т. Таким образом, новая технология инъекции работает более эффективно, чем предыдущая (например, результаты приведены в [4]).

В 1995 г. фирмой «Siemens VAI» разработаны и предложены к внедрению технология и оборудование SIMETAL RCB (Refining Combined Burner – технология вдувания кислорода, газа и углерода). Следует отметить, что к настоящему времени эта технология внедрена более чем на 100 дуговых сталеплавильных печах. При этом экономия электроэнергии может составлять до 15%, а экономия потребления кислорода – до 10% по сравнению с другими кислородными фурмами, уменьшение времени плавки – до 10%, повышение производительности – до 6%. При производстве коррозионностойких сталей до и после установки системы получены следующие показатели: сокращение потребления электроэнергии составило 55 кВт·ч/т, сокращение потребления кислорода – 3,8 м<sup>3</sup>/т [5].

Фирмой «Process Technology International (PTI)» разработана система JetBOx. К настоящему времени более 20 электродуговых печей (EAF) по всему миру оснащены этими системами. В качестве примера в таблице приведены результаты использования этой технологии при различных условиях.

Не менее известной является технология CoJet®, установленная более чем на 70 дуговых печах емкостью от 30 до 200 т (постоянного и переменного тока, Consteel® и шахтных печах). Особенностью CoJet® является длинный участок струи газа, двигающегося со сверхзвуковой скоростью. Результаты работы за первые шесть месяцев после установки системы CoJet на 100-тонной печи постоянного тока [7] приведены в таблице.

Десятки печей, работающих в разных странах, оснащены инъекционной системой КТ компании «Techint (Tenova Melt Shops)». Система КТ Injection System® (КТ) представляет собой настенную многоточечную систему для вдувания кислорода и широкого спектра материалов: углерода, извести, DR1 и других материалов. На основании опыта компании «Techint» по внедрению системы КТ были сделаны следующие выводы: расход электроэнергии снижается примерно на 75 кВт·ч/т, удельная производительность увеличивается на 0,25 т/ч/МВт [8].

Следует также отметить технологию фирмы «Stein Injection Technology», которая была внедрена на 150-тонной ДСП с получением следующих результатов: сокращение потребления электроэнергии – 108 кВт·ч/т; суммарный расход природного газа – 6,2 м<sup>3</sup>/т; суммарный расход кислорода – 37,5 м<sup>3</sup>/т; суммарный расход углерода – 7,2 кг/т; увеличение производительности – 34% [9].

В 2007 г. на Белорусском металлургическом заводе была произведена реконструкция каркаса печи ДСП-2 с установкой новой системы интенсификации. В настоящее время на БМЗ функционируют две 100-тонные печи ДСП-2 и ДСП-3, которые оснащены аналогичной системой интенсификации фирмы MORE, а одна печь ДСП-1 – системой интенсификации на основе оборудования «PyreJet» и «Alarc-PC» фирмы AmericanCombustion (ACI). Например, на ДСП-2 после проведения модернизации за счет увеличения расхода кислорода (в среднем на 7,6 м<sup>3</sup>/т), при использовании инъекции угольной пыли типа В (до модернизации не использовалось), а также новых горелок с большей мощностью удалось добиться снижения потребления природного газа на 0,86 м<sup>3</sup>/т, а также уменьшения расхода электроэнергии примерно на 32 кВт·ч/т.

После модернизации ДСП-1 расход природного газа увеличился в среднем на 3,1 м<sup>3</sup>/т, кислорода – на 17,43 м<sup>3</sup>/т. Это в комплексе позволило достигнуть экономии электроэнергии около 34,7 кВт·ч/т.

### Оценка эффективности использования топлива в электродуговых печах

Средний приход энергии, по рекомендациям работы [10], при использовании продувки составляет 3,8 кВт·ч/м<sup>3</sup> кислорода, газокислородных горелок – 6,5 кВт·ч/м<sup>3</sup>, фурм для дожигания СО – 3,3 кВт·ч/м<sup>3</sup>.

