

## Металлургическое производство

*Economical effect of application of fuel burners at using as an oxidant of oxygen and air for conditions of electrical arc furnaces is determined.*

В. И. ТИМОШПОЛЬСКИЙ, И. А. ТРУСОВА, С. В. КОРНЕЕВ, БИТУ

УДК 669.187.2

### ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНОГО ТОПЛИВА В ЭЛЕКТРОДУГОВЫХ ПЕЧАХ

**Введение.** Основной задачей черной металлургии на современном этапе развития является обеспечение потребителей металлом необходимого качества при минимальных издержках производства. Для условий Республики Беларусь с учетом ограниченности сырьевой базы широкое распространение получили плавильные агрегаты, в которых основным источником теплоты служит преобразованная электрическая энергия, а в качестве шихты – преимущественно металлический лом. При этом использование электродуговых печей более универсально в сравнении с индукционными печами, так как в зависимости от применяемых футеровочных материалов позволяет использовать металлошихту более низкого качества либо обеспечивает меньший расход электроэнергии. Кроме того, в электродуговых печах имеется возможность использования дополнительных источников теплоты, в частности, природного газа.

В работе [1] проанализированы два варианта выплавки стали с использованием электрической энергии, полученной на электростанциях со средним КПД 36%, и с использованием первичной энергии в виде природного газа, когда плавление металлошихты происходит в отдельной камере за счет энергии горения газа, а расплав перегревают с использованием энергии электрических дуг. Приведенные результаты свидетельствуют о преимуществах использования первичной энергии в отношении как удельных затрат, так и экологических характеристик. Рассмотренный вариант предполагает использование специфических агрегатов, тогда как существует более традиционный путь использования первичной энергии в виде горелок, установленных непосредственно в электродуговой печи.

Для каждой емкости печи (геометрических размеров) существует оптимальная мощность трансформатора, превышение которой ведет к повышенному износу огнеупоров и угару металла, а также увеличению потерь в «короткой» электрической сети (например, для условий ДСП-100 75МВА при работе на верхних ступенях с токами 45–55 кА потери в «короткой» электрической сети при сопротивлении водоохлаждаемых шин короткой сети, равном 0,3 МОм, составят 1,823–2,723 МВт, т. е. увеличение силы тока на 22% повышает потери на 50%). При недостаточной мощности трансформатора происходит недоплавление кусков металла на откосах печи и, как следствие, снижение производительности. В большегрузных печах повышенный расход огнеупоров минимизируют, заменяя теплонапряженные элементы печи водоохлаждаемыми панелями, что приводит к увеличению тепловых потерь на охлаждение. Угар металла может уменьшаться за счет перемешивания ванны вследствие исключения локальных перегревов в зоне действия дуг.

Данные условия характерны для технологии выплавки в большегрузных печах и, как правило, отсутствуют при выплавке стали в малотоннажных ДСП (до 25 т). В связи с этим особенно актуально рассмотреть возможность интенсификации процессов в малотоннажных ДСП за счет сжигания топлива.

Необходимо отметить, что пока идет проплавление «колодцев», дуги горят в толще шихты и теплота от них весьма эффективно передается преимущественно близлежащим кускам металлошихты, которые нагреваются и расплавляются с высокими скоростями. Стены и свод в этот период экранированы от дуг периферийными слоями слабо прогретой шихты. Горячие газы, покидающие

зону дуг, охлаждаются этими слоями. Поэтому тепловые потери относительно невелики и энергия, выделяющаяся в дугах, используется наиболее полно.

С наступлением второй фазы плавления осевшие периферийные слои шихты уже не экранируют стены и свод от излучения дуг. Недостаточная температура периферийных слоев металлошихты приводит к тому, что куски шихты на откосах ванны сползают и погружаются в жидкий металл недостаточно прогретыми. В результате расплавление затягивается, особенно при использовании тяжеловесной металлошихты, которая при слабом перемешивании, характерном для ДСП, плавится в жидком металле относительно медленно.

