

10. Применение системы RCB для вдувания кислорода в электродуговые печи / П. Моксон [и др.] // Черные металлы, апрель 2004. – С. 89–92.

11. Brhel J. The JetBOX™ burner/injector system for EAF steelmaking / J. Brhel, Ch. Farmer, V. Shver // Millennium steel. – 2006. – PP. 87–91.

12. Warty, S.K. Praxair's CoJet® gas injection system – delivering benefits, and gaining useful knowledge for future enhancements / S.K. Warty, P.C. Mathur // Electric Furnace Conference Proceedings, ISS (Warrendale, PA). – 2002.

13. 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.

14. Оценка эффективности работы электродуговых печей при использовании инжекционной системы КТ / «Черметинформация» // Бюллетень «Черная металлургия», 2004. – № 11. – С. 53–59.

15. Данилов, Е.В. Оптимизация работы дуговых сталеплавильных печей / Е.В. Данилов // Металлург. – 2003. – № 7. – С. 60.

16. Национальный Интернет-портал РФ [Электронный ресурс]. <http://www.jettechnologies.ru> (дата обращения: 10.09.2017).

УДК 662.951.2.006.354

**И.А. ТРУСОВА, д-р техн. наук (БНТУ),
С.М. КАБИШОВ, канд. техн. наук (ГКНТ РБ),
П.Э.РАТНИКОВ, канд. техн. наук (БНТУ)**

ОЦЕНКА ЭКОНОМИИ ТОПЛИВА ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕКУПЕРАТИВНЫХ ГОРЕЛОК В НАГРЕВАТЕЛЬНЫХ ПЕЧАХ

В настоящее время при проектировании и модернизации действующих нагревательных и термических печей, функционирующих в машиностроительном производстве, широкое распространение получают рекуперативные и регенеративные горелки. В ряде работ, например [1–6], отмечается, что их использование позволяет

существенно повысить предварительный нагрев воздуха по сравнению с применением традиционного рекуператора, при этом экономия топлива составляет около 50 % и может достигать в отдельных случаях 60–70 %. Начиная с 80-х годов прошлого столетия, рекуперативные и регенеративные горелки использовались в печах различного конструктивного типа и назначения, в частности, известны примеры их применения не только в машиностроении, но и в печах металлургического производства (нагревательных колодцах, методических, камерных нагревательных и термических печах, печах для плавления алюминия), стекольных плавильных печах и др. [3].

У рекуперативных горелок относительный предварительный нагрев воздуха находится в диапазоне от 0,5 до 0,8, что выше, чем у системы с центральным рекуператором ($< 0,5$) [4]. Температура подогрева воздуха для таких горелок составляет 700 °С и более, в регенеративных горелках подогрев поступающего воздуха горения происходит до температур на 100–150 °С меньше, чем рабочая температура печи. За счет того, что часть дымовых газов (около 80 %) удаляется непосредственно через рекуперативную горелку, оставшаяся часть потока отходящего газа может использоваться для предварительного нагрева продукции. Путем комбинации предварительного нагрева воздуха и продукции в потоке отходящего газа возможно достижение КПД даже на уровне 90 % [4].

Сегодня известны рекуперативные и регенеративные горелки различных производителей, в том числе и наиболее распространенные в промышленности горелки фирм WS, «Kromshroder», IBS, Bloom Ingeneering и др. Недостатком высокотемпературного подогрева воздуха является образование оксидов азота, являющихся основными загрязнителями при сжигании топлива, что напрямую связано с температурой факела. В связи с этим большое внимание уделяется разработке конструкций горелок и технологических приемов, обеспечивающих пониженное образование оксидов азота (беспламенное горение или режим FLOX, ступенчатое сжигание). В последнее время ведутся разработки современных горелочных устройств рекуперативного и регенеративного типа в институтах и научных учреждениях стран СНГ. Так, во ВНИИМТ разработана конструкция скоростной рекуперативной горелки ГСР-150, которая может работать в режиме как плавного, так и двухступенчатого

(импульсного) автоматического управления тепловой мощностью [7]. Сравнение параметров горелки ГСР-150 с горелкой Resumat M250 (Германия, фирма WS) показало, что потери теплоты печью на > 10 % ниже, что означает экономию топлива на те же > 10 %. Кроме того, расход воздуха на эжекцию продуктов сгорания после теплообменника, имеющих сравнительно низкую температуру из-за высокой температуры подогрева воздуха, уменьшается в горелке ГСР-150, поскольку отпадает необходимость в их значительном разбавлении воздухом для снижения температуры при дальнейшей транспортировке по металлическим дымопроводам. Соотношение между расходом воздуха на эжекцию и горение в горелке ГСР-150 составляет 0,9, тогда как в горелках Rekumat M250 оно заметно больше (1,7–2), что требует дополнительных затрат электроэнергии.

