

- lurgy, 1971. – 296 p. (Rus.)
8. Sobolev V.V. Kinetics of crystal structure formation of rectangular section ingots at steel continuous casting / V.V. Sobolev, D.H. Devjatov, P.M. Trefilov // Proceedings of metallurgical higher educational institutions. – 1990. – № 4. – P. 32-36. (Rus.)
 9. Thermal processes at steel continuous casting / J.A. Samoylovich, S.A. Krulevetsky, V.A. Gorjainov, Z.K. Tabakov. – M. : Metallurgy, 1982. – 152 p. (Rus.)

Рецензент: В.Г. Ефременко
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.02.2012

УДК 669.18

©Харлашин П.С.¹, Буторина И.В.², Бендич А.В.³

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА СТАЛИ КАК ФАКТОР ОПТИМИЗАЦИИ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Рассмотрена основная мировая проблема человечества – влияние металлургической отрасли на состояние окружающей среды. На основе разработанной математической модели дано описание материальных и энергетических потоков на предприятии с полным металлургическим циклом. Представлены основные принципы развития экономики в гармонии с окружающей средой планеты. Даны расчёты показателей для оценки эффективности экологического состояния в соответствии с природоохранными стандартами. Разработанная модель устойчивого развития даёт план первоочередных действий по предотвращению наиболее важных экологических проблем, позволяет определить основные направления оптимизации производства с целью улучшения экологических показателей.

Ключевые слова: окружающая среда, устойчивое развитие, математическая модель, жизненный цикл стали, экологические показатели, оптимизация производства, модернизация, эффективность.

Харлашин П.С., Буторина И.В., Бендич А.В. Математична модель життєвого циклу сталі як фактор оптимізації металургійного виробництва з метою покращення екологічних показників. Розглянута основна світова проблема людства – вплив металургійної галузі на стан навколишнього середовища. На основі розробленої математичної моделі дано опис матеріальних та енергетичних потоків на підприємстві з повним металургійним циклом. Представлені основні принципи розвитку економіки у гармонії з навколишнім середовищем планети. Дано розрахунки показників для оцінки ефективності екологічного стану у відповідності з природоохоронними стандартами. Розроблена модель сталого розвитку дає план першочергових дій щодо запобігання найбільш важливих екологічних проблем, дозволяє визначити основні напрямки оптимізації виробництва з метою покращення екологічних показників.

Ключові слова: навколишнє середовище, сталій розвиток, математична модель, життєвий цикл сталі, екологічні показники, оптимізація виробництва, модернізація, ефективність.

¹ д-р техн. наук, профессор, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² д-р техн. наук, профессор, Санкт-Петербургский государственный политехнический университет, г. Санкт-Петербург, Россия

³ аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

P.S. Kharlashin, I.V. Butorina, A.V. Bendich. A mathematical model of the life cycle of steel as a factor in optimizing steel production with the aim of improving environmental performance. The main problem is the world of humanity – the influence of the metallurgical industry on the environment. Based on the developed mathematical model description is made of the material and energy flows in the enterprise with a complete metallurgical cycle. The basic principles of economic development in harmony with the environment of the planet. Given were the estimates of indicators for evaluating the effectiveness of environmental conditions in accordance with environmental standards. The developed model of sustainable development gives priority action plan to prevent the most important environmental problems, to determine the main directions of optimization of production in order to improve environmental performance.

Keywords: *environment, sustainable development, mathematical model, the life cycle of steel, environmental performance, optimization of production, modernization, efficiency.*

Постановка проблеми. В современных условиях всё большую значимость приобретает комплексный подход при создании новых и оценке действующих металлургических технологий. В этом плане первоочередное значение имеют количественные показатели, характеризующие потребление энерго-материальных ресурсов, и экологическое воздействие металлургических систем на окружающую среду.

Анализ последних исследований и публикаций. Разработана методика расчёта экологических показателей основного металлургического производства (агломерационного, доменного и сталеплавильного), а также изложены результаты расчётного анализа возможностей совершенствования металлургического производства на отдельных его этапах и по всему металлургическому циклу с целью обеспечения устойчивого развития. Исследование математической модели производства чёрных металлов, позволяющей рассчитывать величину показателей, исходя из качества сырья и применяемой технологии. В течение нескольких десятков лет изучаются процессы, протекающие в биосфере, связь этих процессов и необходимость разумного управления биоресурсом. Этим вопросам посвящено большое число работ учёных – В.И. Вернадского, Э. Рышки, М.Я. Юдашкина, Л.Д. Гагута, П.С. Харлашина, И.В. Буториной, Д. Андо.