Период плавления в таком случае можно проводить с использованием топливно-кислородных горелок, что позволяет уменьшить продолжительность доплавления шихты и облегчить условия службы футеровки стен при работе на длинных мощных дугах. Топливо-кислородные горелки позволяют также компенсировать охлаждающее воздействие водоохлаждаемых панелей и ускорить плавление шихты в так называемых «мертвых» зонах печи у стен между электродами.

**Методика исследований.** Целью данной работы является определение экономического эффекта от применения топливных горелок при использовании в качестве окислителя кислорода и воздуха для условий электродуговых печей.

Экономический эффект от применения топливных горелок в электродуговых печах можно рассчитать по формуле

$$\mathcal{E} = \Delta Z_{\mathcal{E}} - Z_T - Z_O - Z_{a.o} + \Delta Z_{v.m} + \Delta\Pi, \quad (1)$$

где  $\Delta Z_{\mathcal{E}}$  – экономия затрат на электрическую энергию при использовании топливных горелок;  $Z_T$  – затраты на топливо;  $Z_O$  – затраты на производство и доставку окислителя топлива;  $Z_{a.o}$  – затраты на амортизацию газового оборудования;  $\Delta Z_{v.m}$  – экономия вспомогательных материалов;  $\Delta\Pi$  – дополнительная прибыль, полученная в результате увеличения производительности агрегата.

Для удобства далее будем оперировать удельными величинами, отнесенными к 1 т жидкой стали:

$$\mathcal{E}_1 = \frac{G_{\text{газ}} Q_{\text{н}}^{\text{р}} \eta_{\text{газ}}}{3,6 \eta_{\text{эл}}} C_{\text{эл}} - G_{\text{газ}} C_{\text{газ}} - G_{\text{ок}} C_{\text{ок}} - \frac{1,1 A C_o}{100 M} + \sum (m_{mi} C_{mi}) + \frac{\Delta\Pi}{M}, \quad (2)$$

где  $G_{\text{газ}}$  – удельный расход природного газа, м<sup>3</sup>/т;  $Q_{\text{н}}^{\text{р}}$  – низшая рабочая теплота сгорания природ-

ного газа, МДж/м<sup>3</sup>;  $\eta_{\text{газ}}$  – коэффициент полезного использования газа;  $\eta_{\text{эл}}$  – коэффициент полезного использования электрической энергии;  $C_{\text{эл}}$  – стоимость электрической энергии, у. е./кВт·ч;  $C_{\text{газ}}$  – стоимость природного газа, у. е./м<sup>3</sup>;  $G_{\text{ок}}$  – удельный расход окислителя, м<sup>3</sup>/т;  $C_{\text{ок}}$  – стоимость окислителя, у. е./м<sup>3</sup>;  $A$  – амортизация газового оборудования, %;  $C_o$  – стоимость установленного газового оборудования, 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.

Коэффициент полезного использования газа определяется по выражению

$$\eta_{\text{газ}} = \left( 1 - \frac{(V_{\text{п.с}} c_{\text{п.с}} t_{\text{п.с}} + q_{\text{хим}})}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} \right), \quad (3)$$

где  $V_{\text{п.с}}$  – объем продуктов сгорания, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>;  $c_{\text{п.с}}$  – теплоемкость продуктов сгорания, МДж/(м<sup>3</sup>·К);  $t_{\text{п.с}}$  – температура продуктов сгорания, °С;  $q_{\text{хим}}$  – химический недожог, МДж/м<sup>3</sup>.

Коэффициенты полезного использования газа и полезного использования электрической энергии учитывают только потери для данных источников теплоты. Для сжигаемого газа это потери с продуктами сгорания, а для электрической энергии – потери в короткой сети. Тепловые потери через подину, футеровку, водоохлаждаемые элементы печи, с газами, образующимися в результате окисления элементов металлошихты, и т. д., будем относить к тепловому КПД процесса плавки  $\eta_T$ , который присутствует в обоих случаях, а, следовательно, в формуле (2) сокращается.

