

Оценка показателей эффективности автономной системы энергообеспечения электросталеплавильного производства

Бушуев А. Н., инж.

Орский гуманитарно-технологический институт

Кулагин А. Ю., канд. техн. наук

ОАО “Орскнефтеоргсинтез”

Картавцев С. В., доктор техн. наук

Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова

Рассмотрена математическая модель индивидуальной системы энергообеспечения электросталеплавильного производства на базе парогазовых технологий с включением в процесс генерации энергии промежуточного звена, обеспечивающего предварительный подогрев кускового лома выхлопными газами газовой турбины. Дана оценка основных показателей и временного характера их изменения. Установлено оптимальное распределение электрической мощности между газотурбинной и паротурбинной частями системы в зависимости от тепловой нагрузки.

Ключевые слова: газотурбинная установка, парогазовая установка, дуговая сталеплавильная печь, предварительный подогрев металлической шихты, электросталеплавильное производство.

Электросталеплавильное производство является одним из ведущих в промышленности по показателю энергоёмкости технологического процесса. Высокий уровень и дальнейший рост производства электростали, большая энергоёмкость продукции и потребность в сложном энергообеспечении технологического процесса, заключающаяся в одновременном подводе тепловой и электрической энергии и вспомогательных энергоресурсов, свидетельствуют о необходимости обеспечения предельной эффективности энергоснабжения данного производства [1 – 4].

Теоретически электроэнергия для снабжения электросталеплавильного производства может быть выработана как на традиционных, так и на нетрадиционных энергетических источниках. Однако из-за малой распространённости и низких единичных мощностей нетрадиционных источников [5] в данной статье рассмотрим только традиционные тепловые электрогенерирующие системы на базе газотурбинного и паротурбинного циклов [6, 7].

Предлагается автономная система энергообеспечения, представляющая собой энергетический источник на базе парогазового цикла, обеспечивающий электросталеплавильное производство электрической и тепловой энергией, вносимой в технологический процесс выплавки стали за счет предварительного подогрева лома перед плавкой. Электросталеплавильное производство как потребитель энергии способно частично утилизировать теплоту вы-

хлопных газов газотурбинной установки (ГТУ) в технологическом процессе выплавки стали путем предварительного нагрева металлической шихты в системе подогрева (СПШ) перед загрузкой в дуговую сталеплавильную печь (ДСП) [1]. Такой прием повышения эффективности системы энергообеспечения возможен в случае близкого расположения источника к электросталеплавильному цеху предприятия [5].

На рис. 1 приведена принципиальная схема рассматриваемой системы, в которой ГТУ выступает в роли источника электрической и тепловой энергии. Уходящие из турбины газы с температурой 450 – 600 °С (при расчетах — 524 °С) направляются в теплоизолированный канал, внутрь которого засыпан слой металлического лома, и далее подаются в котел-утилизатор (КУ). Вырабатываемый в КУ пар подается в ПТУ для генерации электроэнергии. В качестве канала может использоваться загрузочная бадья цилиндрического сечения, где обеспечивается теплообмен между слоем металлического лома и потоком уходящих газов газовой турбины.

Разработка математической модели энергетической системы ГТУ — СПШ — КУ позволяет решить следующие задачи:

установить оптимальное распределение электрической мощности между газотурбинной и паротурбинной частями энергетического источника;