Кремний обладает наиболее высокой удельной энергией (11,2 кВт·ч/м<sup>3</sup>O<sub>2</sub>), энергия окисления углерода до СО минимальна и составляет 2,73 кВт·ч/м<sup>3</sup> O<sub>2</sub>. Диапазон энергии варьируется от 3,2 до 6,8 кВт·ч/м<sup>3</sup>O<sub>2</sub> [11].

Усредненный коэффициент использования топлива и энергии окислительных реакций можно определить следующим образом:

1. Определяем разность удельного расхода электрической энергии  $\Delta W_{эл}$  (кВтч/т), природного газа (м<sup>3</sup>/т) и кислорода (м<sup>3</sup>/т) в базовом и проектном варианте.

2. Определяем удельное энерговыделение при использовании природного газа и кислорода  $W_{экс} = W_{CH_4} + W_{O_2}$ :

$$W_{CH_4} = q_{CH_4} \cdot n_{CH_4},$$

где  $q_{CH_4}$  – удельный расход природного газа, м<sup>3</sup>/т;

$n_{CH_4}$  – тепловой эффект горения природного газа, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

$$W_{O_2} = q_{O_2} \cdot n_{O_2},$$

где  $q_{O_2}$  – удельный расход кислорода, м<sup>3</sup>/т;

$n_{O_2}$  – тепловой эффект при использовании кислорода, кВт·ч/м<sup>3</sup>;

3. Из уравнения  $\Delta W_{эл} = W_{э1} - W_{э2} = \eta(W_{экс2} - W_{экс1})$  находим  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\Delta W_{эл}}{(W_{CH_4} + W_{O_2})}.$$

Используя приведенный алгоритм, определяем усредненный коэффициент эффективности для системы интенсификации плавки на примере ДСП-2 ОАО «БМЗ».

Учитывая рекомендации, описанные выше, получаем:

$$\Delta W_{эл} = W_{э1} - W_{э2} = \eta(W_{экс2} - W_{экс1}) = (440,5 - 408,6) = \eta((4,92 \cdot 9 + 35,8 \cdot 6,8) - (5,78 \cdot 9 + 28,2 \cdot 6,8)), \eta = 0,73.$$

### Экономический эффект от внедрения альтернативных источников энергии в электрических печах

Экономический эффект от применения топливных горелок в электродуговых печах можно упрощенно определить, используя выражение

$$\Theta = \Delta Z_э - Z_т - Z_о - Z_{а.о.} + \Delta Z_{в.м.} + \Delta П,$$

где  $\Theta$  – годовой экономический эффект, у.е.;  $\Delta Z_э$  – экономия затрат на электрическую энергию при использовании топливных горелок, у.е.;  $Z_т$  – затраты на топливо, у.е.;  $Z_о$  – затраты на производство и доставку окислителя топлива, у.е.;  $Z_{а.о.}$  – затраты на амортизацию оборудования системы интенсификации, у.е.;  $\Delta Z_{в.м.}$  – экономия вспомогательных материалов, у.е.;  $\Delta П$  – дополнительная прибыль, полученная в результате увеличения производительности агрегата, а также увеличения выхода годового металла, у.е.

Далее будем использовать удельные величины, отнесенные к 1 т жидкой стали:

$$\Theta = \Delta W_{эл} \cdot C_{эл} - G_{газ} \cdot C_{газ} - G_{ок} \cdot C_{ок} - \frac{\%A \cdot C_о \cdot 1,1}{100M} + \Sigma(m_{Mi} \cdot C_{Mi}) + \frac{\Delta П}{M},$$

где  $G_{газ}$  – удельный расход природного газа, м<sup>3</sup>/т;  $C_{эл}$  – стоимость электрической энергии, у.е./(кВт·ч);  $C_{газ}$  – стоимость природного газа, у.е./м<sup>3</sup>;  $G_{ок}$  – удельный расход окислителя, м<sup>3</sup>/т;  $C_{ок}$  – стоимость окислителя, у.е./м<sup>3</sup>;  $\%A$  – процент амортизации газового оборудования;  $C_о$  – стоимость установленной системы интенсификации, у.е.; 1,1 – коэффициент, учитывающий затраты на обслуживание газового оборудования;  $M$  – годовой выпуск жидкой стали, т;  $m_{Mi}$  – масса сэкономленного  $i$ -го материала, кг/т;  $C_{Mi}$  – стоимость  $i$ -го материала, у.е./кг.