Рассмотрим три случая применения природного газа в электродуговых печах: сжигание газа при помощи кислорода, сжигание газа в высокоскоростных горелках с использованием воздуха, сжигание газа в рекуперативных горелках с использованием воздуха. Будем считать, что выбранный коэффициент избытка окислителя обеспечивает полное сгорание и химический недожог в формуле (3) в дальнейшем будем принимать равным нулю.

**Сжигание газа при использовании топливно-кислородных горелок (ТКГ).** Достоинствами данного способа сжигания являются минимальные потери с продуктами сгорания, а также более высокая калориметрическая температура горения. К недостаткам можно отнести высокие затраты на получение и доставку технического кислорода (кроме того, требуются капитальные вложения в строительство газокислородной станции).

Как правило, технический кислород используется на металлургических предприятиях в электродуговых печах большой емкости, где его применяют также для продувки расплава и дожигания СО.

Принятый в расчетах состав природного газа приведен в табл. 1.

Таблица 1. Состав природного газа

Компонент	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> и др.
Объемная доля, %	95,8	2,9	0,07	0,2	0,15	0,40	0,48

Принимаем значение  $W^c = 77 \text{ г/м}^3$  и осуществляем пересчет компонентов природного газа с  $Q_H^p = 33,455 \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3}$  с учетом принятого содержания влаги (табл. 2).

Таблица 2. Состав влажного газа

Компонент	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	CO <sub>2</sub>	N <sub>2</sub> и др.	H <sub>2</sub> O
Объемная доля, %	87,42	2,65	0,06	0,18	0,14	0,37	0,44	8,74

Необходимое количество кислорода для горения топлива составляет:  $V_{O_2} = 1,86705 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Продукты сгорания полного сгорания природного газа:  $V_{CO_2} = 0,9469 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $V_{H_2O} = 1,9351 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Суммарный объем продуктов сгорания для принятого состава газа:  $V_{п.с.} = 2,882 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

При сжигании природного газа выделяется энергия

$$E = \frac{G_{\text{газ}} Q_H^p}{3,6}, \text{ кВт}\cdot\text{ч},$$

где  $G_{\text{газ}}$  – объем природного газа при нормальных условиях, м<sup>3</sup>.

Для выбранного состава природного газа  $E = 9,293 \text{ кВт}\cdot\text{ч}$ . Данная энергия используется полезно лишь частично. Часть ее распределяется между полезной теплотой и тепловыми потерями через подину, охлаждаемые элементы и т. д., а часть уносится с удаляемыми из печи продуктами сгорания, величина которой зависит от температуры продуктов сгорания и их объема. Учитывая, что температура продуктов сгорания зависит от параметров их теплообмена с металлошихтой и температуры металлошихты, в дальнейшем оценим экономический эффект применения природного газа в зависимости от температуры металлошихты, принимая температуру продуктов сгорания несколько выше, чем у металлошихты. Также будем предполагать, что расход природного газа находится в пределах, обеспечивающих его охлаждение до указанных температур, за время нахождения в рабочем пространстве (по различным литературным данным практические значения удельного расхода природного газа составляют 4–10 м<sup>3</sup>/т). При более высоких значениях расхода коэффициент полезного использования природного газа будет уменьшаться, так как будет возрастать температура продуктов сгорания, поэтому для увеличения эффективности использования горелок их необходимо делать подвижными для омывания газами большей площади (при использовании вертикальных поворотных ТКГ конструкции НИИМ пропорциональное снижение расхода электрической энергии отмечалось до значения расхода природного газа, равного 20 м<sup>3</sup>/т [2]).

На практике при использовании природного газа отмечается меньший расход электродов, а также повышение производительности без увеличения угара (при использовании 6–8 м<sup>3</sup>/т длительность периода плавления сокращается на 10–15% [2]).

**Сжигание газа при использовании в качестве окислителя холодного воздуха.** Достоинством данного способа сжигания газа являются минимальные затраты на окислитель в сравнении с получением технического кислорода, а недостатками – значительное уменьшение коэффициента полезного использования природного газа с ростом температуры продуктов сгорания и уменьшение калориметрической температуры горения (менее 1900 °С).