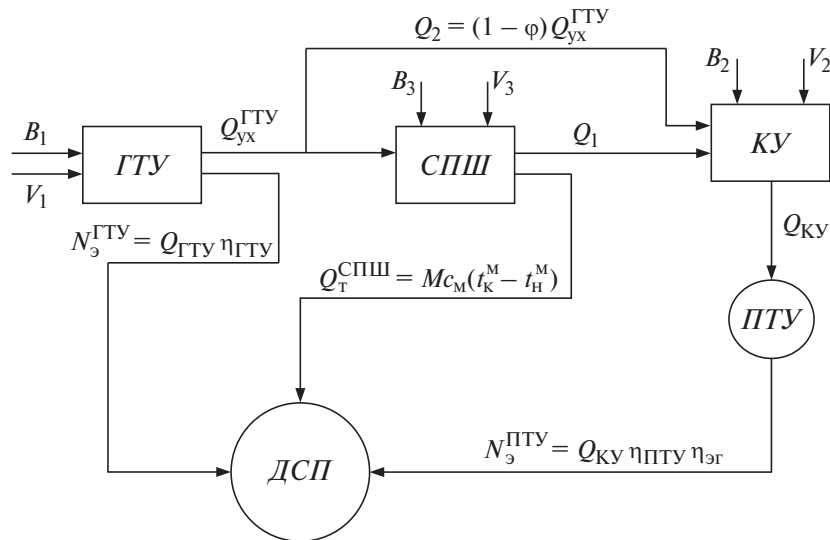


Рис. 1. Принципиальная технологическая схема системы энергообеспечения электросталеплавильного производства:

$B_1 - B_3$ и $V_1 - V_3$ — подача топлива (или различных топлив) и требуемого количества воздуха к основным узлам системы; $N_3^{\text{ГТУ}}$ и $N_3^{\text{ПТУ}}$ — электрические мощности газотурбинной и паротурбинной частей системы; $Q_{\text{КУ}}$ — теплопроизводительность котла-утилизатора; $Q_{\text{T}}^{\text{СПШ}}$ — теплота, вносимая в технологический процесс выплавки стали путем предварительного нагрева шихты; $Q_{\text{yx}}^{\text{ГТУ}}$ — теплосодержание газового потока за газовой турбиной; Q_1 — теплота, вносимая в КУ газами после СПШ (определяется температурой, составом и горением примесей в ломе); Q_2 — теплота, вносимая в КУ непосредственно выхлопными газами ГТУ; φ — доля отбора выхлопных газов турбины на подогрев металлического лома; t_n^M, t_k^M — начальная и конечная температура металлошихты при нагреве

определить коэффициент распределения между долями отходящих газов за ГТУ, направляемых на подогрев металлического лома и непосредственно в КУ;

выявить взаимосвязь между тепловой и электрической производительностью системы.

При решении поставленных задач требуется учет дополнительных газов в промежуточном звене между ГТУ и КУ — в СПШ, поскольку образование этих газов, особенно токсичных соединений (диоксинов и бензапирена), приводит к дополнительным энергетическим затратам и изменению химического состава смеси [8 – 10].

Расход топлива (природного газа) $m(\tau)$, подаваемого на дожигание в КУ с целью повышения температуры механической смеси газов в котле до задаваемой конечной температуры факела T (без учета теплообмена в топочной камере), может быть рассчитан через тепловой баланс, представляющий собой равенство суммы энергий поступающих продуктов на сжигание и энергии горячей смеси в факеле [8, 11, 12]:

$$\begin{aligned} m(\tau)[Q_{\text{H}} - (1+\nu)I(\tau) + \nu I_{\nu}] = & \\ = [M_{\text{СПШ}}(\tau) + M_{\text{пр}}(\tau) + M_{\text{ув}}(\tau)]I(\tau) - & \\ - M_{\text{СПШ}}(\tau)I_{\text{СПШ}}(\tau) - M_{\text{пр}}(\tau)I_{\text{пр}}(\tau) - & \\ - M_{\text{ув}}(\tau)I_{\text{ув}}(\tau) - Q_{\text{доп}}(\tau) - \nu m_{\text{п.г}}(\tau)[(I(\tau) - I_{\nu}) - & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} - M_{\text{ув}}(\tau)Q_{\text{ув}} - M_{\text{пр}}(\tau)Q_{\text{пр}} - & \\ - M_{\text{СПШ}}(\tau)I_{\text{gas}}(1-\varphi), & \end{aligned} \quad (1)$$

