

*Е.М. Запольская, М.В. Темлянец, К.Е. Костюченко, М.В. Матвеев*

Сибирский государственный индустриальный университет

## ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ КИСЛОРОДА ПРИ ОТОПЛЕНИИ СТЕНДОВ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО РАЗОГРЕВА ФУТЕРОВОК СТАЛЕРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ

**Аннотация.** Проведено исследование влияния обогащения дутья кислородом на технико-экономические показатели работы станда и качество нагрева футеровки на базе комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стандов для разогрева футеровок сталеразливочных ковшей. Обогащение дутья кислородом приводит к экономии природного газа и повышению КПД.

**Ключевые слова:** сталеразливочный ковш, футеровка, высокотемпературный разогрев, обогащение дутья кислородом.

## STUDY OF EFFECTIVENESS OF USE OF OXYGEN FOR HEATING OF HIGH-TEMPERATURE LINING HEATING STANDS OF STEEL-TEEMING LADLES

**Abstract.** The effect of oxygen enrichment of blast on technical and economic parameters of operation of the stand and quality of lining heating has been studied on the base of the comprehensively determined mathematic model of thermal panels for heating of steel ladle linings. The enrichment of the blast with oxygen leads to saving of natural gas and increases efficiency.

**Keywords:** steel-teeming ladle, lining, high-temperature preheating, enrichment of blast with oxygen.

Перед приемом расплава футеровку сталеразливочных ковшей разогревают на специальных стандах. Наибольшее распространение получили станды, отапливаемые природным газом. Одним из направлений повышения тепловой эффективности стандов и экономии природного газа является обогащение воздуха, идущего на горение, кислородом [1]. Ведущие фирмы, занимающиеся конструированием стандов, предлагают достаточно широкий спектр стандов с дополнительной подачей кислорода [2, 3]. Однако в силу ряда причин такие станды получили ограниченное распространение.

В настоящей работе на базе комплексной детерминированной математической модели тепловой работы стандов для разогрева футеровок сталеразливочных ковшей [4] проведено исследование влияния обогащения дутья кислородом на технико-экономические показатели работы станда и качество нагрева футеровки.

Многовариантные расчеты осуществляли на примере разогрева 350-т сталеразливочного ковша, футеровка которого состояла из четырех слоев: рабочего толщиной 200 мм, выполненного из алюмопериклазоуглеродистого огнеупора с содержанием углерода 8 %; арматурного толщиной 100 мм из огнеупора марки МКРКП-45 (между рабочим и арматурным слоями находится буферная засыпка марки ВГБМ-80 толщиной 25 мм); теплоизоляционного слоя толщиной 10 мм, выполненного из материала МКРКГ-400; стальной брони ковша толщиной 40 мм. Стенд оборудован водоохлаждаемой горелкой, в конструкции которой предусмотрено обогащение

кислородом дутья, подаваемого на горение. Химический состав природного газа, используемого для отопления станда, следующий: 91,50 %  $\text{CH}_4$ ; 3,07 %  $\text{C}_2\text{H}_6$ ; 1,73 %  $\text{C}_3\text{H}_8$ ; 0,9 %  $\text{C}_4\text{H}_{10}$ ; 2,34 %  $\text{N}_2$ ; 0,45 %  $\text{CO}_2$ ; 0,01 %  $\text{O}_2$ .

Проведенные ранее исследования [5] показали, что при разогреве углеродсодержащих (периклазоуглеродистых и алюмопериклазоуглеродистых) футеровок происходит выгорание углерода (обезуглероживание, декарбонизация) поверхностных слоев огнеупора, которое отрицательно сказывается на его стойкости. Обезуглероживание рабочего слоя на каждые 1 – 2 мм приводит к снижению стойкости футеровки примерно на одну плавку. Соответственно при разогреве футеровок необходимо обеспечивать минимальное выгорание углерода в огнеупорах. При этом необходимо учитывать, что экономический эффект от снижения обезуглероживания гораздо выше, чем от экономии природного газа. Затраты на топливо и электроэнергию составляют для различных режимов разогрева всего 5 – 6 % от ущерба, наносимого декарбонизацией [6]. Минимальное обезуглероживание при наименьшем времени нагрева обеспечивает температурный режим разогрева при постоянной максимально возможной скорости роста температуры футеровки.

