

А. Н. Бушуев, Е. Б. Шабловская

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ДОЖИГАНИЯ ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ, ОБРАЗУЕМЫХ ПРИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОМ ПОДОГРЕВЕ ЗАГРЯЗНЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ЛОМА ГАЗАМИ УМЕРЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ В ЭЛЕКТРОСТАЛЕПЛАВИЛЬНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ

Ключевые слова: диоксины, дожигание вредных выбросов, металлический лом, электросталеплавильное производство.

Рассмотрены основные закономерности образования и сгорания попутных газов (углеводородов и иных соединений) за счет термического распада примесей в металлическом ломе при предварительном подогреве отходящими газами газотурбинной установки. Предложен один из наиболее эффективных вариантов решения крупнейшей экологической проблемы металлургии образования диоксинов и фуранов, заключающийся в высокотемпературном дожигании загрязненного потока газов с попутной высокоэффективной выработкой энергии в паровом котле-утилизаторе. Приведена функциональная зависимость от времени и температуры горения и построено числовое поле требуемой подачи природного газа на дожигание потока газов.

Key words: dioxines, afterburning of harmful emission, scrap-iron, electric steel making.

Basic patterns of formation and burning of associated gases (hydrocarbons and other units) due to thermal decomposition of admixtures in scrap-iron while pre-heating with exhausting gases of gas-turbine unit are considered. One of the most effective variants is offered of solving the major ecological problem in metallurgy – that of the formation of dioxins and furans, represented in high temperature afterburning of impure stream of gases alongside with highly effective energy production in steam utilizing boiler. The functional dependence is given of the time and the temperature of burning and the digital field is built of the demanding supply of natural gas for the afterburning of the stream of gases.

Введение

Важнейшей и абсолютно нерешенной экологической проблемой работы дуговых сталеплавильных печей (ДСП), на которую обратили внимание более 2-х десятилетий назад, является загрязнение отходящих от них газов стойкими органическими загрязнителями, наиболее токсичными из которых являются диоксины (полихлордibenзодиоксины ПХДД или PCDD) и фураны (полихлордibenзофураны ПХДФ или PCDF). Диоксины приобрели репутацию самых токсичных соединений, известных человеку. Предельно допустимая концентрация в атмосферном воздухе (ПДК) для диоксинов и фуранов в России установлена равной 0,5 пг/м³. В некоторых зарубежных странах допустимый уровень для ДСП установлен 0,1 пг/м³ [1].

При выплавке стали в дуговых печах в качестве дополнительных источников энергии широко используются топливно-кислородные горелки, которые располагаются на своде, стенах или вводятся через рабочее окно печи. Кроме того, большое распространение получил с 80-х годов предварительный подогрев шихты на отдельных установках с помощью горелок или за счет использования тепла отводимых от печей газов.

На первом этапе развития систем предварительного подогрева металлического лома, как в России, так и за рубежом, получил способ подогрева отходящими газами в загрузочных бадах. Однако, обычные бады подвергаются значительному износу в силу высоких температур рабочей среды (отходящих газов ДСП) и их значительному колебанию. Также многие элементы систем подогрева шихты (СПШ), использующие в качестве греющей среды отходящие газы ДСП, требуют применения водоохлаждаемых элементов,

что приводит к дополнительным тепловым потерям до 30 % [2].

Источниками образования сверхтоксичных соединений при нагреве металлического лома выступают органические примеси – различные полимеры, эмали и нефтяные масла, содержащиеся в ломе. При разложении полимеров образуются следующие продукты:

- 1) горючие газы (метан, этан, этилен, формальдегид, ацетон, оксид углерода и др.);
- 2) негорючие газы (диоксид углерода, галогеноводороды, азот и др.);
- 3) жидкие продукты (разрушенный до олигомерных производных полимер);
- 4) твердый остаток (уголь, осколки полимера, дым).

Большое влияние на процесс оказывает соотношение между горючими и негорючими продуктами разложения, температура начала разложения, экзо- или эндотермический характер процесса. Состав продуктов разложения зависит от состава полимерного материала, температуры и скорости нагрева, скорости отвода летучих продуктов пиролиза.

Авторами рассматривается закономерность образования попутных газов при предварительном подогреве металлического лома газами умеренной температуры (не более 550 - 600 °С). В качестве источника такого теплоносителя может служить газотурбинная установка, выступающая в роли индивидуального энергоисточника процесса выплавки стали в ДСП, что чрезвычайно актуально как с точки зрения энергосбережения, так и с точки зрения экологии. Переход к такому варианту энергообеспечения подразумевает снижение износа отдельных узлов шахты или бады из-за высокой температуры газов, допускает полный отказ от

водяного охлаждения в силу относительно низкой температуры выхлопных газов газовой турбины (в пределах 550 °С) и, прежде всего, система подразумевает установку парового котла-утилизатора (КУ).