В работе [1] отмечено, что рекуперативные горелки могут конкурировать с классическим способом утилизации теплоты далеко не всегда, и в каждом конкретном случае необходим сравнительный анализ и оценка снижения расхода топлива. Кроме того, при выборе горелочных устройств необходимо учитывать также капиталовложения и эксплуатационные затраты [6]. Вместе с тем в ряде случаев необходим приближенный расчет экономии топлива с целью оценки целесообразности дальнейших комплексных расчетов, учитывающих особенности выбора рекуперативных или регенеративных горелок.

С этой целью ниже приведена последовательность расчета экономии топлива на примере нагревательных печей машиностроительного производства. В основу расчета положено традиционное уравнение теплового баланса, которое запишется в виде

$$BQ_i^{\delta} \eta_{\dot{\epsilon},\dot{o}} + Q_{\dot{y}\dot{\epsilon}\dot{c}} = Q_{\dot{i}\dot{a}\dot{o}} + \sum Q_{\dot{i}\dot{o}} \quad , \quad (1)$$

где B – расход топлива; $Q_{\text{экз}}$ – теплота экзотермических реакций; $Q_{\text{мет}}$ – теплота на нагрев металла; $\sum Q_{\dot{i}\dot{o}}$ – потери теплоты; $\eta_{\text{и.т}}$ – коэффициент использования теплоты топлива, показывающий, какая доля теплоты топлива поглощается в рабочем пространстве.

Коэффициент использования теплоты топлива определяется по выражению

$$\eta_{\text{э.д}} = \frac{i_0 + i_{\text{а}} - i_{\text{а.дд}}}{i_0}, \quad (2)$$

где i_0 – пирометрическая характеристика топлива ($i_0 = \frac{Q_i^{\delta}}{V_{\text{а.дд}}}$); $i_{\text{в}}$, $i_{\text{д}}$, – энтальпия подогретого воздуха и дымовых газов, уходящих из рабочего пространства печи, (кДж/м³).

Последовательность расчета включает:

1. Предварительный выбор типа горелочных устройств.
2. Определение температуры газов в зонах печи (на основании расчета нагрева металла или по производственным данным).
3. Исходя из технических характеристик выбранного типа горелок определение температуры подогрева воздуха в зависимости от температуры рабочего пространства печи в каждой из технологических зон.
4. Определение энтальпии подогретого воздуха и энтальпии продуктов сгорания для каждой из зон печи в соответствии с заданной температурой газов и расчет коэффициента использования теплоты топлива по формуле (2).
5. Определение теплоты экзотермических реакций и тепловых потерь на основании зонального теплового баланса печи.
6. Определение расхода топлива для каждой из зон печи с использованием уравнения (1) и нахождение суммарного расхода топлива для печи.
7. Составление теплового баланса.
8. Выбор и уточнение мощности и количества горелок на основании зональных балансов.
9. Выбор расположения горелочных устройств.

В качестве примера рассмотрена полуметодическая нагревательная печь производительностью 1,5 т/ч для нагрева заготовок из шарикоподшипниковой стали. По длине печь разбита на две зоны (1-ая зона – 2,78 м; 2-ая зона – 1,32 м), средняя температура согласно режиму нагрева в 1-ой зоне 935 °С; во 2-ой – 1100 °С. Принимаем также, что 80 % дымовых газов проходят через горелки, 20 % дымовых газов удаляются из первой зоны печи с температурой 820 °С, из второй зоны печи – с температурой 1120 °С.