В связи с этим, в качестве основного расчетного режима приняли разогрев с постоянной, максимально допустимой по условиям трещинообразования скоростью увеличения температуры поверхности рабочего слоя,

которая по рекомендациям производителей огнеупоров алюмопериклазоуглеродистых марок находится на уровне 50 – 60 °С/ч. Соответственно время  $\tau$  разогрева предварительно высушенной футеровки приняли 24 ч. При проведении расчетов при прочих равных условиях варьировали коэффициент  $\alpha$  расхода окислителя от 1,025 до 1,50 и содержание кислорода в нем от 21 до 50 %.

Качество нагрева футеровки оценивали по следующим требованиям [6, 7]:

– температура  $t_{п.кон}$  поверхности футеровки в конце разогрева должна составлять  $1200 \pm 20$  °С;

– температура  $t_{п-а}$  на стыке рабочего и арматурного слоев – не менее 800 °С;

– скорость увеличения температуры поверхности рабочего слоя – не более 60 °С/ч,

– температура  $t_{кож}$  кожуха ковша – не более 425 °С.

В таблице представлены результаты расчетов для 25 различных режимов разогрева. При оценке теплотехнических характеристик и параметров работы стенда обогащение дутья кислородом приводит к однозначному их улучшению, что соответствует результатам исследований, выполненных для различных типов нагревательных печей [8]. Обогащение дутья кислородом умень-

**Результаты расчетов для различных режимов разогрева сталеразливочных ковшей**

Ре- жим	Состав окислителя, %		$L_B/L_K$ , М <sup>3</sup> /М <sup>3</sup>	$V_{п.с.}$ , М <sup>3</sup> /М <sup>3</sup>	Состав п.с., %				$t_{к'}$ , °С	$t_{п.кон'}$ , °С	$t_{п-а'}$ , °С	$t_{кож'}$ , °С	$\delta_{об'}$ , мм	КПД, %	$B_{сп'}$ , М <sup>3</sup> /ч	$Q_{г'}$ , М <sup>3</sup>	$Q_{к'}$ , М <sup>3</sup>	$Q_{в'}$ , М <sup>3</sup>
	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>			CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>										
<i>При <math>\alpha = 1,025</math></i>																		
1	79	21	10,4/0	11,6	9,2	19,3	71,0	0,5	1771	1193	989	248	9,2	40,2	266,2	6389	0	66 444
2	75	25	8,2/0,4	9,9	10,8	22,3	66,4	0,5	1992	1198	994	252	9,3	44,4	242,5	5820	2328	47 724
3	70	30	6,4/0,8	8,4	12,7	25,9	60,8	0,6	2237	1202	999	255	9,4	48,0	225,9	5422	4337	34 698
4	60	40	4,1/1,3	6,5	16,3	32,7	50,2	0,8	2647	1205	1006	260	9,5	52,4	208,9	5014	6518	20 556
5	50	50	2,7/1,6	5,4	19,7	38,9	40,5	0,9	2975	1209	1011	263	9,6	54,9	200,4	4810	7695	12 986
<i>При <math>\alpha = 1,05</math></i>																		
6	79	21	10,6/0	11,8	9,1	18,9	71,1	0,9	1741	1192	988	248	9,2	39,6	270,4	6490	0	68 841
7	75	25	8,4/0,5	10,1	10,6	21,9	66,5	1,0	1960	1197	993	251	9,3	43,9	245,3	5887	2944	49 453
8	70	30	6,6/0,8	8,6	12,5	25,4	60,9	1,2	2204	1201	999	255	9,3	47,6	227,8	5467	4374	36 084
9	60	40	4,2/1,3	6,7	16,0	32,1	50,3	1,6	2611	1207	1006	260	9,5	52,0	210,0	5040	6552	21 168
10	50	50	2,8/1,6	5,5	19,3	38,2	40,6	1,9	2939	1208	1010	263	9,6	54,6	201,3	4831	7730	13 527
<i>При <math>\alpha = 1,1</math></i>																		
11	79	21	11,1/0	12,3	8,7	18,2	71,4	1,7	1649	1191	986	247	9,1	38,2	279,4	6706	0	74 432
12	75	25	8,9/0,5	10,5	10,2	21,0	66,8	2,0	1899	1196	992	250	9,2	42,8	251,1	6026	3013	53 635
13	70	30	6,9/0,9	8,9	12,0	24,4	61,3	2,3	2140	1200	997	254	9,3	46,7	231,7	5561	5005	38 370
14	60	40	4,4/1,4	6,9	15,4	30,9	50,7	3,0	2543	1206	1005	259	9,5	51,4	212,4	5098	7137	22 429
15	50	50	3,0/1,7	5,8	18,6	36,9	40,9	3,6	2869	1207	1010	262	9,5	54,1	202,9	4870	8278	14 609
<i>При <math>\alpha = 1,2</math></i>																		
16	79	21	12,1/0	13,4	8,0	17,0	71,9	3,1	1583	1188	983	245	9,1	35,5	299,8	7195	0	87 062
17	75	25	9,7/0,5	11,4	9,4	19,6	67,3	3,7	1790	1193	989	249	9,2	40,6	263,8	6331	3166	61 413
18	70	30	7,5/1,0	9,6	11,1	22,8	61,8	4,3	2022	1198	995	252	9,3	44,9	240,1	5762	5762	43 218
19	60	40	4,8/1,5	7,5	14,3	28,8	51,3	5,6	2417	1205	1003	257	9,4	50,1	217,3	5215	7823	25 033
20	50	50	3,2/1,9	6,2	17,3	34,5	41,5	6,7	2739	1208	1008	261	9,5	53,1	206,2	4949	9403	15 836
<i>При <math>\alpha = 1,5</math></i>																		
21	79	21	15,2/0	16,4	6,5	14,1	73,1	6,3	1341	1179	975	240	8,9	26,7	394,7	9473	0	143 987
22	75	25	12,1/0,6	13,9	7,7	16,3	68,6	7,4	1525	1186	982	244	9,1	33,8	314,5	7548	4529	91 331
23	70	30	9,3/1,3	11,8	9,1	18,9	63,2	8,8	1737	1192	988	248	9,2	39,5	271,2	6509	8461	60 532
24	60	40	6,0/1,9	9,1	11,8	24,0	52,8	11,4	2104	1200	997	254	9,3	46,2	234,1	5618	10 675	33 710
25	50	50	4,0/2,3	7,5	14,3	28,9	42,9	13,9	2412	1205	1003	257	9,4	50,1	217,6	5222	12 012	20 890