Для расчета принимаем следующие исходные данные:  $t_b = 15 \text{ °С}$  – температура подогрева воздуха;  $t_r = 15 \text{ °С}$  – температура подогрева топлива;  $\alpha = 1,15$  – коэффициент расхода воздуха.

Расход сухого воздуха для горения природного газа при заданном коэффициенте расхода воздуха:

$$V_B = \alpha(1+k)V_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3, \quad (4)$$

где  $k$  – отношение объемных содержаний N<sub>2</sub> и O<sub>2</sub>,  $k = 79/21 = 3,762$ .

Действительный расход воздуха для горения 1 м<sup>3</sup> газа:  $V_B = 10,22, \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

Суммарный объем продуктов сгорания:

$$V_{п.с.} = V_{CO_2} + V_{H_2O} + V_{N_2} + V'_{O_2}, \text{ м}^3/\text{м}^3. \quad (5)$$

Для принятого состава газа объем газов в продуктах сгорания:  $V'_{O_2} = (\alpha - 1)W_{O_2} V_{CO_2} = 0,9469 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $V_{H_2O} = 1,9351 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $V_{N_2} = 8,082 \text{ м}^3/\text{м}^3$ ,  $V'_{O_2} = 0,28 \text{ м}^3/\text{м}^3$ . Суммарный объем продуктов сгорания для принятого состава газа:  $V_{п.с.} = 11,244 \text{ м}^3/\text{м}^3$ .

**Сжигание газа при использовании в качестве окислителя подогретого воздуха.** Для по-

догрева воздуха, подаваемого на горение, представляется возможным использовать рекуперативные горелки с керамическим рекуператором с температурой применения 1300 °С, выпускаемые серийно несколькими фирмами для нагревательных печей. При превышении данной температуры горелки необходимо отключать и изолировать от воздействия высокой температуры. Технически возможно обеспечивать дополнительное охлаждение и работать при более высоких температурах. Достоинством такого способа сжигания природного газа является то, что затраты на подачу воздуха очень незначительны, а подогрев воздуха компенсирует снижение коэффициента полезного использования газа.

Для расчета принимаем следующие исходные данные:  $t_b = 0,65t_{п.с.}$  °С – температура подогрева воздуха ( $t_{п.с.}$  – температура продуктов сгорания удаляемых через рекуператор горелки, °С);  $t_T = 15$  °С – температура подогрева топлива;  $\alpha = 1,15$  – коэффициент расхода воздуха.

Действительный расход воздуха для горения 1 м<sup>3</sup> газа:  $V_B = 10,22$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Объем газов в продуктах сгорания:  $V_{CO_2} = 0,9469$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $V_{H_2O} = 1,9351$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $V_{N_2} = 8,082$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>,  $V'_{O_2} = 0,28$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>. Суммарный объем продуктов сгорания для принятого состава газа:  $V_{п.с.} = 11,244$  м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

**Результаты исследований.** В расчетах использовали нижнюю оценку, т. е. члены уравнения (2), связанные с экономией материалов, а также повышением производительности, были исключены, что дает основание в дальнейшем предполагать, что реальная экономия будет больше, чем расчетная. Кроме того, повышение произво-

дительности электродуговых печей может являться основной целью при использовании природного газа, так как в отличие от интенсификации выплавки путем повышения мощности трансформатора в этом случае практически не наблюдается увеличения угара металла и электродов. Следовательно, повышение производительности однозначно приводит к получению дополнительной прибыли. Применение кислорода для продувки расплава при увеличении производительности, наоборот, может сопровождаться увеличением и уменьшением прибыли, так как происходит дополнительный угар дорогостоящей металлошхты, доля которой в себестоимости стали наибольшая.

Для анализа технико-экономических показателей в расчетах использовали следующие данные: стоимость 1 кВт·ч электрической энергии – 0,133 у. е.; стоимость 1 м<sup>3</sup> природного газа – 0,208; стоимость 1 м<sup>3</sup> технического кислорода – 0,134 у. е.; затраты на установку горелок и газовой обвязки печи принимались в зависимости от емкости печи (например, для печи с годовым выпуском 500 тыс. т стали – 500 тыс. у. е., а для печи с годовым выпуском 100 тыс. т. – 200 тыс. у. е.); температура продуктов сгорания принята на 200 °С выше температуры поверхности металлошхты; коэффициент рекуперации в рекуперативных горелках равен 0,65, т. е. при температуре продуктов сгорания, равной 1000 °С, температура подогретого воздуха равна 650 °С; коэффициент полезного использования электрической энергии  $\eta_{эл} = 0,93$ .