При наличии данных об эксплуатации действующих систем экономия электрической энергии и расход топлива можно подставить в формулу в готовом виде. Для оценочных расчетов можно использовать усредненные данные по аналогичным системам с учетом коэффициентов использования топлива.

Коэффициент полезного использования углеродистого топлива:



$$\eta_{\text{угл}} = \left( 1 - \frac{(V_{\text{п.с}} c_{\text{п.с}} t_{\text{п.с}} + q_{\text{хим}})}{Q_{\text{H}}^{\text{P}}} \right),$$

где  $V_{\text{п.с}}$  – объем продуктов сгорания,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $c_{\text{п.с}}$  – теплоемкость продуктов сгорания,  $\text{МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$ ;  $t_{\text{п.с}}$  – температура уходящих из печи продуктов сгорания,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $q_{\text{хим}}$  – недожог топлива,  $\text{МДж}/\text{м}^3$ .

Коэффициент полезного использования газообразного топлива рассчитывается аналогичным образом.

Для определения условий экономической эффективности работы системы интенсификации плавки найдем основные составляющие приведенного выше выражения.

Прирост прибыли в результате повышения производительности составляет:

$$\Delta\Pi = \bar{\Pi} \cdot \Delta P - \bar{\Pi}$$

Среднюю прибыль можно вычислить по данным средней стоимости металла и уровня рентабельности.

Рассмотрим следующий пример. При самом простом варианте стоимости металла 350 \$/т при уровне рентабельности продукции 10% получим среднюю прибыль  $\Delta\Pi = 350 \cdot 0,1 = 35$  \$/т. Тогда при неизменной себестоимости при повышении производительности, например на 5%, будет получена дополнительная прибыль за счет продажи дополнительной продукции в сумме  $\Delta\Pi = 35 \cdot 1,05 - 35 = 1,75$  \$/т.

Стоимость системы интенсификации плавки с использованием альтернативных источников может различаться в зависимости от состава оборудования и качества его изготовления при одинаковых расходах подаваемого топлива. Для дальнейших расчетов принимаем удельную стоимость системы подачи и сжигания газа, равной 5 \$/т, что при сроке амортизации оборудования в 10 лет и учете затрат на обслуживание дает затраты на амортизацию оборудования в объеме 0,55 \$/т.

Так как при работе средств интенсификации используются природный газ и антрацит, цены на которые изменяются независимо от изменения цен на электрическую энергию, то результаты расчетов, полученные для одного года эксплуатации, нельзя полностью транслировать на другие годы. Цена электрической энергии, так же как и цены на другие энергоносители и металл, может как увеличиваться, так и уменьшаться в долларовом эквиваленте. Для дальнейших оценок приняты: средневзвешенная цена электрической энергии – 0,098 \$/кВт·ч; цена природного газа – 0,284 \$/м<sup>3</sup> или 0,03 \$/кВт·ч (при теплоте сгорания природного газа 34 МДж/м<sup>3</sup> или 9,44 кВт·ч/м<sup>3</sup>); цена кислорода – 0,09 \$/м<sup>3</sup>.

С учетом того, что при сжигании природного газа на 1 м<sup>3</sup> газа необходимо 2 м<sup>3</sup> кислорода, итоговая цена газа с кислородом для его сжигания составит:

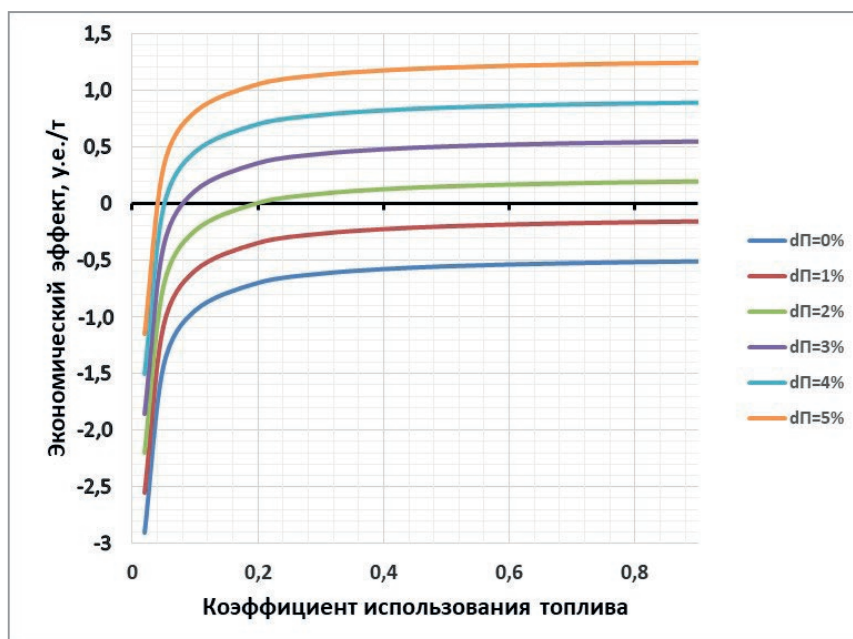
$$C_{\text{г}} = 0,464/9,44 = 0,049 \text{ $/кВт}\cdot\text{ч}.$$

При использовании приведенных выше данных определена зависимость экономического эффекта (\$/т) от коэффициента использования топлива при сжигании природного газа в электродуговой печи при различных вариантах увеличения производительности.

В подавляющем большинстве случаев при расплавлении завалки, когда температура металла близка к температуре ликвидуса и коэффициент использования топлива падает ниже 0,3, горелки природного газа отключают, так как их работа в этом режиме малоэффективна из-за плохой теплопередачи энергии металлу и высокой температуры уходящих газов.

Из рисунка следует, что экономический эффект от внедрения на электродуговых печах альтернативных источников энергии существенно зависит от величины повышения производительности печи. При высокой стоимости системы и работе печи с перерывами между плавками экономический эффект отрицательный, т.е. более дешевое топливо в виде природного газа не перекрывает затраты на амортизацию дополнительного газового оборудования. При представленных выше ценах экономический эффект имеет положительное значение без учета повышения производительности только при стоимости системы интенсификации менее 0,25 \$/т, что для печи производящей, например, 600 тыс. т в год составляет 150 тыс. \$.

Аналогичная картина наблюдается и при использовании углеродистого топлива. При расчетах принято, что стоимость кокса составляет 0,265 \$/кг или 0,033 \$/кВт·ч (при теплоте сгорания кокса 29 МДж/кг или 8,05 кВт·ч/кг). Использование более дешевого топлива на основе инжектируемой угольной пыли предпочтительнее при внедрении, но имеет менее оптимальные экологические показатели и более



Экономический эффект использования природного газа в электродуговой печи в зависимости от коэффициента использования топлива и повышения производительности

высокие требования к коэффициенту использования, так как сложнее обеспечить отсутствие недожога без дополнительных кислородных инжекторов, дожигающих CO в рабочем пространстве.

Внедрение альтернативных источников в электродуговых печах литейного класса осложняется отсутствием на предприятиях собственного дешевого технического кислорода, а в условиях Республики Беларусь еще и тем обстоятельством, что установленное плавильное оборудование имеет значительный запас по производительности, а, следовательно, задача повышения производительности может возникать только при выводе из эксплуатации физически и морально устаревших плавильных печей.