Примечание.  $L_B$  и  $L_K$  – удельный расход воздуха и кислорода на 1 м<sup>3</sup> сжигаемого газа;  $Q_B$  – расход воздуха.

шает объем и расход продуктов сгорания, повышает калориметрическую температуру  $t_k$  горения топлива и содержание трехатомных газов в продуктах сгорания. Последнее увеличивает степень черноты газов, приводит к интенсификации теплообменных процессов, повышает коэффициент полезного действия стэнда, снижает удельный ( $B$ ) и общий ( $Q$ ) расходы топлива на разогрев.

Повышение коэффициента расхода окислителя более 1,05 практикуется при разогреве ковшей рядом предприятий в целях устранения недожога, снижения температуры продуктов сгорания и скорости разогрева. Также оно может являться следствием подсосов атмосферного воздуха в полость ковша. Это оказывает обратное влияние на теплотехнические показатели работы стэндов.

Как видно из таблицы, наиболее эффективным с теплотехнической точки зрения является режим 5 при содержании кислорода в окислителе 50 % и коэффициенте расхода последнего 1,025. КПД рассматриваемого случая достигает 54,9 %, а общий расход топлива на разогрев составляет 4811 м<sup>3</sup>. Наиболее затратным является режим 21, соответствующий использованию в качестве окислителя воздуха, подаваемого на горение с величиной  $\alpha = 1,5$ . При этом режиме КПД стэнда составляет всего 26,7 %, а расход топлива почти в 2 раза больше по сравнению с режимом 5 и составляет 9474 м<sup>3</sup>. Характерно, что все исследованные режимы обеспечивают примерно одинаковое качество разогрева футеровки как по температурам поверхности футеровки, стыка рабочего и арматурного слоев, кожуха, так и по глубине  $\delta_{об}$  обезуглероженного слоя, который для режима 21 составляет 8,9 мм, а для режима 5 – 9,6 мм. Изменение различных параметров во времени для рассматриваемых случаев представлено на рис. 1.

