

8. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 418 с.
9. Плахотин В.С., Колмогоров В.Л., Миронов В.Г. Определение максимальных деформаций при холодной прокатке труб. // Интенсификация процессов производства холодноде-

формированных труб. – Свердловск: Среднеуральское книжное издательство, 1969. С. 23 – 31.

© 2013 г. С.Я. Фомин  
Поступила 18 декабря 2012 г.

УДК 669.041

*А.А. Ансимов, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов*

Старооскольский технологический институт

## РАЗРАБОТКА КОМПЬЮТЕРНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РЕЖИМОМ СЖИГАНИЯ ТОПЛИВА ВО ВРАЩАЮЩИХСЯ ОБЖИГОВЫХ ПЕЧАХ

**Аннотация.** В работе представлены данные по разработке и использованию компьютерной системы управления режимом сжигания топлива на вращающихся печах обжига известняка. Анализ опытных данных свидетельствует об эффективности и надежности применения этой системы для оптимизации режима сжигания топлива во вращающихся печах, что позволяет улучшить технико-экономические и энерго-экологические показатели производства извести.

**Ключевые слова:** обжиговая печь, управление, известь, коэффициент расхода воздуха.

## MANAGEMENT INFORMATION SYSTEM DEVELOPMENT TO ROTARY ROASTING FURNACE FUEL COMBUSTION PROCESS CONTROL

**Abstract.** In work are submitted data on development and use of a computer control system by a mode of burning of fuel on rotating furnaces of roasting limestone. The analysis of skilled data testifies to efficiency and reliability of use of this system for optimization of a mode of burning fuel in rotating furnaces that allows to improve technical and economic and power-ecological indicators of lime production.

**Keywords:** rotating furnace, management, lime, coefficient of air consumption.

Оптимизация режима сжигания топлива во вращающейся печи обжига известняка [1] связана с количеством воздуха, подводимого в зону горения, и является одним из главных факторов [2], определяющих снижение удельного расхода тепла на процесс обжига, повышение производительности агрегата и уменьшение количества вредных выбросов в атмосферу при условии обеспечения требуемых показателей качества извести, необходимой для производства [3] высококачественных марок сталей.

Анализ результатов исследования в цехе обжига извести Оскольского электрометаллургического комбината по оценке эффективности производства извести [3, 4] на вращающихся обжиговых печах осуществляли по данным текущего контроля параметров теплового режима с отбором проб на химический анализ отходящих из агрегата газов и контролем коэффициента избытка воздуха [5, 6] по формуле

$$\alpha_{\text{в}}^{\text{хим}} = \frac{1}{1 - 3,76 \frac{\text{O}_2^{\delta} - 0,5(\text{CO}^{\delta} + \text{H}_2^{\delta})}{\text{N}_2}}, \quad (1)$$

где  $\text{N}_2^{\delta} = 100 - (\text{CO}_2^{\delta} + \text{O}_2^{\delta} + \text{H}_2^{\delta} + \text{CO}^{\delta})$ ;  $\text{N}_2^{\delta}$ ,  $\text{CO}_2^{\delta}$ ,  $\text{O}_2^{\delta}$ ,  $\text{CO}^{\delta}$ ,  $\text{H}_2^{\delta}$  – составляющие отходящих из печи дымовых газов при отборе проб на входе в пылевую камеру [3, 4].

Конструкция однопроводной горелки типа ГРЦ для сжигания природного газа (до 3500 м<sup>3</sup>/ч) в печи с регулируемой длиной факела и внешним подсосом нагретого воздуха до 450 – 500 °С, поступающего из холодильника в зону горения печи [3, 4], позволяет интенсифицировать сжигание топлива с обеспечением средней температуры факела до 1600 ± 50 °С и определением требуемой [1, 3, 7] производительности агрегата:

$$G = \alpha_{\Sigma} \left( \frac{T_{\text{ф}} - T_{\text{м}}}{q_{\text{т}}} \right) F, \quad (2)$$

где  $\alpha_{\Sigma}$  – средний коэффициент теплоотдачи, кДж/(м<sup>2</sup>·с);  $T_{\text{ф}}$  и  $T_{\text{м}}$  – средние значения температур газового факела и известняка в зоне обжига печи соответственно, °С;  $q_{\text{т}}$  – удельный расход теплоты на обжиг известняка, кДж/кг;  $F$  – поверхность контакта факела и известняка в зоне обжига печи, м<sup>2</sup>.

