

УДК 543.51

## КОНТРОЛЬ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОМ ПРОИЗВОДСТВЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКОГО ГАЗОАНАЛИЗАТОРА “ЭМГ-20”<sup>1</sup>

© С. И. Марковский<sup>2</sup>, А. В. Козловский<sup>2</sup>, И. Л. Федичкин<sup>2</sup>,  
Е. Л. Гуревич<sup>2</sup>, О. Ю. Бегак<sup>3</sup>, А. В. Бородин<sup>3</sup>

*Статья поступила 2 ноября 1999 г.*

Рассмотрены возможности применения нового масс-спектрометрического газоанализатора “ЭМГ-20” для контроля и управления технологическими процессами, обеспечения безопасности работ и проведения экологического мониторинга в металлургии на примере кислородно-конвертерного производства. Показано, что характеристики газоанализатора “ЭМГ-20” обеспечивают оперативный аналитический контроль состава газовой среды металлургических агрегатов в непрерывном автоматическом режиме. Разработанная система пробоотбора, пробоподготовки и коммутации позволяет осуществлять отбор, подготовку и транспортировку газовых проб по 12 независимым каналам.

В современной металлургии большинство технологий получения черных и цветных сплавов, проведение различных стадий и операций металлургического и заготовительного производств связано с осуществлением гетерофазных процессов и реакций (доменное, кислородно-конвертерное, автогенное производства, плавка в вакуумных печах и т.д.). Качественный и количественный состав газовой среды — одной из реакционных фаз, динамика изменения во времени содержания ее отдельных компонентов оказывают большое влияние как на протекание самого технологического процесса, так и на качество конечного продукта. Во многих металлургических процессах происходит выделение горючих и взрывоопасных газов, например образование смеси водород – кислород. Выбросы вредных и токсичных газов в атмосферу составляют доминирующую компоненту загрязнения окружающей среды при работе металлургических предприятий. В связи с этим решение задачи эффективного аналитического контроля газовой среды металлургических агрегатов для контроля и управления технологическими процессами, обеспечения безопасности работ, осуществления экологического мониторинга и процессов очистки отходящих металлургических газов является весьма актуальным.

Современными аналитическими методами, применяемыми для газового анализа, являются газосорбционная хроматография (ГХ), методы с использованием сенсоров на основе электрохимических и инфракрасных (ИК) датчиков, оптические спектральные методы, в том числе ИК-спектрометрия, и

масс-спектрометрия (МС) [1 – 3]. Основные требования, предъявляемые к газоаналитическому оборудованию при контроле металлургических процессов, следующие: широкий диапазон измерений концентраций компонентов газовой среды (от 0,01 до 100% объёмн.), минимальное время измерения, одновременный многокомпонентный анализ в непрерывном автоматическом режиме, возможность анализа проб с нескольких точек отбора, многофункциональность, долговременная “живучесть” в жестких производственных и климатических условиях эксплуатации.

В настоящей работе рассматриваются возможности применения масс-спектрометрии на базе современного отечественного промышленного газоанализатора “ЭМГ-20” для решения поставленной задачи измерения содержаний компонентов газовой среды металлургических производств. Данный прибор позволяет реализовать одновременный многокомпонентный количественный анализ в непрерывном автоматическом режиме с дискретностью единичного измерения около 1 с.

Преимущества масс-спектрометрии перед газосорбционной хроматографией, основным конкурирующим методом, заключаются в экспрессности выполнения анализа, малом потреблении и низкой стоимости расходных материалов, быстром и простом переключении в течение нескольких минут с одной аналитической задачи на другую (например, анализ примесей кислорода дутья и определение состава отходящих газов при кислородно-конвертерном производстве), простоте эксплуатации и обслуживания. Сравнительный анализ преимуществ МС в скорости, точности измерений и динамическом концентрационном диапазоне перед методами ГХ и ИК-спектрометрии при измерениях

<sup>1</sup> Материал публикуется на правах рекламы.

<sup>2</sup> ЗАО “МЕТТЕК”, Санкт-Петербург, Россия.

<sup>3</sup> Всероссийский научно-исследовательский институт метрологии им. Д. И. Менделеева, Санкт-Петербург, Россия.