где $I(\tau)$ — функциональная зависимость энтальпии продуктов сгорания (рабочего тела) в котле от времени τ при заданной температуре T , кДж/(кг · °С); ν — масса воздуха, требуемая при сжигании 1 кг природного газа; I_{ν} — энтальпия воздуха, подаваемого на дожигание топлива в котел; $M_{\text{СПШ}}(\tau)$, $M_{\text{ув}}(\tau)$, $M_{\text{пр}}(\tau)$ и $I_{\text{СПШ}}(\tau)$, $I_{\text{ув}}(\tau)$, $I_{\text{пр}}(\tau)$ — функциональные зависимости от времени массового расхода и энтальпий чистого рабочего газа соответственно после системы подогрева лома, горючих углеводородных примесей и прочих горючих и негорючих примесей в потоке газа, кг/с; $m_{\text{п.г}}(\tau)$ — функция, отображающая максимально возможное количество топлива (природного газа), сжигаемого в котле только за счет кислорода, содержащегося в рабочем потоке газа, кг/с; I_{gas} — энтальпия выхлопных газов газовой турбины; $Q_{\text{доп}}(\tau)$ — дополнительно выделяемая теплота в технологическом процессе за счет горения масел в ломе, кДж/с; Q_{H} — низшая теплота сгорания топлива (природного газа), кДж/кг.

Функция суммарного массового расхода смеси газов (рабочего тела) $M(\tau)$ в топке КУ [11 – 13]:

при $m(\tau) < m_{п.г}(\tau)$

$$M(\tau) = M'(\tau) + m(\tau);$$

при $m(\tau) \geq m_{п.г}$

$$M(\tau) = M'(\tau) + [m(\tau) - m_{п.г}(\tau)](1 + \nu),$$

где $M'(\tau)$ — суммарная масса газов, поступающих в котел на дожигание до момента примешивания топлива к потоку.

В связи с периодическим изменением количественно-качественных показателей (расхода и состава) газовой смеси, поступающей после системы подогрева лома, тепловая мощность котла и расход топлива $m(\tau)$ носят резкопеременный характер. С целью стабилизации тепловой производительности необходимо дополнительный подвод топлива в топку котла, который может быть определен двумя способами:

по постоянству вводимой в КУ теплоты. Рассматриваемый вариант стабилизации нецелесообразен, поскольку стабилизация вводимой в котел теплоты $Q_{КУ}''$ не приводит к постоянству тепловых потерь $Q_{yx}(\tau)$ из-за переменности массы и состава рабочего газа в КУ, а следовательно, полностью не стабилизируется теплопроизводительность котла $Q_{ПТУ}(\tau) = Q_{КУ}'' - Q_{пот}(\tau)$. Колебания данного показателя, как правило, составляют 2 – 5 %;

по постоянству теплопроизводительности котла (паротурбинной части системы). Функциональная зависимость требуемого расхода дополнительного топлива $m'(\tau)$ в конечном виде представляется следующим образом [13, 14]:

$$m'(\tau) = \frac{N_{эл} - N_{э}^{ГТУ} - M(\tau)I(\tau)w(1-a) + M(\tau)I_{yx}(\tau)}{\eta_{ПТУ}\eta_{э} Q_{н} - aQ_{н} + I_{yx}(\tau)}, \quad (2)$$

где $N_{эл}$ — удельная электрическая мощность, подводимая к печи, (кВт/т); a — коэффициент, учитывающий долю тепловых потерь котла через внешнюю обмуровку; w — поправочный коэффициент, учитывающий изменение химического состава рабочего газа в котле после дополнительного дожигания топлива массой $m'(\tau)$; $\eta_{ПТУ}$ — КПД паротурбинного цикла; $\eta_{э}$ — КПД электрогенератора.

Стабилизация работы котла по этому принципу приводит к выравниванию суммарной мощности системы энергообеспечения до постоянной величины $N_{эл}$. Однако в дан-

ном случае стабилизирующая подача может принимать значения, недостаточные для достижения задаваемой температуры T . Поскольку уменьшение температуры в топке КУ ниже 1250 °С недопустимо в связи с условием полной деструкции диоксинов и фуранов в потоке газа [15], необходим дополнительный контроль отклонения температуры при данном способе регулирования.