Исследованиями установлено [1, 3, 4], что на производительность печи ( $G$ , т/ч), удельный расход теплоты ( $q_{\text{т}}$ , кДж/кг) и другие показатели ( $\alpha_{\Sigma}$ ,  $T_{\text{ф}}$ ) существенное влияние оказывают условия сжигания топлива, конструкция горелки и, в особенности, коэффициент расхода воздуха ( $\alpha_{\text{в}}^{\text{хим}}$ ), а также метод управления [4, 6, 7] тепловым режимом работы вращающейся печи.

Результаты статистической обработки опытных данных [4, 5, 7] работы вращающейся печи обжига известняка показали, что коэффициент расхода воздуха на клапане  $\alpha_B^{кл}$  оказывает существенное влияние на такие показатели работы агрегата, как производительность ( $G$ , т/ч), температура нагрева воздуха ( $T_B$ , °С), идущего на горение топлива и удельный расход газа ( $q_r$ , м<sup>3</sup>/т), что подтверждается следующими корреляционными зависимостями:

$$G = 28,33\alpha_B^{кл} - 8,63, R^2 = 0,38;$$

$$T_B = 233,31\alpha_B^{кл} + 276,67, R^2 = 0,46;$$

$$q_r = -316,7\alpha_B^{кл} + 493,7, R^2 = 0,48.$$

Оптимизация режима сжигания топлива (РСТ) в печи на основе соблюдения  $\alpha_B^{ЭВМ}$  или  $\alpha_B^{кл}$ , максимально приближенных к требуемым [1, 3, 7] по технологии ( $\alpha_B^{опт} = 1,03 \pm 0,02$ ), позволяет достигнуть наилучших показателей работы вращающихся печей для производства качественной извести [2 – 4].

Принципиальная блок-схема алгоритма модели текущего расчета [1, 4] параметров РСТ во вращающихся печах [2, 5] приведена на рис. 1. Компьютерная система управления (КСУ) с целью оптимизации РСТ реализо-