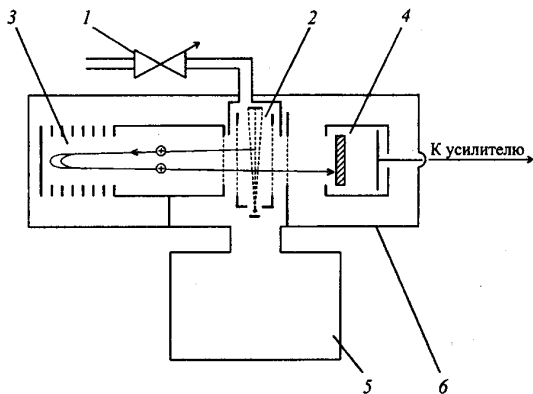


Рис. 1. Схема масс-спектрометра: 1 — узел напуска натекателя; 2 — камера изолированного источника ионов; 3 — блок отражателя; 4 — детектор (микроканальная пластина); 5 — магниторазрядный вакуумный насос; 6 — камера масс-спектрометра

в режиме on-site (анализ непосредственно на месте отбора проб) проведен также в обзоре [4].

Основу газоанализатора “ЭМГ-20” составляет времяпролетный масс-спектрометр типа масс-рефлектор (рис. 1) с ионизацией молекул анализируемой газовой смеси электронным ударом (энергия электронов 100 – 120 эВ). Принцип действия масс-спектрометра заключается в разделении ионов по массам в зависимости от времени их пролета в бесполеовом пространстве дрейфа. К достоинствам времяпролетных масс-спектрометров относят быстроедействие (время одного цикла измерения 0,1 – 2 с), возможность за один цикл проанализировать весь масс-спектр исследуемой пробы, что обеспечивает высокую стабильность результатов измерений, а также делает возможной регистрацию быстропротекающих процессов.

В газоанализаторе “ЭМГ-20” анализируемый газ через автоматически управляемый натекатель со стабилизацией температуры и давления поступающей газовой пробы подается в камеру масс-спектрометра, в которой с помощью магниторазрядного насоса создается высокий вакуум: рабочее давление составляет около  $1 \cdot 10^{-4}$  Па. Стабилизация пробы по температуре и давлению необходима для обеспечения независимости результатов измерений от внешних климатических условий и качества газовой пробы, а кроме того, дает возможность определять количественный состав компонентов газовой среды без частой градуировки прибора.

Использование безмасляной откачки позволило сократить потребляемую мощность прибора до 120 Вт, отказаться от принудительного охлаждения насоса и создать достаточно компактный прибор (масса 40 – 60 кг) с питанием от сети переменного тока с напряжением 220 В или постоянного тока — 27 В. Дополнительным преимуществом газоанализатора, связанным с отсутствием масла в камере масс-спектрометра, является то, что в масс-спектре нет остаточных пиков ионов — продуктов реакций диссоциации, ионизации компонентов масла. Соответственно повы-

шается точность результатов измерений, увеличивается срок службы детектора и элементов электронной и ионной оптики.

В источнике ионов осуществляется ионизация молекул анализируемого газа и образование положительно заряженных ионов, которые под действием электрического поля выталкиваются в пространство дрейфа. Все образованные ионы приобретают одинаковую потенциальную энергию  $W_n$ , которая полностью переходит в кинетическую, что позволяет получить простое выражение для зависимости времени пролета иона  $t$  от отношения его массы к заряду  $m/z$ :

$$W_n = zU = \frac{mv^2}{2}; \quad (1)$$

$$t = l\sqrt{\frac{m/z}{2U}}, \quad (2)$$

где  $U$  — напряжение на электродах ионного ускорителя источника ионов;  $v$  — скорость иона;  $l$  — длина пролета ионов от ионизационной камеры до детектора.