Установка КУ в такой системе может обеспечить выполнение основных предъявляемых требований эффективного дожигания загрязненного потока газов после подогрева металлического лома. Обобщение литературных данных, а также данных экспериментальных исследований и расчетов многих авторов, в частности [3, 4, 6, 7], позволили установить, что для обеспечения эффективного дожигания технологических газов необходимо соблюдение следующих основных условий: камера дожигания и выдержки должна быть футерована, температура - более 1200 °С, режим смешения газов – высокотурбулентный, струйный, избыток кислорода не менее 2 % и фактическая длительность выдержки продуктов горения при той же температуре – не менее 2 с. Котел-утилизатор полностью соответствует указанным требованиям.

Установление энергетического равновесия в системе типа «ГТУ – СПШ – КУ» требует подробного изучения образования дополнительных газов в промежуточном звене между ГТУ и КУ – в СПШ, поскольку образование дополнительных газов, особенно токсичных соединений (диоксинов, бензапирена) требует дополнительных энергетических затрат на высокотемпературное дожигание газов, заключающееся в добавлении к потоку некоторого количества топлива – природного газа.

Цель работы заключается в установлении функциональной зависимости требуемого количества природного газа на дожигание отходящих газов за системой подогрева лома от основных параметров системы, типа примесей в ломе и продолжительности технологического процесса выплавки стали.

Среднестатистический состав примесей в металлоломе

Примем наличие на поверхности металлолома восьми основных марок эмалей, используемых для покраски автомобилей и многих металлических конструкций – ПФ-178, ПФ-223, МЛ-1156, АС-1156, АС-1171, В-АС-1373, КО-821, КО-5140.

Нелетучая часть большинства эмалей состоит из суспензии СВП в растворе коллоксилина, алкидной смолы резинового типа и пластификаторов. Летучая часть состоит из активных высококипящих и низкокипящих растворителей, этилового и бутилового спиртов, разбавителей - толуола, ксилола и тяжелого растворителя.

Разложение (деструкция) лакокрасочных продуктов происходит при температуре 120 – 150 °С. Лакокрасочные покрытия на металле при умеренной температуре газовой среды (до 550 °С) сгорают примерно на 50% [8]. Учитывая данный факт, примем, что термическая деструкция

лакокрасочных покрытий в рассматриваемом случае приводит к образованию продуктов, схожих с летучими для каждой марки эмали.

Также допустим, что все твердые примеси в металлоломе представлены следующими основными полимерами [9]:

1) политетрафторэтилен (тефлон) – вид пластмассы, широко используемый в технике и быту;

2) полиэтилен – полимер, наиболее широко используемый при производстве пленок, труб, емкостей, стройматериалов, волокон, деталей автомобильной и иной техники, пенопозилена, изоляции электрокабелей;

3) полиэтилентерефталат – полимер, используемый в химической, электротехнической промышленности, в военных целях в качестве покрытий, является основой для термостойких пластмасс;

4) полистирол – один из самых распространенных полимеров;

5) поливинилхлорид – является основой для многих видов пластмасс, используемых и в быту, и в промышленности.

Для упрощения расчета также допустим, что большая доля иных твердых примесей в металлоломе аналогична по свойствам и поведению резине автомобильного корда.

Также не исключена возможность нахождения на поверхностях мелких кусков металлического лома (особенно на стружке) различных нефтяных масел, представляющих собой жидкие смеси высококипящих углеводородов (температура кипения 300—600 °С), главным образом алкилнафтяных и алкилароматических, получаемых переработкой нефти. По основным составляющим углеводородам минеральные моторные и трансформаторные масла достаточно близки по массовому составу. Основу большинства нефтяных масел составляют насыщенные и ароматические углеводороды.

Однако отработанные масла имеют несколько отличный от справочных данных состав и свойства – коксуемость отработанных масел составляет порядка 3-3,5%, зольность до 1%, содержание серы до 1,5% и механические примеси до 3,5-4% [10].

Массовое распределение продуктов термического распада примесей

Пусть масса эмали ПФ-178 составляет a кг, масса ПФ-223 – b кг, МЛ-1156 – c кг, АС-1115 – d кг, АС-1171 – e кг, В-АС-1373 – f кг, КО-821 – g кг, КО-5140 – h кг, также масса политетрафторэтилена составляет j кг, полиэтилена – k кг, полиэтилентерефталата – l кг, полистирола – m кг, поливинилхлорида – n кг, масса резины – p кг, масса нефтяных масел усредненного состава – q кг. Массовое распределение между продуктами деструкции рассматриваемых эмалей, полимеров и масел может быть сведено в таблицу 1 [8, 9, 11 - 17].