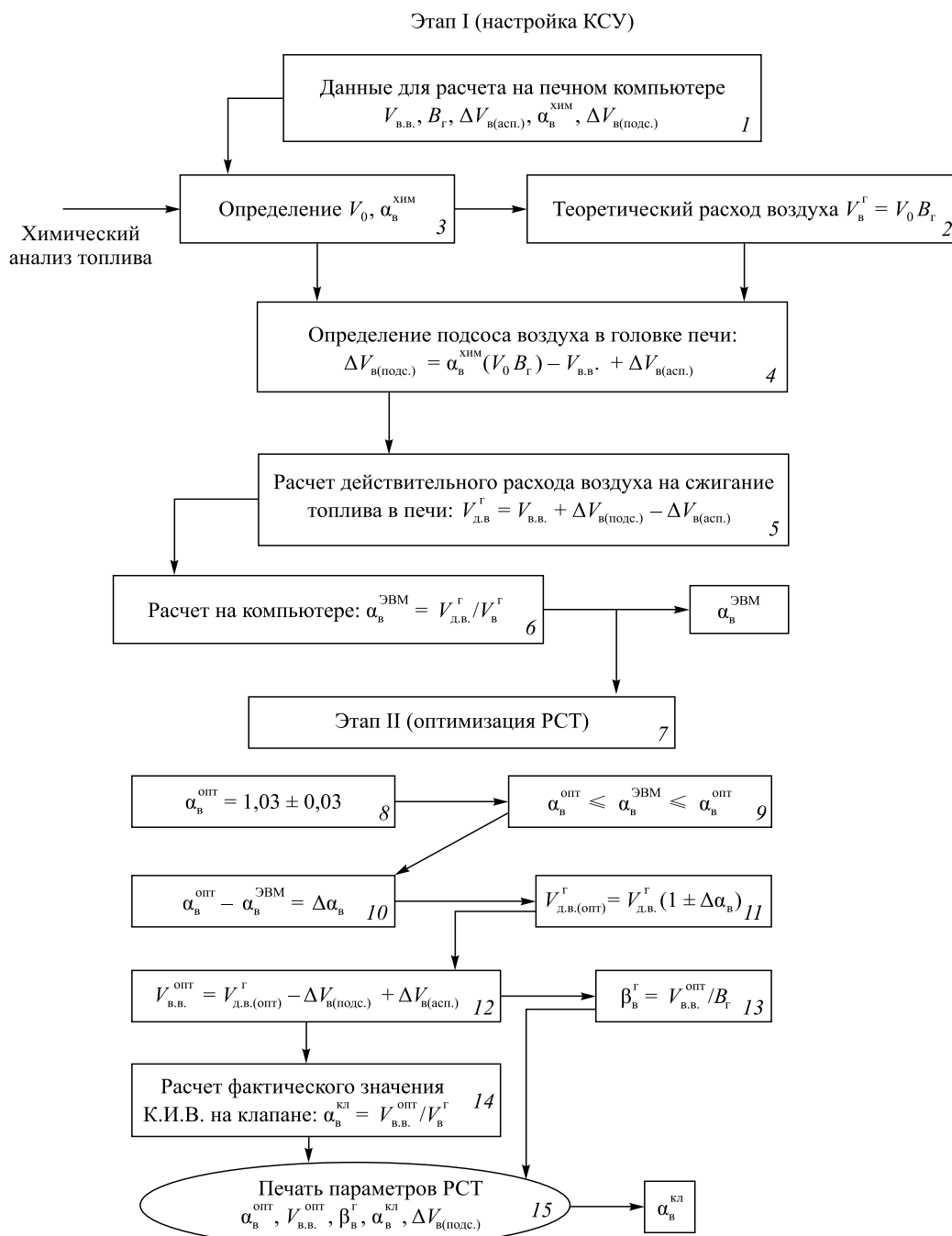


Рис. 1. Блок-схема структуры алгоритма модели компьютерной системы управления режимом сжигания топлива для условий работы вращающейся печи обжига известняка

вана в виде специальной программы на базе MS Excel, которая включена в общую программу TRACE MODE цеховой АСУ с контроллером ЭМИКОН (ЭК-2000), а печной компьютерный комплекс представляет из себя операторскую станцию типа RAC-900.

Для нахождения рациональных условий сжигания топлива в печи и обеспечения требуемых показателей для  $\alpha_{\Sigma}$  и  $q_T$  использовали в качестве критерия оптимальности коэффициент расхода воздуха  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$ , рассчитываемый по алгоритму модели (см. рис. 1) на компьютере и являющийся выходной величиной параметров тепловой работы агрегата в следующем виде:

$$\alpha_B^{\text{ЭВМ}} = \frac{V_{\text{в.в.}} + \Delta V_{\text{в(подс.)}} - \Delta V_{\text{в(асп.)}}}{V_0 B_T}, \quad (3)$$

где  $V_{\text{в.в.}}$  – расход вентиляторного воздуха, поступающего через холодильник печи в зону горения топлива,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $V_0$  – теоретический расход воздуха на сжигание  $1 \text{ м}^3$  природного газа,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ ;  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$ ,  $\Delta V_{\text{в(асп.)}}$  – подсосы воздуха в головке печи и утечки вентиляторного воздуха в системе аспирации агрегата,  $\text{м}^3/\text{ч}$ ;  $B_T$  – расход природного газа, поступающего в горелку печи,  $\text{м}^3/\text{ч}$ .