На рис. 1, 2 приведены результаты расчета экономического эффекта при использовании то-

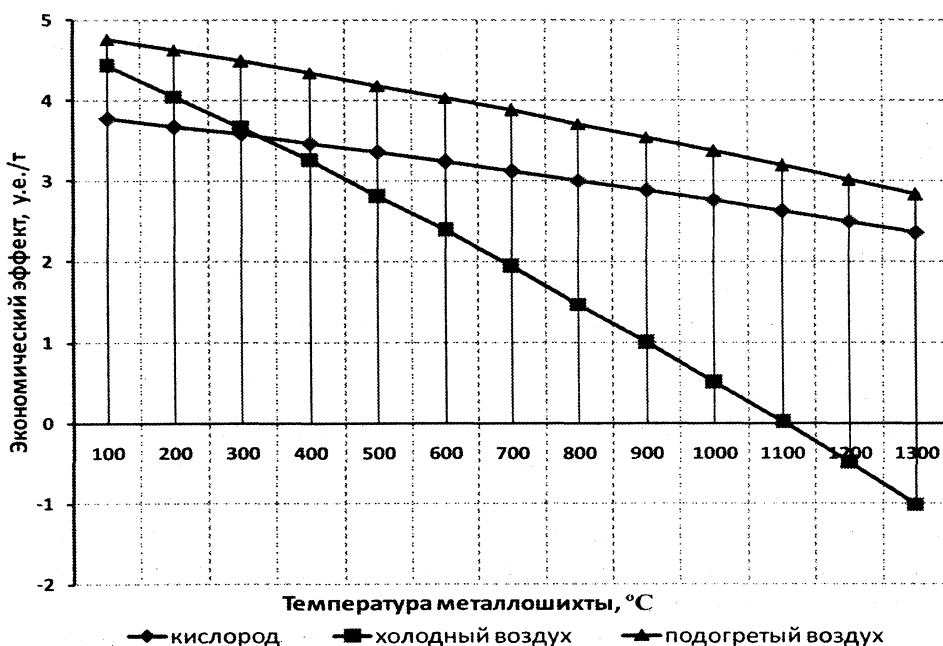


Рис. 1. Экономический эффект применения в электродуговой печи природного газа в количестве 5 м<sup>3</sup>/т

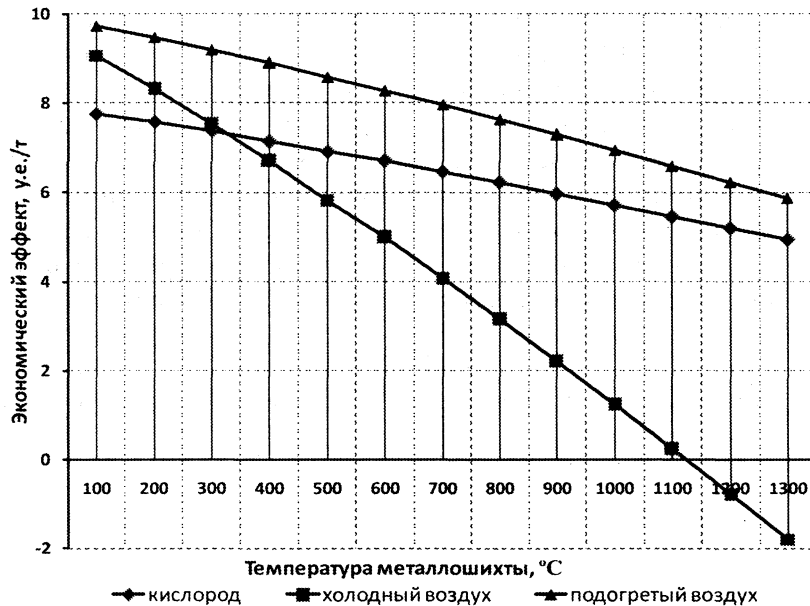


Рис. 2. Экономический эффект применения в электродуговой печи природного газа в количестве 10 м<sup>3</sup>/т

плавных горелок в зависимости от температуры металлошихты.