Таблица 1 – Продукты термического распада примесей в металлоломе

Продукт распада	Масса продукта	
	от полимеров	от эмалей
CO	0,000155j + 0,0267l + 0,01442n + 0,0351p	
CO ₂	0,000435j + 0,0456l + 0,0613p	
CH ₄	0,0023l + 0,00886n + 0,0111p	0,025e
C ₂ H ₂	0,0062l	
C ₂ H ₄	0,01145k + 0,00119m + 0,00886n	
C ₂ H ₄ O	0,41925l + 0,018464p	
C ₂ H ₆	0,03535k + 0,00886n + 0,0208p	
C ₂ H ₆ O	0,0144p	
C ₃ H ₆	0,02075k + 0,00886n	
C ₃ H ₆ O		0,12d
C ₃ H ₈	0,0619k + 0,00886n + 0,0305p	
C ₄ H ₈	0,131k + 0,00886n	
C ₄ H ₁₀	0,10535k	
C ₄ H ₉ OH		0,016c + 0,09e + 0,066f
C ₅ H ₁₂	0,1342k	
C ₆ H ₆	0,007623m + 0,02307n + 0,04448p	
C ₆ H ₁₀ O		0,0225e
C ₆ H ₁₂ O ₂		0,12d
C ₆ H ₁₄ O ₂		0,225e + 0,066f
C ₆ H ₅ CH ₃	0,009m + 0,04448p	0,432g
C ₈ H ₈	0,9605m	
C ₈ H ₁₀	0,0104m + 0,04448p + 0,02307n	0,46a + 0,134b + 0,0505c + 0,16d + 0,09e + 0,135h
C ₁₀ H ₈	0,04448p	
C ₁₀ H ₁₂		0,1375h
C ₁₀ H ₁₄	0,02307n	
C ₁₀ H ₁₆		0,1375h
C _{10,5} H ₂₁		0,171b + 0,1c
C ₁₂ H ₂₅ OH		0,0264f
C ₁₄ H ₁₀	0,04448p	
C ₂ F ₄	0,47785j	
C ₃ F ₆	0,02155j	
HCl	0,53n	
H ₂	0,0364n + 0,00612p	
CH ₃ NH ₂	0,1121p	

Рассматриваемые продукты термического распада полимеров и красок имеют различную температуру самовоспламенения, которая позволяет судить о том, произойдет ли возгорание и дальнейшее горение конкретного продукта в системе подогрева лома, или же образованный продукт распада вместе с потоком уходящих газов будет сожжен в газовой горелке котла-утилизатора. Принимая во внимание охлаждение газов при контакте с металлом, несмотря на начальную температуру выше 500 °С, можно предположить, что самовозгоранию в системе подогрева подвергаются только химические соединения с температурой самовоспламенения не более 420 °С [10].

Все углеводороды, подвергающиеся горению в системе подогрева лома, в целях упрощения расчетов, могут быть объединены общей формулой тяжелого углеводорода типа $C_m H_n O_p$,

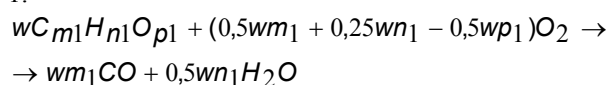
где $m_1 = 12,2147b + 8,008c + 6,204d + 16,3048e + 8,6248f + 10,11h + 16,585k + 19,5338l + 1,7216n + 4,126p + 63,664q$;

$n_1 = 24,4293b + 16,4483c + 12,408d + 38,8552e + 20,4354f + 16,176h + 40,5308k + 38,5906l + 2,41024n + 6,0566p + 115,102q$;

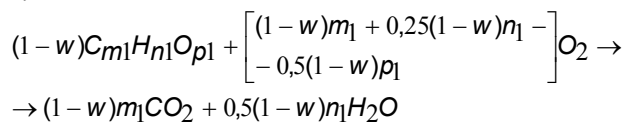
$p_1 = 0,2162c + 2,068d + 5,0296e + 2,1519f + 9,5284l + 0,73264p$.

В силу недостаточно высокой температуры рабочего газа и некоторых иных обстоятельств, принимаем факт недожога в размере w (в абсолютной доле). В таком случае горение протекает по двум реакциям:

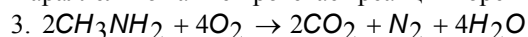
1.



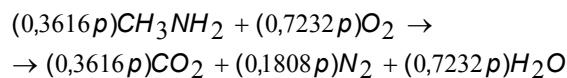
2.



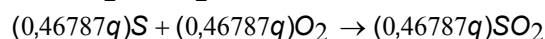
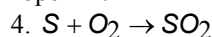
Параллельно также протекает реакция горения:



или



При принимаемой 1,5%-ой доле серы S в парах нефтяных масел протекает также и реакция горения:



Горение газовой смеси в котле-утилизаторе

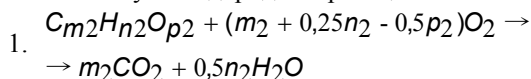
Смесь углеводородов, подвергающихся возгоранию при температурах свыше 420 °С в котле-утилизаторе, может быть представлена общей формулой смеси вида $C_{m2} H_{n2} O_{p2}$,

где $m_2 = 34,72a + 10,112b + 3,8112c + 18,2822d + 9,7321e + 32,872g + 20,612h + 18,2342k + 0,14375l + 76,02558m + 7,1624n + 17,802p$;

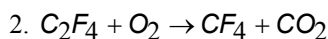
$n_2 = 30,992a + 12,64b + 4,764c + 39,916d + 17,036e + 37,568g + 25,244h + 41,6386k + 0,575l + 76,4046m + 11,5741n + 26,758p$;

$p_2 = 2,069d + 0,2296e$.