Общий КПД системы энергообеспечения может быть определен несколькими способами:

1. При расчете с учетом теплосодержания подогреваемого лома

$$\eta_1(\tau) = \{N_{э}^{ГТУ} + N_{э}^{ПТУ}(\tau) + M_{м}c_{м}[t_{м}(\tau) + \Delta t_{м}(\tau) - t_{н}^M](1 - k_{п})\} / \{[B_1 + B_2(\tau)]Q_{н}\}, \quad (3)$$

где $M_{м}$ — единичная масса подогреваемого лома (1 т); $c_{м}$ — массовая теплоемкость стали; $t_{м}(\tau)$ — функциональная зависимость изменения температуры подогреваемого лома во времени; $B_2(\tau) = m(\tau) + m'(\tau)$ — функция суммарной подачи дополнительного топлива в КУ, кг/с.

Коэффициент $k_{п}$ учитывает тепловые потери при нагреве лома и его транспортировке к печи и имеет переменное значение, определяемое в зависимости от дополнительного тепловыделения $Q_{доп}(\tau)$, которое может быть учтено либо через показатель $t_{м}(\tau)$, либо путем включения в тепловой баланс КУ, что несколько снижает среднее значение функции $m'(\tau)$ в выражении (2). Использование в модели обоих вариантов учета приводит к практически полному совпадению результатов.

2. Возможен перерасчет КПД через разность энтальпий рабочего (греющего) газа до и после системы подогрева лома по формуле

$$\eta_2(\tau) = \{N_{э}^{ГТУ}(M_{т}) + N_{э}^{ПТУ}(\tau) + G(1 - k_{п}) \times [I_{gas} - I_{СПШ}(\tau)]\} / \{[B_1 + B_2(\tau)]Q_{н}\}. \quad (4)$$

Графики изменения основных показателей системы при стабилизации мощности по выражению (2) представлены на рис. 2.

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

увеличение доли ϕ при постоянном G , т.е. уменьшение доли ГТУ в выработке электроэнергии (кривые 1 – 4), приводит к постепенному снижению КПД системы и увеличению подачи топлива $B_2(\tau)$;

возрастание доли горючих примесей (масел) в ломе способствует незначительному

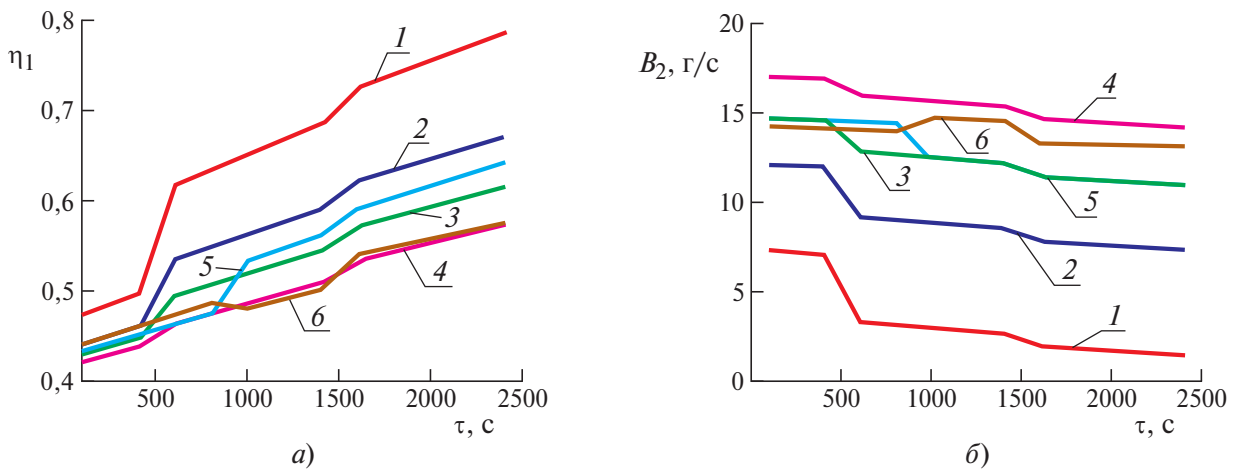


Рис. 2. Графики функций основных показателей системы энергообеспечения:

а — КПД системы энергообеспечения, полученные по зависимости (3); б — суммарная подача дополнительного топлива на паротурбинную часть системы; 1 — $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 1,5\text{ кг/т}$, $\varphi = 0,5$; 2 — $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 1,5\text{ кг/т}$, $\varphi = 0,65$; 3 — $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 1,5\text{ кг/т}$, $\varphi = 0,8$; 4 — $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 1,5\text{ кг/т}$, $\varphi = 1,0$; 5 — $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 3,0\text{ кг/т}$, $\varphi = 0,8$; 6 — $T = 1500\text{ }^\circ\text{C}$, $q = 3,0\text{ кг/т}$, $\varphi = 0,8$

повышению КПД системы (кривые 3 и 5) за счет дополнительной выработки тепловой энергии;

повышение требуемой температуры в топке КУ (кривые 5 и 6) ведет к снижению КПД за счет увеличения необходимой подачи топлива на дожигание в котел.

Оптимальная развиваемая мощность ГТУ, при которой возможно осуществление регулирования мощности системы без отрицательных значений функции (2), определяется через заданный требуемый расход газов на нагрев лома G , или фактически определяется показатель φ при требуемом расходе G выхлопных газов, подаваемых на нагрев лома. Данный показатель находится через экстремум функции (максимум или минимум в зависимости от выбранного способа регулирования паротурбинной части) $Q_{ПТУ}(\tau)$ следующим образом:

$$m'(\tau) = \frac{Q_{min/max}^{ПТУ} - M(\tau)I(\tau)w(1-a) + M(\tau)I_{yx}(\tau)}{Q_H - aQ_H + I_{yx}(\tau)}, \quad (5)$$

где $Q_{min/max}^{ПТУ}$ — минимальная или максимальная (в зависимости от способа регулирования) теплопроизводительность котла $Q_{ПТУ}(\tau)$, кДж/с.

В таблице приведены среднеинтегральные значения функций основных показателей системы для обоих вариантов регулирования системы по выражению (5) и указано максимальное отклонение температуры от заданного значения при тепловом регулировании мощности.

Как следует из полученных результатов, доля электрической мощности ГТУ в системе при регулировании по минимуму функции $Q_{ПТУ}(\tau)$ практически не зависит от содержания горючих масел в ломе и незначительно снижается при повышении задаваемой температуры в топке КУ. При регулировании мощности по максимуму $Q_{ПТУ}(\tau)$ колебания показателя более значительны. Можно также заметить увеличение амплитуды колебания (наибольшего отклонения) ΔT_{max} температуры в топке КУ от задаваемого значения как с увеличением температуры T , так и с повышением примесей масел в ломе q . При регулировании мощности по нижней отметке регулирующая подача $M_{T,рег}^{ПТУ}$ имеет отрицательные значения, что приводит к недогреву рабочих газов в топке котла ($\Delta T_{max} < 0$).

По результатам математических расчетов может быть рекомендован режим работы системы энергообеспечения при подаче греющего газа $G = 0,35\text{ кг/с}$ и температуре рабочего тела в топке КУ $T = 1350\text{ }^\circ\text{C}$ при условии регулирования мощности ПТУ по минимуму функции. В данном режиме обеспечиваются допустимое колебание температуры в топке КУ, не опускающееся ниже критического значения $1250\text{ }^\circ\text{C}$ [15], и оптимальное распределение электрических мощностей (доля ГТУ в суммарной выработке электроэнергии составляет 0,381). Полный КПД системы даже без наличия дополнительных горючих примесей (масел) достигает 55 %. При суммарной мощности системы 480 кВт доля отбора вы-