При использовании приведенного выше выражения (2), заменяя  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  на  $\alpha_B^{\text{хим}}$ , из выражения (1), с учетом известных на пульте печи данных по  $V_{\text{в.в.}}$  и  $B_T$  при кратковременном закрытии шиберов в системе аспира-

ции печи (рис. 2), т.е. при  $\Delta V_{\text{в(асп.)}} = 0$  находили текущее значение  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$  в головке печи, а затем, наоборот, подставляя в это же выражение (2) известное значение  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$  находили количество утечки воздуха в системе аспирации при тех же известных данных работы агрегата [2, 4].

Следовательно, после последовательного определения  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$  и  $\Delta V_{\text{в(асп.)}}$  при постоянной тяге в печи и известных  $V_{\text{в.в.}}$  и  $V_0 B_T$  на печном компьютерном комплексе с применением программы MS Excel находили текущее значение (см. рис. 1). Приведенную на рис. 1 блок-схему алгоритма расчета  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  использовали также для определения текущей требуемой величины соотношения воздух – газ ( $\beta_B^{\text{в}}$ ) во вращающейся обжиговой печи для производства извести [4]. Расчет по этапу I осуществляется в последовательности от блоков 1 до 6, т.е. осуществляется расчет значений  $V_T^{\text{в}}$  (блок 1), определяются подсосы воздуха  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$  в головке печи (блок 4), выполняется расчет действительного расхода воздуха (блок 5), определяется фактическое значение  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  (блок 6). Далее на этапе II производится оценка требуемого (например, в блоках 8 ÷ 11 при  $\alpha_B^{\text{опт}} = 1,03 \pm 0,03$ ) оптимального расхода вентиляторного воздуха  $V_{\text{в.в.}}^{\text{опт}}$  (блок 12) и установление также оптимального соотношения воздух–газ ( $\beta_B^{\text{в}}$ ) в системе управления (блок 13) при данном аэродинамическом режиме [5] сжигания топлива в печи.