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Thebault, J.M.** A multi-function system for EAF steelmaking: industrial result at LME (France) / J. M. Thebault // 7<sup>th</sup> European Steel Making Conference, 26–29 May. Venice, Italy. 2002.
2. **Грант, М.** Адаптация работы электродуговой печи к нетрадиционным сырьевым материалам / М. Грант [и др.] // *Металлург*. 2014. № 2. С. 48–56.
3. **Cantacuzene, S.** Advanced EAF oxygen usage at Vallourec–mannesmann Saint saulve steelworks / S. Cantacuzene [et al] // *Ironmaking & Steelmaking*. 2005. Vol.32. № 3. P. 203–207.
4. **Opfermann, A.** Improvement of energy efficiency in EAF steelmaking / A. Opfermann // *Millennium steel*. 2009. P. 65–72.
5. **Моксон, П.** Применение системы RCB для вдувания кислорода в электродуговые печи / П. Моксон [и др.] // *Черные металлы*. 2004. № 4. С. 89–92.
6. **Brhel, J.** The JetBOx™ burner/injector system for EAF steelmaking / J. Brhel, Ch. Farmer, V. Shver // *Millennium steel*. 2006. P. 87–91.
7. **Cates, L.** Installation of Praxair's CoJet® Gas Injection System at Sumikin Steel and other EAFs with Hot Metal Charges / L. Cates [et al] // *AISTech 2008 Iron & Steel Technology Conference Proceedings*, Pittsburgh, PA. 2008.
8. Оценка эффективности работы электродуговых печей при использовании инжекционной системы КТ / *Черная металлургия*. 2004. № 11. С. 53–59.
9. **Данилов, Е. В.** Оптимизация работы дуговых сталеплавильных печей / Е. В. Данилов // *Металлург*. 2003. № 7. С. 60.
10. **Opfermann, A.** Energy efficiency of Electric Arc Furnace / A. Opfermann, D. Riedinger // *Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference*. May 5–8 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. // *AIST, Association for Iron & Steel Technology*. Pittsburgh, 2008. Vol. 2.
11. **Adams, W.** Factors influencing the total energy consumption in arc furnaces / Adams, W. [et al] // *Proceedings 59<sup>th</sup> electric arc furnace conference 2001 Phoenix, Arizona*. 2001.

## REFERENCES

1. **Thebault, J.M.** A multi-function system for EAF steelmaking: industrial result at LME (France). 7<sup>th</sup> European Steel Making Conference, 26–29 May.– Venice, Italy.– 2002.
2. **Grant M.** Adaptacija raboty jelektrodugovoj pechi k netradicionnym syr'evym materialam [Adaptation of the operation of an electric arc furnace to unconventional raw materials]. *Metallurg = Metallurgist*, 2014, no. 2, pp. 48–56.
3. **Cantacuzene S.** Advanced EAF oxygen usage at Vallourec–mannesmann Saint saulve steelworks. *Ironmaking & Steelmaking*. 2005, Vol.32, no. 3, pp. 203–207.

4. **Opfermann A.** Improvement of energy efficiency in EAF steelmaking. Millennium steel, 2009, pp. 65–72.
5. **Mokson P.** Primenenie sistemy RCB dlja vduvanija kisloroda v jelektrodugovye pechi [Application of the RCB system for oxygen injection into electric arc furnaces]. *Chernye metally = Black metalm*, 2004, no. 4, pp. 89–92.
6. **Brhel J., Farmer Ch., Shver V.** The JetBOx™ burner/injector system for EAF steelmaking. Millennium steel, 2006, pp. 87–91.
7. **Cates L.** Installation of Praxair's CoJet® Gas Injection System at Sumikin Steel and other EAFs with Hot Metal Charges. AISTech 2008 Iron & Steel Technology Conference Proceedings, Pittsburgh, PA, 2008.
8. Ocenka jeffektivnosti raboty jelektrodugovyh pechej pri ispol'zovanii inzhekcionnoj sistemy KT [Evaluation of the efficiency of electric arc furnaces using the KT injection system]. *Chermetinformacija Publ., Bjul'eten' Chernaja metallurgija = Ferrous Metallurgy Bulletin*, 2004, no. 11, pp. 53–59.
9. **Danilov E. V.** Optimizacija raboty dugovyh staleplavil'nyh pechej [Optimization of the work of arc steel-making furnaces]. *Metallurg = Metallurgist*, 2003, no.7, 60p.
10. **Opfermann A., Riedinger D.** Energy efficiency of Electric Arc Furnace. (Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference: May 5–8 2008, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A.). AIST, Association for Iron & Steel Technology. Pittsburgh, 2008, Vol. 2.
11. **Adams W.** Factors influencing the total energy consumption in arc furnaces, Proceedings 59th electric arc furnace conference 2001 Phoenix, Arizona. – 2001.