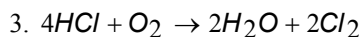
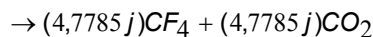
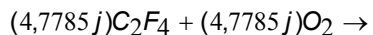
При обеспечении высокотурбулентного струйного режима перемешивания при горении в факеле котла-утилизатора принимаем факт полного окисления углеводорода по реакции:



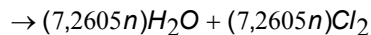
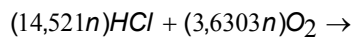
Параллельно при турбулентном перемешивании в факеле протекает горение соединений C₂F₄ и HCl по следующим реакциям:



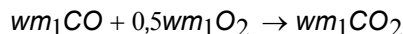
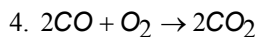
или



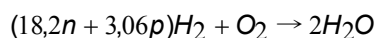
или



Также протекает реакция дожигания угарного газа, образованного в результате подогрева лома:



где $s = 0,00554j + 0,95357l + 0,515n + 1,2536p$



Расход природного газа, требуемый для повышения температуры механической смеси до задаваемой конечной температуры факела T в простом варианте может быть рассчитан через тепловой баланс, представляющий собой равенство суммы энергий поступающих продуктов на сжигание и энергии горящей смеси в факеле.

Пусть в факеле котельного агрегата в единицу времени (1 с) происходит смешение некоторого количества $M_{СПШ}$ газа известного состава, поступающего после системы подогрева шихты, требуемого количества природного газа $M_{ПГ}$, известного количества углеводорода $M_{УВ}$ и смеси прочих элементов, подвергающихся горению также в факеле котла $M_{ПР}$. Горение факела должно производиться при некотором избытке кислорода 2-4% в целях обеспечения полного термического разрушения диоксинов [3 - 6]. Тогда, в зависимости от задаваемой конечной температуры факела и первоначального химического состава газа после системы подогрева лома может потребоваться дополнительная подача воздуха к смеси $M_{\text{в}}$.

Дополнительное количество воздуха может быть выражено, как $M_{\text{в}} = v \cdot (M_{ПГ} - m)$, где m - количество природного газа, сжигаемого за счет кислорода, входящего в состав рабочих газов $M_{СПШ}$ после системы подогрева лома; v - коэффициент, учитывающий требуемое количество воздуха (г) на сжигание единицы (1 г) рассматриваемого природного газа.

Уравнение теплового баланса факела котла может быть записано [18, 19]:

$$\begin{aligned} & (M_{СПШ} + M_{ПГ} + v(M_{ПГ} - m) + M_{УВ} + M_{ПР}) \cdot I_{ДГ} = \\ & = M_{СПШ} I_{СПШ} + M_{УВ} I_{УВ} + M_{ПР} I_{ПР} + M_{ПГ} Q_H + \\ & + M_{УВ} Q_{УВ} + M_{ПР} Q_{ПР} + v(M_{ПГ} - m) \cdot I_{\text{в}} \end{aligned} \quad (1)$$

где $I_{ДГ}$ - энтальпия дымовых газов в факеле котла; $I_{СПШ}, I_{УВ}, I_{ПР}, I_{\text{в}}$ - энтальпия газовой смеси после системы подогрева, энтальпия смеси углеводородов,

поступающих на дожигание в котел, энтальпия смеси иных примесей в потоке газа и энтальпия подогретого воздуха (кДж/кг) соответственно; $Q_H, Q_{УВ}, Q_{ПР}$ - низшая теплота сгорания природного газа, смеси углеводородов и прочих примесей (кДж/кг) соответственно.

Задаваясь определенным химическим составом природного газа (по справочным данным газопровода «Бухара-Урал») [10] может быть определен коэффициент v по зависимости:

$$v = \frac{a}{0,2315 - O_2^{MIN}},$$

где a - показатель, определяемый непосредственно химическим составом сжигаемого газа, отображающий требуемое количество (кг) кислорода O_2 для полного сжигания газа; O_2^{MIN} - минимально допустимый процент содержания кислорода в воздухе при сжигании природного газа, который также в свою очередь выражается:

$$O_2^{MIN} = \frac{(1 + a) \cdot O_2^{MIN}}{a + O_2^{MIN}},$$

здесь O_2^{MIN} - задаваемый по техническим условиям минимальный процент избыточного кислорода в смеси продуктов сгорания. По условию полного сгорания диоксинов данный показатель должен лежать в пределах $O_2^{MIN} = 2 - 4\%$

В целях построения поля множества числовых значений требуемого расхода природного газа, зададим следующее массовое распределение (кг) между примесями в металлическом ломе: $a=b=c=d=e=f=g=h=0,32$; $j=0,2$; $k=l=m=0,2$; $n=0,3$; $p=3$; $q=3$.

В силу неравномерности процесса теплообмена, протекающего в системе подогрева лома, обоснованного неравномерным термическим распадом полимеров и эмалей и быстрым сгоранием паров масел, расчет требуемого количества природного газа на дожигание смеси необходимо проводить, как решение временной функции.