При использовании кислорода в качестве окислителя при существующих ценах на энергоносители использование природного газа оправдано до температур плавления металлошихты и даже выше, хотя использование горелок при высокой температуре металлошихты означает малое теплопоглощение, а, следовательно, и небольшие расходы газа, при увеличении которых неизбежен рост температуры продуктов сгорания и снижение коэффициента полезного использования природного газа. Таким образом, при использовании горелок необходимо стремиться к тому, чтобы температура продуктов сгорания была близка к температуре металлошихты, т. е. расход природного газа по ходу процесса плавки следует уменьшать, вплоть до исключения при расплавлении металлошихты. То же касается использования в качестве окислителя «холодного» воздуха, но в этом случае горелки следует отключать при достижении температуры металлошихты, равной 1000 °C. Наилучшие результаты может дать использование на электродуговых печах малой емкости рекуперативных горелок.

На рис. 2 приведена зависимость экономического эффекта при использовании топливных горелок от температуры металлошихты при общем расходе природного газа, равном 10 м<sup>3</sup>/т. Как видно из рис. 1, 2, применение рекуперативных горелок дает наибольший экономический эффект, при этом большой объем продуктов сгорания компенсируется подогревом воздуха до высоких температур.

Как было указано выше, ограничение в 10 м<sup>3</sup>/т было выбрано в связи с тем, что до этих значений наблюдается пропорциональное снижение расхода электрической энергии, т. е. полученные результаты можно распространить на диапазон 5–10 м<sup>3</sup>/т. При увеличении расхода газа будет несколько снижаться коэффициент его полезного использования, который зависит от теплообмена продуктов сгорания с металлошихтой.

**Выводы.** Использование для анализа эффективности работы электродуговых печей такого понятия, как коэффициент полезного действия (КПД) печи, не может характеризовать преимущества одной технологии выплавки перед другой. Анализ эффективности работы современных электродуговых печей, имеющих средства интенсификации плавки в виде дополнительных источников энергии, необходимо осуществлять в стоимостном выражении с учетом коэффициентов полезного использования каждого источника. Использование топливно-кислородных горелок может приводить к уменьшению общего КПД печи за счет увеличения потерь с удаляемыми из печи газами, но эффективность работы печи при этом может быть выше. Экономический эффект от замены электрической энергии включением горелок в основном зависит от температуры металлошихты (продуктов сгорания) и параметров теплообмена между газами и металлом, т. е. зависит от периода плавки, а также от стоимости электрической энергии, природного газа, кислорода (воздуха) и капитальных затрат в газовое оборудование.

Проведенные расчеты свидетельствуют о том, что использование природного газа может быть

выгодно в трех рассмотренных случаях при нагреве металлошихты до 1000 – 1100 °С. Использование природного газа при сжигании его в кислороде выгодно и при более высоких температурах, а использование серийно выпускаемых рекуперативных горелок ограничивается температурой в 1300 °С и может быть в дальнейшем адаптировано для использования при более высоких температурах. Использование рекуперативных горелок

может быть перспективно в малотоннажных печах с маломощными трансформаторами при отсутствии технического кислорода, так как система управления должна обеспечивать только включение горелок на полную мощность, уменьшение мощности по ходу плавки в импульсном режиме и отключение горелок при плавлении металлошихты. Воздух при этом подается обычным напорным вентилятором из цеха.

### Литература

1. Фалькенрек У., Вайшедель В. Производство стали с преимущественным использованием первичных энергоносителей // Черные металлы. 2007. С. 33–36.
2. Экономия электроэнергии в дуговых сталеплавильных печах / Ю. Н. Тулуевский, И. Ю. Зинуров, А. Н. Попов, В. С. Галян. М., 1987.