G , кг/с	T , °C	q , кг/т	φ	$\eta_{\text{КУ}}$, %	η_1 , %	η_2 , %	B_1 , г/с	B_2 , г/с	$M_{\text{т.рег.}}^{\text{ПТУ}}$, г/с	$N_3^{\text{ПТУ}}$, кВт	$N_3^{\text{ПТУ}}$, кВт	$\frac{N_3^{\text{ПТУ}}}{N_3^{\text{ПТУ}}}$	ΔT_{max} , °C
Регулирование мощности по минимуму теплопроизводительности													
0,25	1350	0	0,495	90,73	55,25	54,43	10,097	9,749	-0,0878	182,957	297,009	0,3812	-8,4
		1,5	0,495	90,69	56,11	54,84	10,098	10,294	-0,0892	182,974	297,037	0,3812	-13,9
		3	0,494	90,67	56,41	54,85	10,135	10,688	-0,2414	183,646	296,344	0,3826	-9,7
	1500	0	0,552	91,50	48,02	47,32	9,061	13,771	-0,7447	164,184	315,820	0,3420	-33,1
		1,5	0,552	91,07	50,03	49,05	9,060	13,650	-1,8685	164,174	315,804	0,3420	-131,7
		3	0,542	90,53	51,79	50,63	9,236	13,155	-3,1871	167,346	312,654	0,3486	-132,5
0,35	1350	0	0,693	90,72	55,04	53,80	10,102	10,285	-0,0974	183,050	297,342	0,3810	-7,1
		1,5	0,694	90,56	56,37	54,98	10,094	10,486	-0,4391	182,897	297,095	0,3810	-66,1
		3	0,694	90,39	58,06	55,84	10,097	10,734	-0,8038	182,958	297,058	0,3812	-64,6
	1500	0	0,792	91,50	48,59	47,54	8,840	14,198	-0,7499	160,173	319,821	0,3337	-54,3
		1,5	0,792	91,14	50,63	49,22	8,840	14,096	-1,7049	160,173	319,821	0,3337	-174,4
		3	0,788	90,66	52,65	50,92	8,889	13,860	-2,9675	161,054	318,945	0,3355	-174,7
Регулирование мощности по максимуму теплопроизводительности													
0,25	1350	0	0,500	90,85	55,03	54,21	9,999	9,929	0,1580	181,183	298,819	0,3775	2,6
		1,5	0,512	91,05	55,12	54,21	9,774	10,844	0,5777	177,099	302,894	0,3690	23,5
		3	0,506	90,96	55,89	54,35	9,885	11,120	0,3588	176,110	300,856	0,3692	23,2
	1500	0	0,589	92,06	47,62	46,93	8,495	14,525	0,6610	153,928	326,069	0,3207	26,7
		1,5	0,761	93,36	47,97	47,31	6,567	16,974	4,3086	118,992	361,022	0,2479	140,6
		3	0,740	92,87	49,95	48,83	6,754	16,459	2,9210	122,390	357,598	0,2550	141,6
0,35	1350	0	0,700	90,83	54,84	53,61	10,007	10,438	0,1187	181,329	298,674	0,3778	2,1
		1,5	0,804	92,09	53,57	52,29	8,714	12,899	2,8980	157,891	322,125	0,3290	113,3
		3	0,800	91,83	55,52	53,47	8,755	12,955	2,3097	158,641	321,365	0,3305	98,5
	1500	0	0,871	92,27	48,03	46,99	8,039	15,266	1,2359	145,656	334,347	0,3035	41,1
		1,5	1,0	93,93	47,55	46,65	7,002	20,768	7,0577	126,881	433,456	0,2264	175,2
		3	1,0	93,55	49,04	48,05	7,002	20,630	5,7717	126,881	433,456	0,2264	175,2

хлопных газов ГТУ на нагрев лома составляет примерно 0,693.

В заключение следует отметить, что звено СПШ в системе энергообеспечения играет определяющую роль в показателях общей эффективности. Протекание процесса теплообмена, зависящего от многих второстепенных показателей (порозность засыпки, химический состав греющих газов, средний диаметр кусков лома), непосредственно определяет функцию теплоты $Q_{ух}^{СПШ}(\tau)$, подаваемой в котел-утилизатор. Изменение показателей, влияющих на теплообмен в СПШ, может привести к колебанию параметров системы на 10 – 30 %. Результаты, приведенные на рис. 2 и в таблице, получены для режима работы системы с кусками лома определяющего размера 0,35 м и при теплоте сгорания масел 30 МДж/кг. Все расчеты, выполненные по данной математической модели, соответствуют единичной массе засыпки металлического лома 1 т.