Согласно формуле (2) разность  $\Delta t = t_2 - t_1$  для двух ионов с соседними значениями  $m/z$  тем больше (тем выше разрешение масс-спектрометра), чем больше величина  $l$ . Для обеспечения максимального значения  $t$  камера источника ионов расположена около детектора, а ионы “выталкиваются” в противоположную сторону, где находится блок отражателя, осуществляющий фокусировку и разворот ионов в направлении детектора. Разрешение масс-спектрометра  $R$  оцениваемое по ширине пика  $\Delta m$  массой  $m$  на высоте 50% от максимальной интенсивности, для газоанализатора “ЭМГ-20” составляет не менее 200 отн.ед.:

$$R = m/\Delta m = t/2\Delta t. \quad (3)$$

Существенным отличием масс-спектрометра газоанализатора “ЭМГ-20” от масс-спектрометров приборов аналогичного типа, например анализатора “ФТИ-АН-3”, является отсутствие дополнительного ускоряющего напряжения в источнике ионов, что существенно упрощает конструкцию и повышает надежность работы прибора. Для уменьшения погрешности анализа, обусловленной наличием обратного потока газов из магниторазрядного насоса в камеру масс-спектрометра, разработана оригинальная конструкция изолированного источника ионов [5]. Эффективность работы устройства достигается за счет создания перепада давления между источником ионов и вакуумным насосом. Более высокий вакуум, в котором работают насос, детектор, отражатель и электронная пушка, позволяет увеличить время непрерывной работы магниторазрядного насоса без отжига, повысить сроки службы катода электронной пушки и микроканальной пластины детектора, а также снизить уровень фона от детектора и продуктов взаимодействия на катоде.

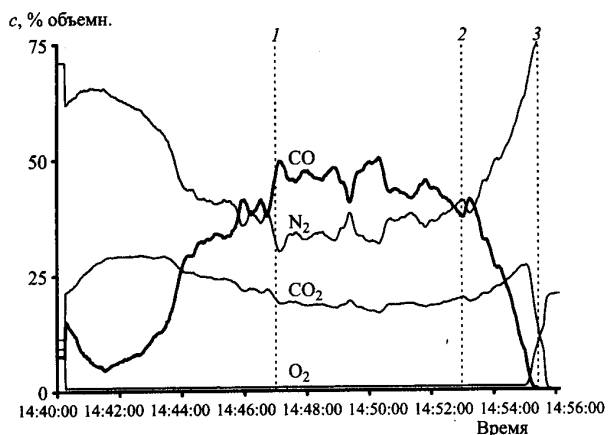


Рис. 2. Результаты газового анализа при проведении плавки в кислородном конвертере («архив плавки»)

В качестве детектора применяется микроканальная пластина, электрические импульсы с которой поступают на усилитель, а затем в систему регистрации, где происходит их преобразование в сигналы постоянного тока и оцифровка. Регулировка напряжения микроканальной пластины позволяет изменять относительную чувствительность для регистрируемых ионов. При измерениях малых концентраций (менее 0,1% объемн.) используется режим счета ионов, позволяющий в 1000 раз повысить точность измерений по сравнению с аналоговым режимом. Предел обнаружения определяемых компонентов при счетном режиме составляет 2 ppm ( $2 \cdot 10^{-4}\%$  объемн.).

Сигналы в оцифрованном виде поступают на ЭВМ и обрабатываются по специальной программе. Результаты анализа отображаются на жидкокристаллическом дисплее приборной стойки и мониторе ЭВМ газоанализатора в графическом и цифровом видах (рис. 2) и могут передаваться по локальной сети к внешним системам (например, на пульт оператора, сервер АСУ и т.д.):

«ЭМГ-20»	Зав. № 04		Конвертер № 2			
Оператор Сергеев	Плавка 25.08.99		Время: 14:47:00			
Компонент	N <sub>2</sub>	CO	N <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Ar	CO <sub>2</sub>
с, % объемн.	0,29	46,68	32,30	0,78	0,48	19,80

Приведенные в табличной форме данные «текущего» измерения количественного состава конвертерных газов соответствуют моменту времени, отмеченному вертикальной пунктирной линией 1. Ход кривых содержания CO и CO<sub>2</sub> между вертикальными линиями 2 и 3 позволяет проводить прогнозирование углеродного состава стали с использованием выражения (6).