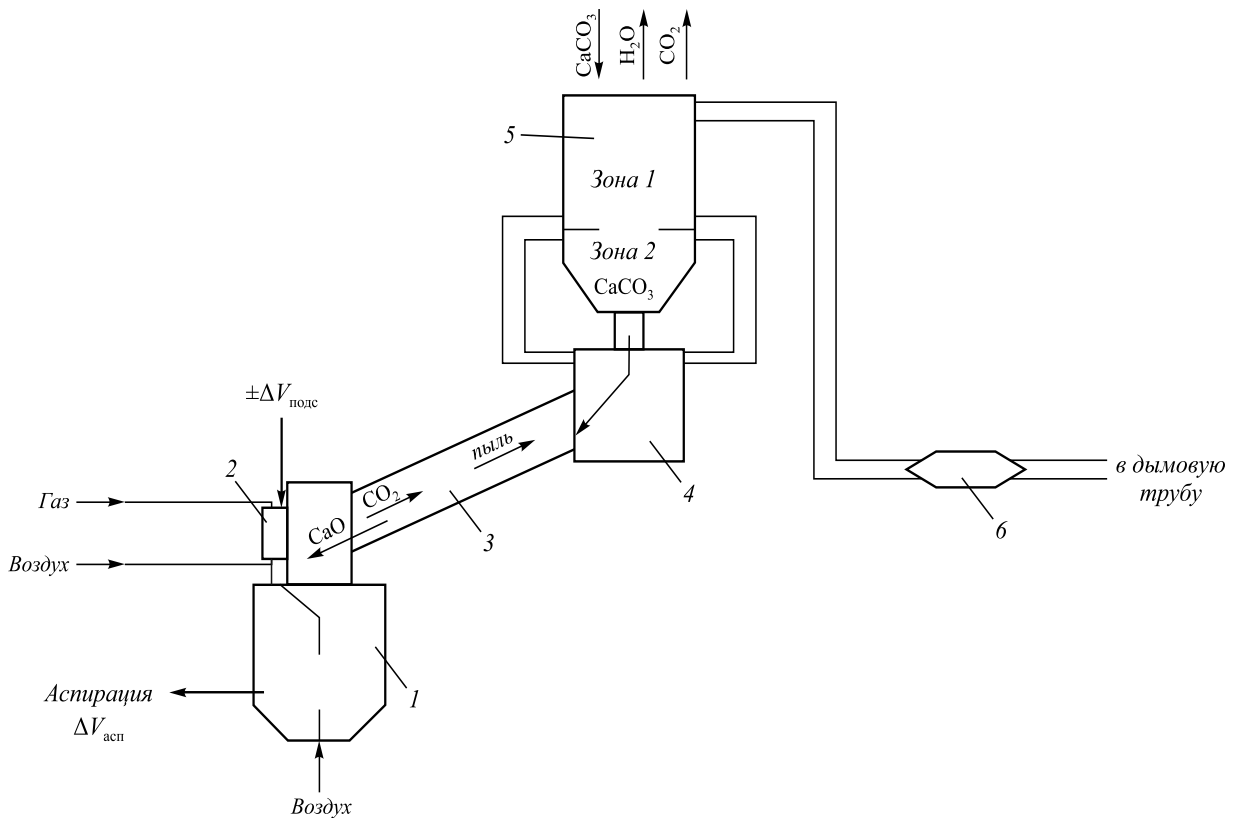


Рис. 2. Схема конструктивных блоков вращающейся обжиговой печи для производства извести: 1 – холодильник и система аспирации, 2 – головка печи с горелкой, 3 – вращающийся барабан печи, 4 – пылевая камера, 5 – подогреватель известняка, 6 – электрофильтр агрегата

Таким образом, на II этапе расчета параметров КСУ по ходу работы вращающейся печи осуществляется расчет текущей величины  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  (блок 6) и производится сравнение с  $\alpha_B^{\text{ОПТ}} = 1,03 \pm 0,03$  в блоке 8 для определения разницы  $\pm \Delta \alpha_B$ . Если эта разница более 0,03, то осуществляется коррекция (блок 8) величины  $V_B^{\text{ЭВМ}}$  в сторону уменьшения (min) или, если  $\Delta \alpha_B$  менее 0,03, то производится увеличение ( $V_B^{\text{ЭВМ}}$  в блоке 12). При этом оптимальное значение расхода вентиляторного воздуха устанавливается, исходя из следующего выражения:

$$V_{\text{в.в.}}^{\text{ОПТ}} = 9,35 B_{\text{г}} \alpha_B^{\text{ОПТ}} \pm \Delta V_{\text{в(подс.)}} + \Delta V_{\text{в(асп.)}}, \quad (3)$$

где 9,35 – расчетное значение расхода воздуха на горение 1 м<sup>3</sup> природного газа, м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>.

Это обстоятельство позволяет устанавливать оптимальное значение для соотношения воздух–газ (блок 13) и определять фактическое значение К.И.В на клапане (блок 14) при существующей гидравлической обстановке в печи.

Результаты сравнения (рис. 3)  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$ ,  $\alpha_B^{\text{ХИМ}}$  (по КСУ) и  $\alpha_B^{\text{ХИМ}}$  указывают на достоверность взаимосвязей, а дос-

точно высокие коэффициенты корреляции ( $R > 0,8$ ) свидетельствует об адекватности и возможности практического использования предложенного метода для осуществления оптимального управления режимом [4, 5] сжигания топлива в печи. Сравнительные показатели работы вращающейся печи при различных значениях  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$ ,  $B_{\text{г}}$  и температуры отходящих из печи газов  $T_{\text{отх.г}}$  приведены в таблице.