В качестве горелочных устройств выбраны рекуперативные горелки RECUMAT M250 и RECUMAT M200. В соответствии с их техническими характеристиками, представленными производителем, с учетом температуры газов в рабочем пространстве печи принимаем температуру подогрева воздуха для первой зоны 550 °С, для второй – 660 °С. Соответственно в первой зоне энтальпия воздуха при 550 °С составляет 743,55 кДж/м³; энтальпия дымовых газов, удаляемых через горелку при температуре 935 °С, равна 1421 кДж/м³, а газов, покидающих рабочее пространство через окно посадки заготовок при температуре 820 °С – 1224,3 кДж/м³. Аналогично определим для второй зоны: энтальпия воздуха при 660 °С – 901,3 кДж/м³, дымовых газов при температуре 1100 °С – 1701,4 кДж/м³, газов, покидающих рабочее пространство через окно выдачи заготовок при температуре 1120 С – 1735,8 кДж/м³.

Определим коэффициент использования теплоты топлива для каждой из зон:

$$\eta_{\text{э.д}}^1 = \frac{3252,06 + 743,55 - 0,8 \cdot 1421 - 0,2 \cdot 1224,3}{3251,4} = 0,804 ;$$

$$\eta_{\text{э.д}}^2 = \frac{3252,06 + 901,3 - 0,8 \cdot 1701,4 - 0,2 \cdot 1735,8}{3251,4} = 0,752 .$$

Находим теплоту на нагрев металла с учетом производительности 1,5 т/ч. Для первой зоны (зоны предварительного нагрева) принимаем в соответствии с расчетом нагрева металла (или по производственным данным) температуру заготовок в конце зоны 880 °С. Энтальпия стали при 880 °С $i_{\text{мет}} = 598,8$ кДж/кг. Во второй зоне нагрев металла осуществляется до температуры 1050 °С. Энтальпия стали ШХ15СГ при 1050 °С $i_{\text{мет}} = 714,3$ кДж/кг. Тогда расход теплоты на нагрев металла в зонах:

$$Q_{\text{н.д}}^{(1)} = 1500 \cdot 598,8 / 3600 = 249,36 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{н.д}}^{(2)} = 1500 \cdot (714,3 - 598,8) / 3600 = 47,71 \text{ кВт}.$$

Определяем тепловые потери, которые в конкретном случае составляют:

$$\sum Q_{\text{н0}} = 1,1(Q_{\text{эцэ}} + \sum Q_{\text{іê}}).$$

Неучтенные потери теплоты принимаются равными 10 % от суммы затрат на излучение и через ограждающие конструкции.

Потери через ограждающие конструкции $Q_{\text{о.к}}$ определяются на основании теплового баланса. Для упрощения расчетов примем, что средняя температура поверхности печи равна около 50 °С, коэффициент теплоотдачи от поверхности печи в окружающую среду 10 Вт/(м²·К), площадь ограждающих конструкций печи 34,82 м².

Тогда

$$Q_{\text{о.к}} = 34,82 \cdot 10 (50 - 20) = 3,4 \text{ кВт.}$$

Так как печь разделена на две зоны – зону предварительного нагрева и зону нагрева и томления, будем считать, что потери через ограждающие конструкции пропорциональны длинам зон:

$$Q_{\text{іê}}^1 = 3,4 \cdot 2,82 / 4,1 = 2,33 \text{ кВт;}$$

$$Q_{\text{іê}}^2 = 3,4 \cdot 1,28 / 4,1 = 0,91 \text{ кВт.}$$

Потери теплоты излучением в зонах печи:

$$Q_{\text{эцэ}}^1 = 5,76 \cdot 0,38(1103/100)^4 \cdot 0,25/1000 = 2,81 \text{ кВт;}$$

$$Q_{\text{эцэ}}^2 = 5,76 \cdot 0,38(1393/100)^4 \cdot 0,3/1000 = 12,62 \text{ кВт.}$$

Теплота экзотермии в основном выделяется во второй зоне, так как до температуры 850–900 °С скорость окисления стали весьма незначительна. Примем потери металла с окалиной 0,5 %. Тогда

$$Q_{\text{yéç}}^2 = 0,01 \cdot 1500 \cdot 0,5 / 3600 = 11,77 \text{ кВт.}$$

Потери теплоты с окалиной

$$Q_{\text{оăăđ}}^2 = 0,02 \cdot 1500 \cdot 0,5 / 3600 \cdot 1050 = 2,18 \text{ кВт.}$$