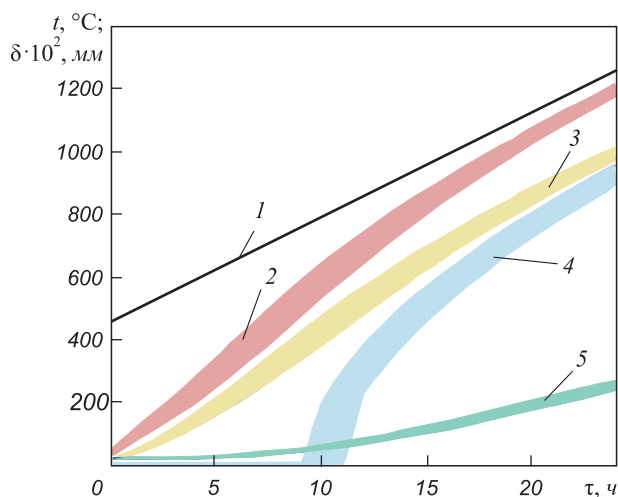


Рис. 1. Температурный режим разогрева:

- 1 – температура греющей среды; 2 – температура поверхности футеровки; 3 – температура на стыке рабочего и арматурного слоев; 4 – глубина обезуглероженного слоя; 5 – температура кожуха

На рис. 2 приведены изменения расхода газа во времени при различных значениях  $\alpha$  и использовании в качестве окислителя воздуха. После 10 – 12 ч от начала разогрева начинается процесс обезуглероживания, имеющий экзотермический эффект и являющийся приходной статьей теплового баланса, следовательно происходит снижение расхода топлива.

Большинство эксплуатируемых в настоящее время стэндов обеспечивают расход топлива не более 450 – 500 м<sup>3</sup>/ч (рис. 2, штриховая линия). Без обогащения дутья кислородом практически обеспечить заданный (с постоянной скоростью увеличения температуры поверхности футеровки) режим разогрева можно только при коэффициентах расхода окислителя не более 1,1. Повышение величины  $\alpha$  сверх этого значения повлечет за собой либо увеличение продолжительности нагрева, либо недогрев до заданной температуры футеровки.

В современных условиях функционирования металлургических предприятий весьма важен экономический фактор эффективности применения кислорода. В связи с этим проведены расчеты затрат  $Z$ , руб, на разогрев одного ковша по следующему соотношению:

$$Z = Q_r \cdot C_r + Q_k \cdot C_k + Q_{эл.в} \cdot \tau C_{эл} + Q_{эл.д} \cdot \tau C_{эл}, \quad (1)$$

где  $Q_r$  и  $Q_k$  – общие расходы газа и кислорода на разогрев, м<sup>3</sup>;  $C_r$  и  $C_k$  – цена 1 м<sup>3</sup> газа и кислорода соответственно, руб;  $Q_{эл.в}$  и  $Q_{эл.д}$  – мощность вентилятора и дымососа соответственно, кВт;  $C_{эл}$  – цена 1 кВт·ч электроэнергии, руб.

При этом учитывали, что двигатель вентилятора, подающего воздух на горелку стэнда, и дымосос работают с постоянными расходами электроэнергии, не зависящими от расхода воздуха и продуктов сгорания. Соответственно третье и четвертое слагаемые в выражении (1) являются постоянными величинами. Если в конструкции стэнда дымосос отсутствует, а продукты сгорания удаляются через зазор между крышкой стэнда и ковшом, то четвертое слагаемое равно нулю.

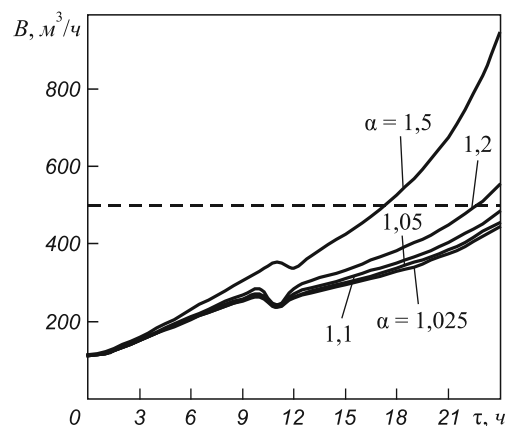


Рис. 2. Изменение расхода газа во времени при различных коэффициентах расхода окислителя и использовании в качестве него воздуха