Опытным путем установлено, что значения стандартных отклонений для производительности печи ( $G$ , т/ч), температуры нагрева вентиляционного воздуха  $T_{\text{в.в.}}$ , °С в холодильнике печи и удельного расхода топлива ( $q_{\text{г}}$ , м<sup>3</sup>/т) соответственно составляют:

$$\sigma(G) = 1,92 \text{ т/ч}, \sigma(T_{\text{в.в.}}) = 16 \text{ °С}, \sigma(q_{\text{г}}) = 19,43 \text{ м}^3/\text{т}.$$

Из приведенных в таблице данных следует, что предпочтительным является вариант Б, так как показатели  $G$ ,  $q_{\text{г}}$ ,  $T_{\text{отх.г}}$  выгодно отличаются от варианта А, что вызвано меньшими значениями  $\beta_{\text{г}}$ ,  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  и более высоким показателем нагрева вентиляторного воздуха  $T_{\text{в.в}}$  по сравнению с вариантом А работы печей.

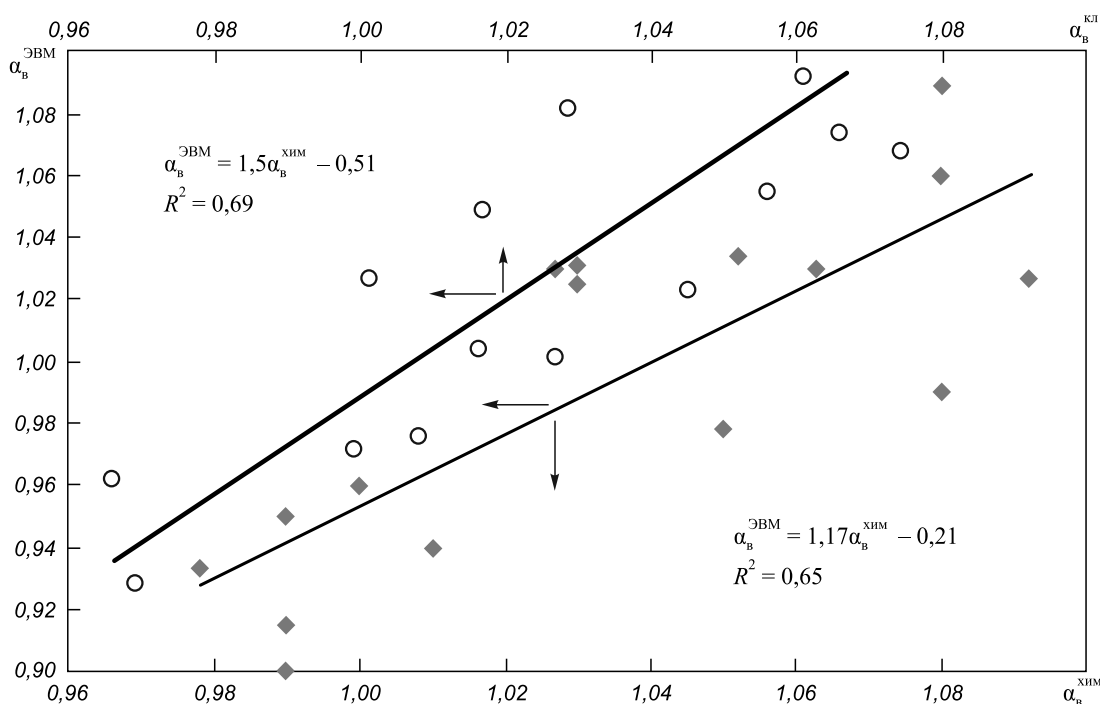


Рис. 3. Корреляционные взаимосвязи параметров  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$ ,  $\alpha_B^{\text{ХИМ}}$  и  $\alpha_B^{\text{ХИМ}}$  в одинаковых условиях работы вращающейся печи при учете значений  $\Delta V_{\text{в(подс.)}}$ ,  $\Delta V_{\text{в(асп.)}}$ ,  $\beta_{\text{г}}$  и других данных