Записываем уравнения теплового баланса для зон в соответствии с (1):

$$b_1 \cdot 34770,8 \cdot 0,804 = 249,36 + 1,1 (2,33 + 2,81);$$

$$b_2 \cdot 34770,8 \cdot 0,752 = 47,71 + 1,1 (0,91 + 12,62) - 11,77,$$

откуда определяем расход топлива:

$$b_1 = 33,74 \text{ м}^3/\text{ч} (0,0094 \text{ м}^3/\text{с});$$

$$b_2 = 7,81 \text{ м}^3/\text{ч} (0,0022 \text{ м}^3/\text{с}).$$

Суммарный расход топлива в печи составит:

$$B_{\text{пр}} = 33,74 + 7,81 = 41,55 \text{ м}^3/\text{ч}.$$

Удельный расход природного газа составит:

$$b_{\text{пр}} = 41,55/1,5 = 27,7 \text{ м}^3/\text{т};$$

в пересчете на условное топливо:

$$b = 27,7 \cdot 34770,8/29350 = 32,84 \text{ кг у.т./т}.$$

Для составления теплового баланса определим потери теплоты в зонах с уходящими газами, исходя из значений энтальпии, приведенных выше, а также с учетом того, что 20 % дымовых газов с рекуперативными горелками покидают рабочее пространство через окна посадки и выдачи заготовок:

$$Q_{\text{оо.а}} = i_{\text{а.оо}} Q_i^{\delta} b / i_{\text{о}};$$

$$Q_{\text{оо.а}}^1 = \frac{(0,8 \cdot 1421 + 0,2 \cdot 1224,3) 34770,8 \cdot 0,0094}{3251,4} = 138,38 \text{ кВт};$$

$$Q_{\text{оо.а}}^2 = \frac{(0,8 \cdot 1701,4 + 0,2 \cdot 1735,8) 34770,8 \cdot 0,0022}{3251,4} = 39,57 \text{ кВт}.$$

Суммарные потери с дымовыми газами составят:

$$Q_{\text{оо.а}} = 138,38 + 39,57 = 177,95 \text{ кВт}.$$

Определим приход теплоты с подогретым воздухом:

$$Q_{\text{а}}^1 = \frac{i_{\text{а}} b Q_i^{\delta}}{i_{\text{о}}}.$$

Для первой и второй зон имеем:

$$Q_{\dot{a}}^1 = \frac{34770,8 \cdot 0,0094 \cdot 743,55}{3251,4} = 67,6 \text{ кВт};$$

$$Q_{\dot{a}}^2 = \frac{34770,8 \cdot 0,0022 \cdot 901,3}{3251,4} = 18,95 \text{ кВт}.$$

Суммарный приход теплоты с подогретым воздухом составит:

$$Q_{\dot{a}} = 67,6 + 18,95 = 86,55 \text{ кВт}.$$

По результатам расчетов составлены зональные и общий тепловые балансы (таблицы 1–3).

Таблица 1 – Тепловой баланс первой отапливаемой зоны

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
1. Химическая теплота топлива	325,918	82,82	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	249,481	63,40
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	67,597	17,18	2. Потери физической теплоты с продуктами горения, уходящими из рабочего пр-ва печи	138,379	35,16
3. Количество теплоты, выделяемой при окислении Fe	0,0	0,0	3. Потери теплоты через кладку	2,328	0,59
			4. Потери теплоты с окалиной	0,000	0,00
			5. Потери через окна	2,812	0,71
			6. Неучтенные потери	0,514	0,13
ВСЕГО	393,515	100,00	ВСЕГО	393,515	100,00
Расход природного газа 33,74 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 26,67$ кг.у.т./т, КПД = 0,63					

Таблица 2 – Тепловой баланс второй отапливаемой зоны

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
1. Химическая теплота топлива	75,380	71,05	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	47,902	45,15
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	18,951	17,86	2. Потери физической теплоты с продуктами горения, уходящими из рабочего пр-ва печи	39,570	37,29
3. Количество теплоты выделяемой при окислении Fe	11,771	11,09	3. Потери теплоты через кладку	0,906	0,85
			4. Потери теплоты с окалиной	2,188	2,06
			5. Потери через окна	12,796	12,06
			6. Неучтенные потери	2,740	2,58
ВСЕГО	106,102	100,00	ВСЕГО	106,102	100,00
Расход природного газа 7,8 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 6,17$ кг.у.т./т, КПД = 0,45					