Газоанализатор «ЭМГ-20» обладает оригинальной системой регистрации и обработки масс-спектров, которая обеспечивает в реальном масштабе времени обработку однократных разверток масс-спектров (оценку площадей пиков отдельных ионов) и усреднение

получаемых частных оценок. При этом возможен просмотр в развертке спектра до 1024 одновременно присутствующих масс. Использование современных технологий (многослойных печатных плат, микросхем высокой интеграции) позволило реализовать систему регистрации и обработки в виде единого компактного блока (170 × 110 × 60 мм; масса 350 г), который может найти применение в мобильных, автономных или портативных приборах.

В настоящее время приборы «ЭМГ-20», представляющие собой новое поколение промышленных газоанализаторов масс-спектрометрического типа, заметно потеснили приборы «ФТИАН-3», применявшиеся для контроля технологических процессов в металлургическом производстве. Основные преимущества анализатора «ЭМГ-20» по сравнению с «ФТИАН-3» заключаются в более высоких показателях надежности, степени автоматизации и простоте эксплуатации в промышленных условиях. Превосходство газоанализатора «ЭМГ-20» обеспечивается применением безмасляной откачки с помощью магнитоэлектрического насоса в отличие от прибора «ФТИАН-3», где используются форвакуумный и паромасляный насосы, упрощенной, оригинальной схемой ионной оптики и компоновки масс-анализатора, использованием более современной электроники.

Для проведения количественного анализа необходима предварительная градуировка газоанализатора по градуировочным газовым смесям, соответствующим составу анализируемой газовой пробы. При градуировке определяются коэффициенты относительной чувствительности анализируемых компонентов, вклады в массовые пики влияющих компонентов, а также нулевой сигнал системы регистрации и фон масс-спектрометра. Баллоны с градуировочными смесями крепятся на специальной стойке, входящей в комплект газоанализатора. Подача газовых смесей и градуировка осуществляются автоматически по заранее заданной оператором компьютерной программе.

Важной частью газоаналитической системы на основе газоанализатора «ЭМГ-20» является система пробоотбора и пробоподготовки, которая изготавливается в зависимости от конкретной задачи анализа с привязкой по месту установки газоаналитического оборудования. Общая схема размещения информационно-измерительного комплекса на базе газоанализатора «ЭМГ-20» при контроле технологического процесса кислородно-конвертерного производства представлена на рис. 3. Система пробоотбора и пробоподготовки обеспечивает отбор с помощью термостойких (до 1500 °С) водоохлаждаемых газоотборных зондов, транспортировку газовых проб по обогреваемым гибким линиям, фильтрацию и осушение пробы, автоматическое переключение транспортных линий от точек отбора (до 12 независимых точек отбора и линий транспортировки проб) и подачу газовой пробы в систему напуска газоанализатора «ЭМГ-20». Для очистки

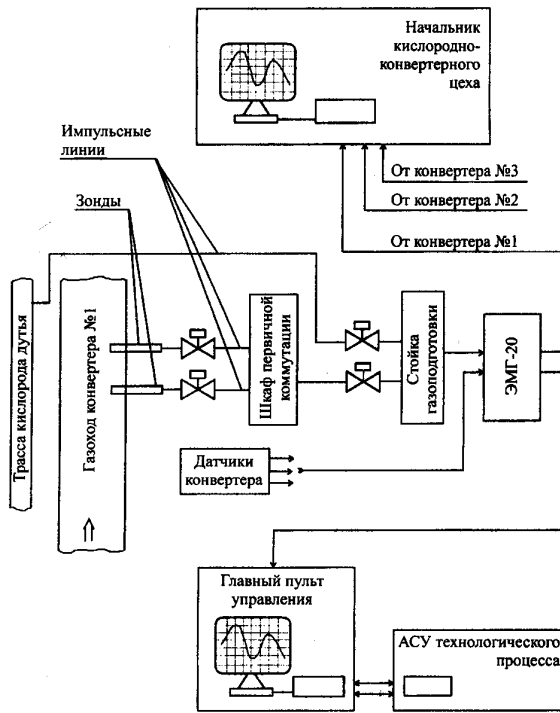


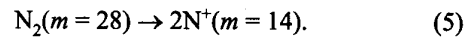
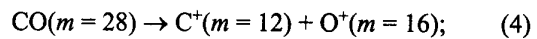
Рис. 3. Схема размещения информационно-измерительного комплекса на базе газоанализатора “ЭМГ-20” в кислородно-конвертерном цехе