**Сравнительные показатели работы вращающейся печи при различных значениях  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$ ,  $\beta_{\text{г}}$  и температуры отходящих из печи газов,  $T_{\text{отх.г}}$ , °С**

Вариант	Число проб	Расход, м <sup>3</sup> /ч		$\beta_{\text{г}}$	$\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$	$\Delta V_{\text{в(подс.)}}$ , м <sup>3</sup> /ч	$G$ , т/ч	$q_{\text{г}}$ , м <sup>3</sup> /т	$T_{\text{отх.г}}$ , °С	$T_{\text{в.в.}}$ , °С	$T_{\text{изв.}}$ , °С
		газ	воздух								
А	12	3512,3	31 270,8	8,90	1,078	6700	18,2	192,4	894,2	494,8	64,8
Б	13	3445,3	29 927,1	8,69	1,011	4500	19,0	180,0	888,0	575,4	87,0

Из анализа этих данных следует, что режим работы печи по варианту Б является более приближенным к  $\alpha_B^{\text{опт}} = 1,03$ , чем вариант А, что обеспечивает лучшие технико-экономические и качественные показатели производства извести на вращающихся печах обжига известняка. Применение КСУ-РСТ (см. рис. 1) позволяет оптимизировать режим сжигания топлива в печи с использованием периодической корректировки коэффициента  $\alpha_B^{\text{кл}}$  и  $\alpha_B^{\text{ЭВМ}}$  по данным  $\alpha_B^{\text{хим}}$ , определяемого [уравнение (1)] по данным химического анализа проб отходящих из агрегата сильно запыленных технологических газов, что повышает эффективность и надежность [4, 5, 7] предложенного метода непрерывного контроля параметров тепловой работы вращающейся печи.

**Выводы.** Проведены исследования на вращающихся печах обжига известняка для производства извести. Предложена модель и алгоритм расчета теплотехнологических показателей работы агрегата на основе текущего контроля соотношения топливо–воздух с учетом определения значений подсоса воздуха в головку печи и утечки воздуха в системе аспирации агрегата.

Показана возможность и эффективность осуществления оперативного контроля коэффициента расхода воздуха по данным расчета его на компьютере, установленном на пульте печи, что позволяет оптимизировать параметры тепловой работы агрегата и повысить производительность, а также снизить удельный расход топлива.

Предлагаемая КСУ-РСТ имеет преимущество перед существующими системами контроля  $\alpha_B^{\text{кл}}$  и  $\beta_T^{\text{в}}$  в том, что исключается фактор влияния запыленности продуктов сгорания на точность работы датчиков контроля коэффициента расхода воздуха в системе контрольно-измерительных приборов и автоматики на вращающейся печи.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Трубаев П.А., Кузнецов В.А., Беседин П.В. Методы компьютерного моделирования горения и теплообмена во вращающихся печах. – Белгород: Изд-во БГТУ: БИЭИ, 2008. – 230 с.
2. Гамей А.И. и др. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2002. № 6. С. 3 – 5.
3. Антонов Г.Л. и др. // Сталь. 2008. № 9. С.41 – 44.
4. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. // Черная металлургия: Бюл. ин-та «Черметинформация». 2011. № 7. С. 78 – 81.
5. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. Сб. тр. III Всерос. научно-практич. конф. «Моделирование, программное обеспечение и наукоемкие технологии в металлургии». – Новокузнецк: СибГИУ, 2011. С. 318 – 324.
6. Тройб С.Г. Контроль коэффициента избытка воздуха. – М: Металлургиздат, 1956. – 245 с.
7. Меркер Э.Э., Харламов Д.А., Ансимов А.А. Пути повышения эффективности сжигания топлива во вращающихся печах: В сб. тр. «Современная металлургия, начало нового тысячелетия». – Липецк: ЛГТУ, 2008. С. 134 – 138.

© 2013 г. А.А. Ансимов, Э.Э. Меркер, Д.А. Харламов  
Поступила 9 ноября 2012 г.