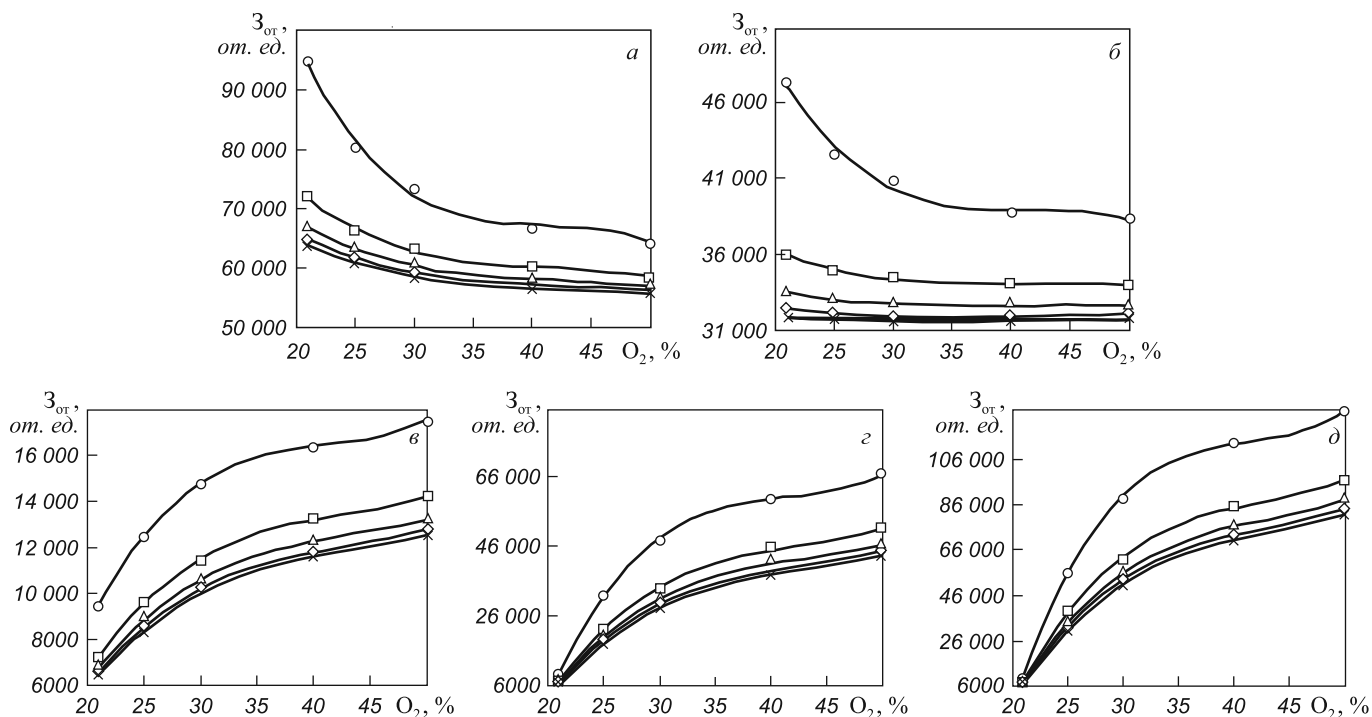


Рис. 3. Зависимость относительных затрат  $Z_{от}$  на разогрев от содержания кислорода в окислителе при коэффициентах его расхода  $\alpha$  – 1,025;  $\diamond$  – 1,05;  $\Delta$  – 1,1;  $\square$  – 1,2;  $\circ$  – 1,5:  $a$  – 10:1;  $б$  – 5:1;  $в$  – 1:1;  $г$  – 1:5;  $д$  – 1:10

Поскольку цены на энергоносители на различных предприятиях не одинаковы, то провели оценку затрат на разогрев в относительных величинах, принимая соотношения цены единицы газа и кислорода, равные 1:10, 1:5, 1:1, 5:1, 10:1. В таблице представлены абсолютные расходы энергоносителей, а на рис. 3 – затраты в относительных единицах. Анализ проведенных расчетов показывает, что применение кислорода снижает стоимость нагрева только в том случае, если цена 1 м<sup>3</sup> газа в 3 – 4 раза больше, чем цена 1 м<sup>3</sup> кислорода.