фильтров применяется их обратная продувка воздухом. Управление устройствами системы пробоотбора и пробоподготовки осуществляется автоматически с помощью встроенного в газоанализатор компьютера. Использование двух параллельно работающих насосов и транспортировка газовой пробы под небольшим избыточным давлением позволили значительно снизить инерционность газоаналитической системы. Общее время транспортного запаздывания (время отклика на входной сигнал) для длины линии транспортировки газовой пробы 40 – 50 м составляет не более 12 с, а постоянная времени инерции — не более 1,5 с. Данные характеристики удовлетворяют жестким требованиям, предъявляемым к газоаналитической системе для обеспечения технологического контроля за процессом плавки в кислородном конвертере, и позволяют моделировать и воспроизводить происходящие в конвертере процессы без потери динамики по результатам экспериментальных измерений.

Аналитические возможности газоанализатора “ЭМГ-20” рассмотрим на примере решения задачи газового анализа при контроле технологического процесса кислородно-конвертерного производства. Типичный масс-спектр отходящих конвертерных газов представлен на рис. 4. Как видно из рис. 4, массе 28 а.е.м. соответствуют два молекулярных пика, относящихся к CO и N<sub>2</sub>. Для того, чтобы разделить эти пики и проводить количественные измерения, необходимо иметь масс-спектрометр с разрешением ( $m/\Delta m$ ), равным не-

скольким тысячам. Также, кроме объединенного молекулярного пика, имеются пики, соответствующие массам 14 (ион N<sup>+</sup> или молекулярный ион N<sub>2</sub><sup>2+</sup>) и 12 (ион C<sup>+</sup>). Это позволяет с помощью газоанализатора “ЭМГ-20”, имеющего меньшее разрешение, количественно определять азот и оксид углерода при их совместном присутствии в газовой смеси. При настройке и градуировке прибора определяют соотношения пиков азота (14 и 28 а.е.м.) и оксида углерода (12 и 28 а.е.м.), коэффициенты чувствительности для аналитических линий ( $m/z = 12$  и  $m/z = 14$ ) с учетом взаимных вкладов CO и N<sub>2</sub> друг в друга соответственно.

Появление пиков, соответствующих массам 14 и 12, обусловлено тем, что в камере ионизации под действием электронного удара идут следующие реакции диссоциации молекул:



Анализируемые компоненты отходящих конвертерных газов и массы, по которым они определяются, приведены ниже:

Компонент	Масса	Измеряемая масса	Мешает определению
H <sub>2</sub>	2	2	—
CO	28	12	N <sub>2</sub>
N <sub>2</sub>	28	14	—
O <sub>2</sub>	32	32	CO <sub>2</sub> , CO
Ar	40	40	—
CO <sub>2</sub>	44	44	CO

В таблице представлены результаты измерений объемной концентрации компонентов отходящих конвертерных газов в многокомпонентных поверочных

Результаты анализа поверочных газовых смесей, % объемн. ( $n = 10$ )

Компонент	Содержание в ПГС		Стандартное отклонение
	аттестованное	измеренное значение*	
H <sub>2</sub>	4,45	4,45	0,05
CO	20,75	20,86	0,11
N <sub>2</sub>	49,51	49,56	0,09
Ar	0,99	0,93	0,01
CO <sub>2</sub>	24,30	24,19	0,05
H <sub>2</sub>	0,50	0,62	0,04
N <sub>2</sub>	26,82	26,51	0,04
O <sub>2</sub>	24,19	24,42	0,03
Ar	2,09	2,04	0,004
CO <sub>2</sub>	46,40	46,61	0,03

\* Приведены средние результаты для 10 параллельных измерений.