Термический распад полимеров и эмалей определяется множеством факторов, поэтому закономерность их распада может быть лишь приблизительно аппроксимирована полиномом третьей степени следующего вида:

$$\begin{aligned} s(\tau) = & 1,5766 \cdot 10^{-3} - 2,5161 \cdot 10^{-4} \cdot \tau + \\ & + 8,44 \cdot 10^{-7} \cdot \tau^2 - 2,3732 \cdot 10^{-10} \cdot \tau^3, \end{aligned} \quad (2)$$

где τ - время (с), определяющее продолжительность технологического процесса плавки стали под током и, следовательно, процесса нагрева лома в корзине. По среднестатистическим данным большинства металлургических заводов России, данный показатель в расчете можно задать в интервале 0-2400 с (40 мин).

Зависимость (2) выводилась по трем контрольным точкам начала и окончания процесса распада. При выводе функции подразумевался

равномерный распад смеси полимеров и эмалей, начинаемый через 350 с после подачи греющей среды в систему с ломом и завершаемый на 90% к 1800-й секунде процесса.

На основе функции (2) может быть получена зависимость доли разрушаемых полимеров на составляющие за 1 с от времени процесса:

$$r(\tau) = -2,5161 \cdot 10^{-4} + 8,4403 \cdot 10^{-7} \cdot (2\tau - 1) - 2,3732 \cdot 10^{-10} \cdot (3\tau^2 - 3\tau + 1) \quad (3)$$

График приведенной функции распада полимеров изображен на рис. 1. Функция (3) подразумевает значения, отличные от нуля при времени в периоде от 350 до 2200 с. При иных значениях времени распад примесей отсутствует, то есть $r(\tau)=0$.

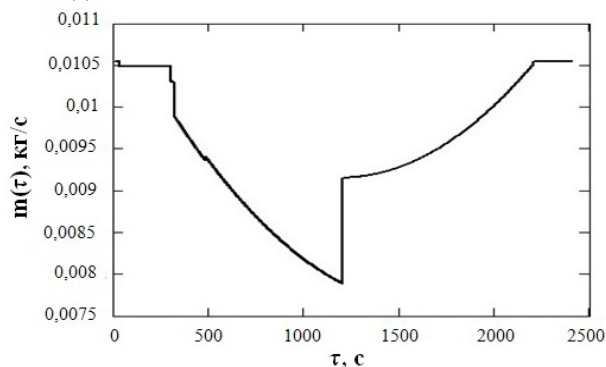


Рис. 1 – Временная зависимость $r(\tau)$ массы продуктов распада полимеров и эмалей

Сгорание паров нефтяных масел подразумевается по линейной зависимости, начинаемое на 6-й минуте и полностью заканчиваемое через 15 мин.

Требуемое количество природного газа $M_{пг}$ на дожигание потока газа и доведение температуры образуемой смеси до некоторой задаваемой T техническими условиями, может быть выражено из теплового баланса факела (1) при рассмотрении отдельных составляющих масс и энтальпий компонентов факела, как функций, зависящих от времени:

$$\begin{aligned} M(\tau, T) \cdot (Q_H - (1 + \nu) \cdot I_{дг}(\tau, T) + \nu I_{г}) = \\ = (M_{спш}(\tau) + M_{уе}(\tau) + M_{пр}(\tau)) \cdot I_{дг}(\tau, T) - \\ - M_{уе}(\tau) \cdot I_{уе}(\tau) - M_{пр}(\tau) \cdot I_{пр}(\tau) - M_{спш}(\tau) \cdot I_{спш}(\tau) - \\ - \nu m(\tau) \cdot (I_{дг}(\tau, T) - I_{г}) - M_{уе}(\tau) \cdot Q_{уе} - M_{пр}(\tau) \cdot Q_{пр} \end{aligned} \quad (4)$$

где τ - время, с; $M(\tau, T)$ - требуемая масса (массовый расход) природного газа, как функция времени и температуры T , задаваемой техническими условиями дожигания потока газов, кг/с; $M_{спш}(\tau)$ - временная функция массы (расхода) рабочего газа за системой подогрева металлического лома, кг/с; $M_{уе}(\tau), M_{пр}(\tau)$ - временные функции массы углеводородов и прочих примесей в потоке рабочего газа за системой подогрева лома, кг/с; $m(\tau)$ - временная функция массы природного газа, сжигаемого в факеле турбулентного горения за счет

кислорода в потоке рабочего газа $M_{спш}$; $I_{дг}(\tau, T)$ - энтальпия дымовых газов в факеле, как функция времени τ и температуры T , задаваемой техническими условиями дожигания потока газов; $I_{спш}(\tau), I_{уе}(\tau), I_{пр}(\tau)$ - временные зависимости энтальпии потока газов $M_{спш}$, углеводородов $M_{уе}$ и прочих примесей $M_{пр}$, поступающих на дожигание.