Дополнительно провели расчет влияния обогащения дутья кислородом и коэффициента расхода окислителя на затраты для разогрева по фактическим ценам энергоносителей (природный газ – 3,64 руб/м<sup>3</sup>; кислород – 1,91 руб/м<sup>3</sup>; электроэнергия – 1,44 руб/(кВт·ч)) одного из российских металлургических предприятий. Результаты представлены на рис. 4, из которого видно, что при таких ценах на энергоносители обогащение дутья кислородом увеличивает стоимость разогрева. Следовательно, его целесообразно применять только в том случае, если необходимо достижение определенных параметров технологии, например заданной температуры разогрева при недостаточной тепловой мощности стенда. При этом подача кислорода может осуществляться только на завершающей стадии разогрева.

**Выводы.** Результаты многовариантных расчетов, выполненных с использованием многофакторной детерминированной математической модели, показали, что обогащение дутья кислородом на стендах высокотемпературного разогрева футеровок сталеразливочных

ковшей повышает тепловую эффективность их работы, приводит к экономии природного газа и повышению КПД. С экономической точки зрения обогащение дутья кислородом снижает затраты на разогрев в том случае, если цена 1 м<sup>3</sup> газа в 3 – 4 раза больше, чем цена 1 м<sup>3</sup> кислорода. Обогащение дутья кислородом целесообразно применять в случаях необходимости достижения определенных параметров технологии.

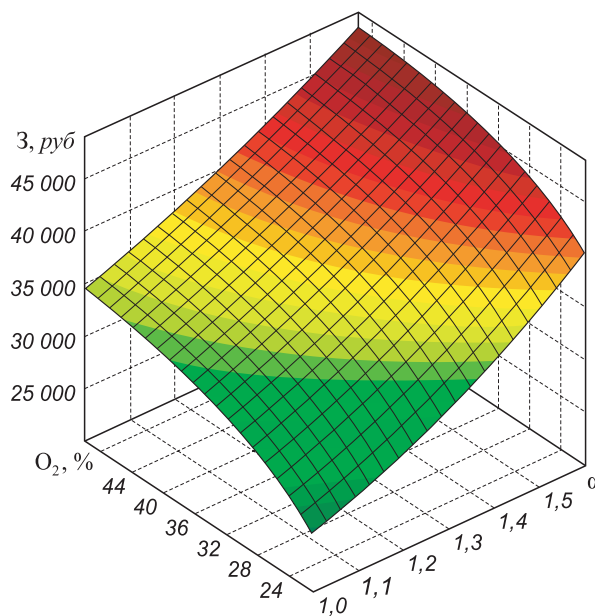


Рис. 4. Зависимость абсолютных затрат на разогрев от содержания кислорода в окислителе и коэффициента его расхода

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Kelly J., Dentella F., Recanati A. et al. // Iron & Steel Technology. 2011. № 5. С. 307–311.
2. Лоренц В., Локтев А., Гартен В., Бехманн Д. // Сталь. 2007. № 11. С. 74–77.
3. Лоренц В., Локтев А., Гартен В., Бехманн Д. // Новые огнеупоры. 2007. № 12. С. 19–27.
4. Матвеев М.В., Темлянцев М.В., Запольская Е.М., Костюченко К.Е. // Вестник Горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2013. Вып. 31. С. 31–44.
5. Темлянцев М.В., Костюченко К.Е., Матвеев М.В., Темлянцева Е.Н. // Вестник Горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2012. Вып. 29. С. 58–62.
6. Матвеев М.В., Темлянцев М.В., Темлянцева Е.Н., Костюченко К.Е. // Вестник Горно-металлургической секции РАЕН. Отделение металлургии. 2012. Вып. 30. С. 23–30.
7. Темлянцев М.В., Матвеев М.В., Костюченко К.Е., Лосицкая М.Ю. – В кн.: Вестник Российской академии естественных наук. Западно-Сибирское отделение. Сб. науч. тр. – Кемерово: Кузбассвузиздат, 2012. Вып.14. С.137–142.
8. Ревун М.П., Гранковский В.И., Байбуз А.Н. Интенсификация работы нагревательных печей. – Киев: Техніка, 1987. – 136 с.

© 2013 г. *Е.М. Запольская, М.В. Темлянцев, К.Е. Костюченко, М.В. Матвеев*  
Поступила 3 апреля 2013 г.