Нужно также отметить, что КПД КУ определяется через соотношение поступающего и уходящего тепловых потоков при переменных расходе и химическом составе рабочего газа. При этом допускается постоянство температуры уходящих газов за КУ при изменении соотношения газов за СПШ и продуктов сгорания собственно КУ. Такое допущение нуждается в проверке с привлечением данных о конструктивных особенностях конкретного котла, предлагаемого к использованию в системе.

Переменное соотношение потоков газа за СПШ, добавочного топлива и воздуха в КУ влияет на теплообменные процессы как в радиационных, так и в конвективных поверхностях. Теплообмен в топочной камере заданной конструкции зависит от температуры топочных газов и степени их черноты, что в свою очередь определяется соотношением вышеуказанных входящих потоков в КУ. Теплообмен в конвективной части КУ зависит от скорости продуктов сгорания и их температуры, которые в рассматриваемой модели также будут переменными.

Список литературы

1. **Поволоцкий Д. Я., Роцин В. Е., Мальков Н. В.** Электрометаллургия стали и ферросплавов: Учеб. для вузов. — М.: Metallurgia, 1995.
2. **Совершенствование** условий энергообеспечения современного электросталеплавильного процесса / И. В. Деревянченко, О. Л. Кучеренко, Э. А. Шумахер и др. — Сталь, 2005, № 1.
3. **Комплексные** решения проблем энергосбережения на металлургических предприятиях / Ю. П. Журавлев, Г. В. Никифоров, Б. И. Заславец, В. К. Олейников. — Главный энергетик, 2011, № 3.
4. **Сафонов В. М., Смирнов А. Н.** Современный уровень и будущее электросталеплавильного производства. — Сталь, 2009, № 1.
5. **Бушуев А. Н.** Комплексная оценка альтернативной, атомной и гидроэнергетики при индивидуальном энергообеспечении электросталеплавильного производства. — Вестник КГЭУ, 2013, № 1 (16).
6. **Бушуев А. Н.** Газопоршневые и газотурбинные технологии при индивидуальном энергообеспечении электросталеплавильного производства. — Промышленная энергетика, 2013, № 5.
7. **Сравнительная** оценка газопоршневых, паротурбинных и паропоршневых электростанций / В. С. Дубинин, К. М. Лаврухин, С. О. Шкарупа и др. — Промышленная энергетика, 2008, № 8.
8. **Бушуев А. Н., Шабловская Е. Б.** Энергетическая оценка дожига вредных выбросов, образуемых при предварительном подогреве загрязненного металлического лома газами умеренной температуры в электросталеплавильном производстве. — Вестник Казанского технологического университета, 2013, № 15.
9. **Теплотехника** доменного процесса / Б. И. Китаев, Ю. Г. Ярошенко, Е. Л. Суханов и др. — М.: Metallurgia, 1978.
10. **Теплоэнергетика** металлургических заводов: Учеб. для вузов / Ю. И. Розенгарт, З. Л. Мурадова, Б. З. Теверовский и др. — М.: Metallurgia, 1985.
11. **Щетинков Е. С.** Физика горения газов. — М.: Наука, 1965.
12. **Хзмалян Д. М., Каган Я. А.** Теория горения и топочные устройства: Учеб. пособ. для вузов. — М.: Энергия, 1976.
13. **Александров А. А.** Термодинамические основы циклов теплоэнергетических установок утилизационного типа: Методическое пособие по курсу “Энергетические установки”. — М.: Издательство МЭИ, 2001.
14. **Цанев С. В., Буров В. Д., Ремезов А. Н.** Газотурбинные и парогазовые установки тепловых электростанций: Учеб. пособие для вузов. — М.: Издательство МЭИ, 2009.
15. **Юдин А. Г., Шульц Л. А.** Условия образования и полной деструкции диоксинов и фуранов при сжигании галогеносодержащих отходов. Ч. 1. — Экология и промышленность, 2009, № 9.