Значения энтальпий $I_{спш}(\tau), I_{уе}(\tau), I_{пр}(\tau)$ заданы как временные функции по причине зависимости от температуры t смеси газов за системой подогрева лома, которая в свою очередь представляет собой некоторую временную зависимость. При решении поставленной задачи определения зависимости $M(\tau, T)$ задана простая линейная зависимость изменения температуры t от времени типа $t(\tau) = 100 + 0,14167 \cdot \tau$, предполагающая температуру газов за системой подогрева лома равную 100°C в первоначальный момент времени и линейно увеличивающуюся на $0,14167^\circ\text{C}$ за 1 с. Данная зависимость предполагает в конце периода теплообмена ($\tau = 2400$ с) температуру на выходе, равную 440°C .

Величины $M_{спш}(\tau), M_{уе}(\tau), M_{пр}(\tau)$ приобретают временную зависимость в силу следующих обстоятельств:

1. $M_{спш}(\tau)$ представляет собой сумму греющих газов, поступающих в систему подогрева $M_{гту}$, являющихся постоянной величиной, и попутных соединений ($\text{N}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{CO}_2$), образуемых при горении продуктов распада примесей в металлоломе. Последние непосредственно определяют скорость и характер термического распада примесей в ломе, задаваемым временной зависимостью $s(\tau)$ (2). В проводимых расчетах значение величины $M_{гту}$ принимается равным $0,35$ кг/с на основании теплового расчета теплообмена между кусковым ломом и греющим газом начальной температуры 520°C .

2. Величины $M_{уе}(\tau), M_{пр}(\tau)$ также определяются характером термического распада примесей в ломе $s(\tau)$ (2).

Величина $m(\tau)$ представляет собой ежесекундный расход природного газа, подаваемого в факел на дожигание газов, сжигаемого только за счет кислорода в потоке рабочего газа $M_{спш}$. Величина определяется задаваемой по техническим требованиям процесса минимально допустимой массовой концентрацией кислорода O_2^{MIN} в продуктах сгорания по следующей зависимости:

$$m(\tau) = \frac{M_{спш}(\tau) \cdot \text{O}_2^{\text{ДОП}}(\tau)}{a}, \quad (5)$$

где $O_2^{ДОП}(\tau)$ - допустимо возможное использование кислорода в потоке газов $M_{СПШ}$ на сжигание природного газа, выражаемое в свою очередь, как:

$$O_2^{ДОП}(\tau) = O_2^{СПШ}(\tau) - O_2^{ув}(\tau) - O_2^{пр}(\tau) - O_2^{min}(\tau)$$

здесь $O_2^{СПШ}(\tau)$ - функциональная зависимость концентрации кислорода в потоке газов, отличная от первоначальной концентрации в греющей среде на величину, затрачиваемую на сгорание примесей и углеводородов с низкой температурой самовоспламенения, сгораемых непосредственно в системе подогрева металлического лома; $O_2^{ув}(\tau), O_2^{пр}(\tau)$ - временные функции понижения концентрации кислорода при сгорании углеводородов и прочих примесей в факеле котла-утилизатора; $O_2^{min}(\tau)$ - минимально допустимое снижение концентрации кислорода в потоке газа, выражаемое, как:

$$O_2^{min}(\tau) = \frac{a O_2^{MIN} \cdot \left(1 + \frac{O_2^{СПШ}(\tau)}{a} + M_{ув}(\tau) + M_{пр}(\tau) \right)}{a + O_2^{MIN}}$$

График функции $m(\tau)$ (5) приведен на рис. 2. При первоначально заданном массовом распределении между примесями в ломе, задаваемыми закономерностями их термического распада $s(\tau)$ и температурном изменении $t(\tau)$ данный показатель принимает граничные значения в пределах от $7,9 \cdot 10^{-3}$ до $10,54 \cdot 10^{-3}$ кг/с. Остальная требуемая доля природного газа для доведения конечной температуры дымовых газов в факеле до задаваемой по техническим условиям температуры T окисляется за счет дополнительной подачи воздуха в факел. При построении графика $m(\tau)$ показатель O_2^{MIN} принимался равным 0,04 (4 %).

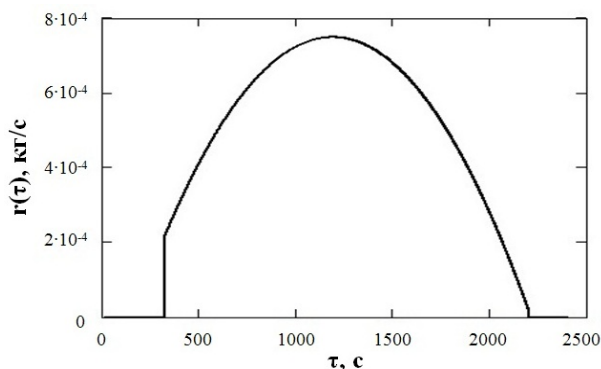


Рис. 2 – Временная зависимость $m(\tau)$ расхода природного газа, сжигаемого за счет кислорода, содержащегося в потоке газа

Приведенное выражение (4), полученное из теплового баланса факела, отображает полную подачу природного газа с учетом использования

допустимой доли кислорода $O_2^{ДОП}(\tau)$ в потоке газов и дополнительной затраты теплоты на подогрев воздуха, подаваемого в факел для дожигания избытка природного газа.