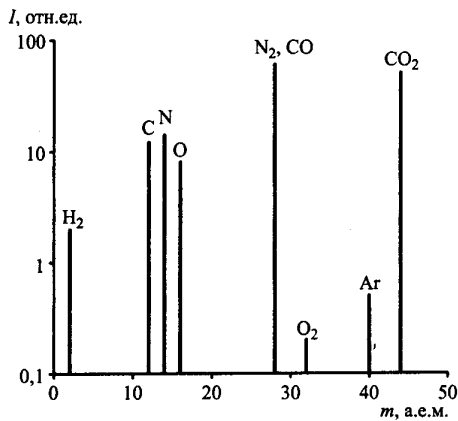


Рис. 4. Регистрируемый масс-спектр отходящих конвертерных газов. Относительная интенсивность  $I$  линий спектра соответствует типичному количественному составу конвертерных газов при проведении плавки

газовых смесях (ПГС), используемых для градуировки и поверки газоанализатора, периодического контроля точности измерений. Концентрации компонентов приведенных газовых смесей соответствуют среднему количественному составу отходящих конвертерных газов. Погрешность аттестации для каждого компонента ПГС не превышает 0,05% объемн.

Кроме непрерывного контроля в процессе плавки количественного состава отходящих конвертерных газов (см. рис. 2), периодически (один раз за плавку) проводится анализ примесей кислорода дутья — аргона и азота:

Компонент	с, % объемн.
Ar	0,132
N <sub>2</sub>	0,092
O <sub>2</sub>	99,78

Газоанализатор “ЭМГ-20” обеспечивает получение результатов измерений содержания Ar и N<sub>2</sub> с абсолютной погрешностью, не превышающей 0,005% объемн., и стандартным отклонением 0,002 – 0,005% объемн. ( $n = 10$ ) в диапазоне от 0,01 до 0,5% объемн. Предел обнаружения для обоих определяемых компонентов, рассчитанный по  $3\sigma$ -критерию, составляет 0,005% объемн.

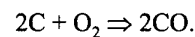
При конвертерном производстве стали основным металлургическим процессом является окисление углерода, находящегося в чугунах на уровне 3,5 – 5,0% масс., кислородом дутья; образующиеся оксиды CO и CO<sub>2</sub> выносятся через отводящий газовый тракт. Концентрация углерода в получаемой стали в зависимости от марки находится в интервале от 0,03 до 0,2% масс. По скорости спада концентрации оксида углерода  $c_{CO}$  в отходящих газах в конце продувки оператор прогнозирует состав получаемой стали и тем самым обеспечивает необходимые технологические параметры работы конвертера. Данное прогнозирование осно-

вано на результатах математического моделирования процесса конвертерного производства.

В литературе, например в работах [6, 7], описаны различные математические модели процессов конвертерного производства. На практике в основном применяется интегральный метод прогнозирования процентного состава углерода в стали, требующий выполнения количественного химического анализа чугуна к началу продувки. Альтернативным, более экспрессным и эффективным является дифференциальный (“хвостовой”) метод, базирующийся на определении скорости обезуглероживания в процессе продувки кислородом:

$$\frac{dc_{CO}}{dt} = kc_{CO}, \quad (6)$$

где  $t$  — время процесса;  $k$  — константа скорости химической реакции



Применение последнего метода тем надежнее и эффективнее, чем выше правильность и воспроизводимость результатов газового анализа. Как показывают расчеты и опыт промышленной эксплуатации газоаналитических систем в конвертерных цехах, абсолютная погрешность определения CO и CO<sub>2</sub> в отходящих конвертерных газах должна быть не более 0,1 – 0,2% объемн. Такая точность измерений позволяет прогнозировать состав получаемой стали по углероду с погрешностью 0,002% масс. для низколегированных сталей и 0,005% масс. для среднелегированных. Как видно из представленных в таблице результатов определения объемной концентрации компонентов ПГС, метрологические характеристики газоанализатора “ЭМГ-20” соответствуют требованиям по погрешности измерений, необходимым для достоверного прогноза.

Увеличение точности дифференциального метода прогнозирования качества выпускаемой стали обеспечивается также проведением анализа примесей кислорода дутья. Измерения осуществляются с определенной временной задержкой, учитывающей длину трассы кислорода дутья и линии пробоотбора, так, чтобы результат количественного анализа соответствовал составу примесей кислорода дутья, поступающего в конвертер при плавке. Повышенное содержание азота в кислороде может приводить к процессу “азотирования” стали, что значительно ухудшает ее вязкость и другие физико-механические характеристики, повышает пористость изделий.