Таблица 3 – Общий тепловой баланс нагревательной печи

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1	2	3	4	5	6
1. Химическая теплота топлива	401,298	80,32	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	297,383	59,52
2. Теплота, вносимая подогретым воздухом	86,547	17,32	2. Потери физической теплоты с продуктами горения, уходящими из рабочего пр-ва печи	177,949	35,62

Окончание таблицы 3

1	2	3	4	5	6
3. Количество теплоты выделяемой при окислении Fe	11,771	2,36	3. Потери теплоты через кладку	3,234	0,65
			4. Потери теплоты с окалиной	2,188	0,44
			5. Потери через окна	15,608	3,12
			6. Неучтенные потери	3,254	0,65
ВСЕГО	499,616	100,00	ВСЕГО	499,616	100,00
Расход природного газа 41,55 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 32,84$ кг.у.т./т, КПД = 59,52					

Для оценки эффективности замены традиционных (дутьевых) горелок рекуперативными выполнен расчет теплового баланса нагрева металла в печи, результаты которых приведены в таблице 4.

Таким образом, очевидно, что в конкретном случае удельный расход условного топлива снизился более чем в 2 раза, КПД печи возрос с 31,55 % до 59,52 %.

В дальнейшем на основании рассчитанной тепловой мощности в каждой из зон и в соответствии с типорядом производителя рекуперативных горелок выбирают количество и требуемую мощность горелок. В конкретном случае для первой зоны выбраны две горелки Rekumat M250 в опциональном исполнении 190 кВт каждая, для второй – две горелки Rekumat M200 номинальной мощностью 80 кВт каждая. Горелки устанавливаются в боковых стенах печи в шахматном порядке.

При выборе места расположения горелок учитывают, что для снижения пика температур в пламени требуется определенная длина потока в отношении к диаметру сопел горелки, чтобы избежать высокотемпературных перегревов или же температурных пятен на противоположной стенке на поверхности садки. Длина струи должна быть больше 50 диаметров сопел горелки.

Таблица 4 – Тепловой баланс полуметодической нагревательной печи при отоплении дутьевыми горелками

Приход теплоты	кВт	%	Расход теплоты	кВт	%
1. Химическая теплота топлива	760,08	98,47	1. Теплота, затраченная на нагрев металла	297,38	31,55
2. Теплота, вносимая подогретым топливом	0	0	2. Потери физической теплоты с продуктами горения, уходящими из рабочего пр-ва печи	503,97	53,46
3. Количество теплоты, выделяемой при окислении Fe	11,77	1,53	3. Потери теплоты через кладку	39,67	4,21
			4. Потери теплоты с окалиной	2,19	0,23
			5. Потери через окна	15,61	1,66
			6. Неучтенные потери	5,53	8,90
ВСЕГО	942,7	100,0	ВСЕГО	942,7	100,00
Расход природного газа 97,99 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 76,12$ кг.у.т./т, КПД = 31,55					

Зоны, отапливаемые каждой горелкой, также должны обладать достаточными размерами, чтобы тепловой поток смог полностью покрыть полезное пространство. При высоких требованиях к равномерности температуры в печи подача энергии в печь должна быть распределена между как можно большим количеством горелок. Это значит увеличение пространства нагрева, однако соответственно увеличиваются расходы на строительные работы и потери вследствие большей теплоотдачи стен печи. Для оптимального расположения горелок в канале печи можно использовать следующее неравенство $bh > 100d^2$ (рисунок 1).

При необходимости (с учетом геометрических размеров печи) расположение горелок корректируют.

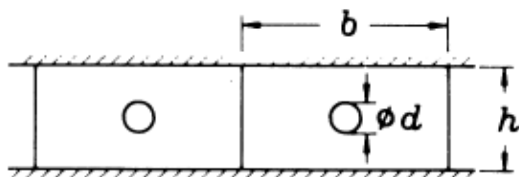


Рисунок 1 – Схема расположения горелок

Приведенные выше сравнительные расчеты выполнены при отсутствии центрального рекуператора. Вместе с тем, часто возникает вопрос о целесообразности модернизации нагревательной печи, оборудованной рекуператором. С этой целью выполнены расчеты теплового баланса методической трехзонной печи при исходных данных: производительность – 2,84 т/ч, диаметр нагреваемых заготовок (сталь 40ХН) – 0,15 м, начальная температура металла – 20 °С, конечная температура нагрева металла – 1250 °С, температура подогрева воздуха в игольчатом рекуператоре – 300 °С. Результаты расчета теплового баланса приведены в таблицах 5, 6.