Числовое поле множества значений функции расхода газа $M(\tau, T)$, как зависимости от времени технологического процесса τ и задаваемой температуры T , приведено на рис. 3.

Числовые значения подачи природного газа соответствуют размерности 10^{-3} кг/с.

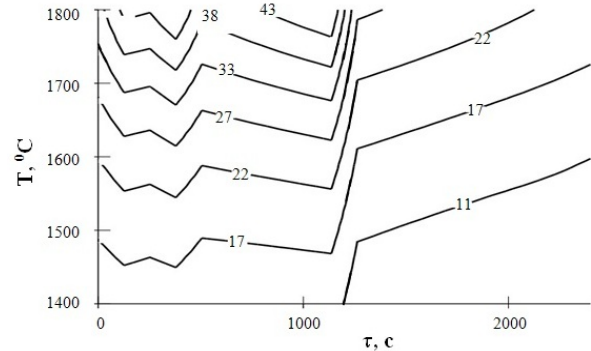


Рис. 3 – Числовое поле множества значений функции $M(\tau, T)$ подачи природного газа на дожигание турбулентного режима

График был построен при принятии коэффициента недожога в СПШ $w = 0,2$. Из графика видна переменность требуемой подачи природного газа по времени, особо проявляемая при постоянной температуре T . Требуемая подача резко понижается после 1200 с по следующим причинам:

1. В данный момент происходит увеличение значения функции $m(\tau)$, так как по заданной в начале расчета зависимости горения нефтяных масел в ломе, горение прекращается и, следовательно, повышается концентрация кислорода в потоке газа $O_2^{СПШ}(\tau)$.

2. В связи с прекращением горения масел понижается массовый расход газов после системы подогрева лома (рис. 4), что требует меньшего количества теплоты (следовательно, и сжигаемого топлива) для доведения температуры смеси до задаваемой T .

Колебания числовых значений функции расхода газа $M(\tau, T)$ в период $\tau = 0 - 500$ обусловлены испарением воды и таянием льда в ломе (попадание льда в лом неизбежно в зимний период), а фазовый переход воды в парообразное состояние оказывает заметное влияние на суммарную энтальпию потока газов, поступающих на дожигание в котел. По заданной зависимости таяние льда и испарение начинаются на 30-й секунде процесса и полностью прекращаются через 450 с, что и обуславливает колебание графика.

Резкие переломы графика временной зависимости $M_{СПШ}(\tau)$ (рис. 4) в первую половину временного периода обусловлены также испарением воды и льда и горением масла. Значения функции $M_{СПШ}(\tau)$ повышаются линейно за счет горения

масел до 1200 с согласно заданной линейной функции их горения.

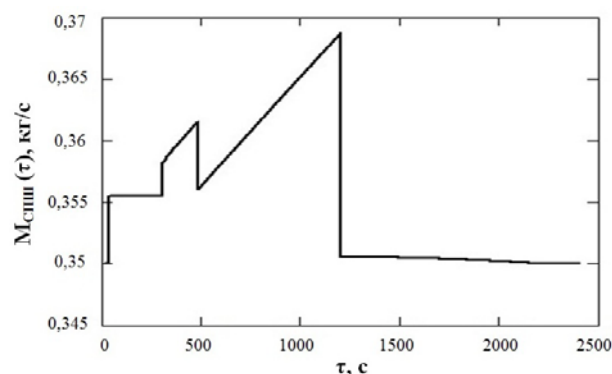


Рис. 4 – Временная зависимость $M_{СПШ}(\tau)$ расхода смеси газов после системы подогрева лома

Интегрирование функции $M(\tau, T)$ по времени при постоянной температуре T дает следующие результаты:

$$1) \int_0^{2400} M(\tau, 1500) = 34,192$$

$$2) \int_0^{2400} M(\tau, 1600) = 46,217$$

То есть суммарный расходный природного газа в расчете на 1 т лома за технологический промежуток плавки стали при требуемой температуре факела 1500°C составит 34,192 кг, при температуре 1600°C – 46,217 кг.

Заключение

В работе на основании литературного обзора проанализирована закономерность образования попутных газов в загрязненном металлическом ломе, подвергающемся предварительному подогреву перед плавкой теплоносителем умеренной температуры (в пределах 550°C). Отходящие газы после подогрева представляют собой сумму потока греющих газов и продуктов сгорания нефтяных масел в ломе, паров воды и продуктов горения некоторых продуктов термического распада полимеров с низкой температурой самовоспламенения (до 420°C). Закономерность количественного изменения суммарного потока газов представляет собой функцию временной зависимости, график которой представлен на рис. 4.

Рассмотрена двухпараметрическая зависимость (от времени процесса и температуры факела) требуемой подачи природного газа $M(\tau, T)$ в котел-утилизатор для полного дожигания потока газов в целях безвозвратного уничтожения диоксинов в потоке и полезной выработки энергии при утилизации.

При рассмотрении количественных показателей расхода потока газа и отдельных компонентов, используемых при решении зависимости (4), диоксины и фураны не

учитываются по причине чрезвычайно малой концентрации на единицу массы общего потока.