Анализ состава отходящих конвертерных газов в динамическом режиме (см. рис. 2), кроме прогнозирования углеродного состава получаемой стали, позволяет выполнять следующие операции технологического контроля работы конвертера:

определять момент зажигания плавки по скорости начального роста концентрации CO;

контролировать:

по графику изменения концентрации  $H_2$  степень усвоения извести и предотвращать аварии вследствие накопления  $H_2$  в газоходе при прорыве воды из системы охлаждения продувочной кислородной фурмы;

по графику изменения концентрации  $O_2$  герметичность газохода во время продувки и степень разрежения конвертера.

Газоаналитические системы на основе газоанализатора “ЭМГ-20” успешно эксплуатируются в кислородно-конвертерных цехах металлургических предприятий гг. Караганды, Липецка, Магнитогорска, Нижнего Тагила, Новокузнецка. Внедрение газоанализаторов типа “ЭМГ-20” и ведение архивов плавков привело к появлению нового метода работы — “по кальке”, когда оператор конвертера из любой смены должен проводить каждую плавку в соответствии с некоторой диаграммой газового анализа, отражающей оптимальный технологический цикл конвертера.

Кроме рассмотренного выше варианта применения газоанализатора “ЭМГ-20” для контроля и управления технологическими процессами при кислородно-конвертерном производстве, прибор может использоваться в других отраслях металлургии. В доменном производстве чугуна газоанализатор позволяет контролировать степень использования восстановительных газов и калорийность колошникового газа, регулировать тепловой режим и параметры комбинированного дутья, предупреждать взрывоопасные ситуации, сокращать удельный расход энергоресурсов (кокс, электроэнергия и др.). В пирометаллургическом производстве меди и никеля обеспечивается возможность контроля динамики изменения состава газовой фазы в автогенных процессах, расчета коэффициента усвоения кислорода, регулировки теплового режима плавильных печей, контроля герметичности (“подсосов”) и стабилизации содержания сернистого ангидрида для производства серной кислоты или серы. При очистке и утилизации промышленных выбросов кислородно-конвертерного и доменного производств осуществляется анализ отходящих газов на содержание оксидов углерода. При малых содержаниях анализи-

руемых компонентов (не превышающих допустимых норм по экологическим требованиям) отходящие газы непосредственно поступают в атмосферу, при средних содержаниях газы проходят фильтрацию, а при высоких содержаниях направляются на производство угольной кислоты.

Перспективность и целесообразность применения в металлургии газоаналитических систем на базе газоанализатора “ЭМГ-20” обеспечиваются высокими техническими, аналитическими и метрологическими характеристиками прибора, который позволяет решать разнообразные задачи газового анализа. В 1998 г. газоанализатор “ЭМГ-20” успешно прошел Государственные метрологические испытания и внесен в Госреестр РФ средств измерений.

Другими перспективными направлениями использования газоанализаторов “ЭМГ-20” являются контроль газовой фазы и эффективности сгорания топлива на тепловых электростанциях, состава природного газа при его добыче, транспортировке, сжижении и других видах переработки, микропримесей при производстве технического кислорода, азота и аргона, атмосферных выбросов атомных электростанций. Кроме того, прибор может применяться при проведении геологоразведочных работ и экологического мониторинга, на предприятиях микроэлектроники в вакуумных процессах получения особо чистых монокристаллов Si и Ge, при исследовании высокомолекулярных соединений, устойчивых радиоизотопов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Workman J., Velkamp D. J., Doherty S. et al. / Anal. Chem.* 1999. V. 71. № 12. P. 121R – 180R.
2. *Hool K., Bredeweg R., Lefevor D., LaPack M. A. and Wright L. / NIST Spec. Publ.* 1995. № 865. P. 65 – 70.
3. *Kotiaho T. / J. Mass. Spectrom.* 1996. V. 31. № 1. P. 1 – 15.
4. *Walsh M. R. and LaPack M. A. / ISA Trans.* 1995. V. 34. № 1. P. 67 – 85.
5. Патент 2103763 / Бюллетень изобретений. 1998. № 3.
6. *Мамырин Б. А. / Вестник АН СССР.* 1986. № 3. С. 29.
7. *Туркенич В. М. Автоматизация конвертерного производства.* — М.: Металлургия, 1972.