Таблица 5 – Тепловой баланс нагревательной печи с центральным рекуператором и дутьевыми горелками

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1	2	3	4	5	6
1. Теплота от горения топлива	1,332	87,92	1. Теплота на нагрев металла	0,684	45,15
2. Физическая теплота воздуха	0,138	9,11	2. Теплота, уносимая уходящими газами	0,563	37,16
3. Теплота экзотермических реакций	0,045	2,97	3. Потери теплоты теплопроводностью	0,045	2,97
			4. Потери теплоты с охлаждающей водой	0,147	9,7

Окончание таблицы 5

1	2	3	4	5	6
			5. Потери теплоты излучением через открытые окна	0,041	2,71
			6. Неучтенные потери	0,035	2,31
Итого	1,515	100	Итого	1,515	100
Расход природного газа 142,2 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 56,7$ кг.у.т./т, КПД = 45,15					

Таблица 6 – Тепловой баланс нагревательной печи с рекуперативными горелками

Приход теплоты	МВт	%	Расход теплоты	МВт	%
1. Теплота от горения топлива	0,917	71,25	1. Теплота на нагрев металла	0,684	54,07
2. Физическая теплота воздуха	0,325	25,25	2. Теплота, уносимая уходящими газами	0,527	41,67
3. Теплота экзотермических реакций	0,045	3,5	3. Потери теплоты теплопроводностью	0,016	1,26
			4. Потери теплоты излучением через открытые окна	0,033	2,61
			5. Неучтенные потери	0,005	0,39
Итого	1,287	100	Итого	1,265	100
Расход природного газа 99,02 м ³ /ч Удельный расход условного топлива $b = 40,13$ кг.у.т./т, КПД = 54,07					

В конкретном случае очевидно, что при замене горелочных устройств рекуперативными горелками удельный расход условного

топлива снизился с 57,6 кг у.т/т в базовом варианте до 40,13 кг у.т/т, КПД соответственно возрос с 45,15 до 54,07 %.

Таким образом, приведена последовательность расчета для предварительной оценки снижения расхода топлива при нагреве в печах машиностроительного производства, в т.ч. оборудованных центральным рекуператором, при замене традиционных (дутьевых) горелочных устройств современными рекуперативными горелками.

Литература

1. Анализ эффективности различных способов рекуперации теплоты дымовых газов в газопламенных промышленных печах / С.М. Кабишов [и др.] // *Металлургическая теплотехника: сб. науч. тр. НМетАУ. – Днепропетровск: Новая идеология. – 2013. – Вып. 5(20). – С. 1–10.*

2. Тепловосбережение при нагреве металла в печах машиностроительных предприятий / А.А. Шипко [и др.] // *Литье и металлургия. – 2010. – № 1-2. – С. 53–58.*

3. Еремин, А.О. Современные способы отопления нагревательных печей / А.О. Еремин // *Сб. научн. тр. НМетАУ. – Днепропетровск, 2008. – С. 139–151.*

4. Wunning J. Рекуперативные горелки для прямого нагрева промышленных печей / J. Wunning // *«Gaswarme International». – 1988. – Т. 37 (1988). – Вып. 10. – С. 515–519.*

5. Дьяков, С.В. Опыт применения горелок WS в нагревательных и термических печах / С.В. Дьяков, А.В. Дьяков, А.Е. Макий // *Оборудование. Технический альманах. – 2009. – № 1. – С. 14–16.*

6. Корнеев, С.В. Особенности выбора горелочных устройств для нагревательных печей машиностроительного и металлургического производств / С.В. Корнеев // *Литье и металлургия. – 2010. – № 3. – С. 162–168.*

7. Новая скоростная рекуперативная газовая горелка для прямого нагрева металла в промышленных печах / М.Р. Барташ // *Сталь. – 2010. – № 3. – С. 125–127.*