Дожигание потока газов в паровом котле полностью соответствует основным требованиям, предъявляемым возможным способам уничтожения диоксинов – в котле поддерживается температура выше 1200°C при турбулентном движении газов (и, соответственно, горении) в течение более 1 с и скорость понижения температуры в конвективной зоне котла также достаточно высока (менее 2 с), что позволяет утверждать, что предлагаемый вариант является высокоэффективным решением экологической проблемы электрометаллургии. Совместная работа ГТУ с паровым КУ в свою очередь решает проблему энергосбережения при электроснабжении такого энергоемкого производства, как электрометаллургического.

По оценочным расчетам (рис. 4) горение продуктов распада полимеров и эмалей непосредственно в системе предварительного подогрева лома не оказывает значительного влияния на количественный показатель $M_{СПШ}(\tau)$ общего потока газов. Например, после 1200 секунды данный показатель выше первоначального расхода греющего агента при поступлении в систему $M_{ГТУ}$ менее, чем на 0,15 %. При горении масел в ломе в промежуток времени 300 – 1200 с показатель суммарного расхода смеси газов за системой подогрева превышает первоначальный показатель $M_{ГТУ}$ максимум на 5% в момент $\tau = 1200$ с. Среднее превышение в рассматриваемый период составляет не более 2%, что позволяет утверждать о пренебрежимо малом воздействии побочных продуктов горения примесей в ломе на характер и скорость движения газов в подогреваемом ломе.

Литература

1. Перечень и коды веществ, загрязняющих атмосферный воздух, Петербург – XXI век, С-Петербург, 2000, 320 с.
2. А.В. Рябов, Современные способы выплавки стали в дуговых печах: учебное пособие, Теплотехник, Москва, 2007, 192 с.
3. А.Г. Юдин, Л.А. Шульц, Условия образования и полной деструкции диоксинов и фуранов при сжигании галогеносодержащих отходов (Часть 1) // Экология и промышленность, 2009, №9, С.33-37.
4. А.Г. Юдин, Л.А. Шульц, Условия образования и полной деструкции диоксинов и фуранов при сжигании галогеносодержащих отходов (Часть 2) // Экология и промышленность, 2009, №10, С.50-53.
5. Г.Н. Еланский, М.Н. Медведев, Диоксины – экологическая опасность // Сталь, 2000, №2, С.82-86.
6. М.Ю. Кочнов, Л.А. Шульц, Ю.М. Кочнов, Повышение эффективности дожигания и охлаждения технологических газов крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // Известия вузов. Черная металлургия, 2009, №11, С.49-55.
7. М.Ю. Кочнов, Л.А. Шульц, Ю.М. Кочнов, Анализ экологических показателей загрязнения атмосферного воздуха при работе крупнотоннажных дуговых сталеплавильных печей // Известия вузов. Черная металлургия, 2010, №5, С.59-67.
8. Р.М. Асеева, Г.Е. Заиков, Горение полимерных материалов, Наука, Москва, 1981, 280 с.

9. С. Мадорский, Термическое разложение органический полимеров, Мир, Москва, 1967, 328 с.
10. В.Н. Бакулин, Газовые топлива и их компоненты. Свойства, получение, применение, экология: справочник, Издательский дом МЭИ, Москва, 2009, 614 с.
11. Э.Ф. Ицко, Удаление лакокрасочных покрытий, Химия, Ленинград, 1991, 96 с.
12. М.Л. Лившиц, Б.И. Пшиялковский, Лакокрасочные материалы: справочное пособие, Химия, Москва, 1982, 360 с.
13. К.С. Минскер, Г.Т. Федосеева, Деструкция и стабилизация поливинилхлорида, Химия, Москва, 1979, 272 с.
14. Энциклопедия полимеров, ред. коллегия: В.А. Каргин [и др.], Т.1, Советская Энциклопедия, Москва, 1972, 1222 с.
15. Энциклопедия полимеров, ред. коллегия: В.А. Кабанов [и др.], Т.2, Советская Энциклопедия, Москва, 1974, 1032 с.
16. Энциклопедия полимеров, ред. коллегия: В.А. Кабанов [и др.], Т.3, Советская Энциклопедия, Москва, 1974, 1152 с.
17. Ю.Ю. Косивцов, дисс. докт. техн. наук, Рос. хим.-технол. ун-т им. Д.И. Менделеева, Москва, 2011. 363 с.
18. Е.С. Щетинков, Физика горения газов, Наука, Москва, 1965, 740 с.
19. Д.М. Хзмалян, Я.А. Каган. Теория горения и топочные устройства: учебное пособие для вузов, Энергия, Москва, 1976, 488 с.

© **А. Н. Бушуев** - препод. каф. теплоэнергетики и теплотехники, Орский гуманитарно-технол. ин-тут (филиал) Оренбургский госуд. ун-тет, nielsen1@mail.ru; **Е. Б. Шабловская** - ст. препод. каф. материаловедения и технологии металлов того же вуза, elka_44@list.ru.