Цель статьи – при помощи математической модели определить наиболее эффективный способ оптимизации жизненного цикла стали с целью улучшения экологических показателей металлургического производства.

Изложение основного материала. Технология производства стали основана на использовании угля в качестве энергоносителя и восстановителя и ориентирована на потребление рудного сырья, что обусловило необходимость производства кокса, агломерата и окатышей. Эти процессы связаны с потреблением большого количества энергии и являются экологически вредными. При производстве каждой тонны жидкой стали образуются твёрдые, жидкие и газообразные отходы, содержащие токсичные вещества, основная часть которых выбрасывается в окружающую среду с дымовыми газами, сточными водами и заводским мусором, что превращает металлургические города в зоны экологического бедствия [1].

Ещё в двадцатые годы XX столетия великим русским учёным В.И. Вернадским впервые было сформулировано понятие устойчивого развития биосферы, в которой воздействие человека на окружающую среду разумно и ограничено сохранением устойчивости протекающих естественных процессов, способных к самоподдержанию и саморегулированию. Была показана связь всех протекающих в биосфере процессов и необходимость разумного управления биоресурсом, чтобы его сохранить для нынешних и будущих поколений.

Истинный интерес к понятию устойчивого развития появился только тогда, когда изменения в биосфере стали очевидными для большинства человечества.

Для обсуждения проблем и путей выхода из создавшегося положения по инициативе ООН в июне 1992 года в Рио-де-Жанейро был созван мировой саммит, где была принята «Декларация по устойчивому развитию». Для того, чтобы добиться устойчивого развития, охрана окружающей среды должна стать неотъемлемой частью процесса развития и не должна рассматриваться отдельно от него [2].

В основу плана устойчивого развития мировой экономики были заложены три ключевые

идеи:

- исправление ущерба, нанесённого окружающей среде, следует проводить одновременно со структурной перестройкой экономики;
- эту перестройку необходимо проводить под контролем природоохранных органов;
- ликвидацию наиболее опасных экологических ситуаций нельзя откладывать до наступления экономического подъёма стран, они требуют немедленных действий.

Кроме того, в рамках этого проекта было предложено ввести международную сертификацию природоохранной деятельности предприятий по системе ISO 14000, которая даст возможность оценить экологические показатели любого производства и обеспечит эффективную управленческую систему для их совершенствования. Новая международная система сертификации даёт гарантию экологически чистого способа производства продукции и возможность централизованного управления охраной окружающей среды на предприятии согласно нормам международного экологического менеджмента.

Для оценки прогресса государств в достижении устойчивого развития был предложен план первоочередных действий, изложенный в документе «Повестка дня 21 века». Для оптимизации производства с точки зрения его устойчивого развития необходимо провести тщательный анализ производственного процесса – «жизненного цикла» производимой продукции, сокращая издержки и объём образующихся отходов.

Наиболее эффективным способом оптимизации жизненного цикла стали с целью улучшения экологических показателей металлургического производства является исследование математической модели производства чёрных металлов, позволяющей рассчитывать величину этих показателей исходя из качества сырья и применяемой технологии. Математическая модель жизненного цикла стали составляется на базе полученных математических описаний отдельных стадий металлургического передела [3].

На основании анализа характеристик отдельных стадий металлургического передела дана экологическая оценка различных схем жизненного цикла стали. Результаты анализа приведены в таблице 1.

На большинстве металлургических предприятий Украины реализуется четвёртая схема жизненного цикла стали – «агломерат – чугуны – сталь». Сокращение запасов коксующихся углей на Украине делает эту схему наиболее реальной, но ставит металлургические предприятия в зависимость от поставок природного газа, что, при отсутствии собственных запасов этого топлива и высокой рыночной цене, повышает стоимость металлопродукции. На экологические показатели металлургического производства, работающего по этой схеме, оказывает влияние способ получения стали.

Наибольшей энергоёмкостью отличается мартеновское производство. Кроме того, использование мазута и коксового газа в горелках для разогревания мартеновской шихты приводит к повышенному выбросу в окружающую среду оксидов серы и азота. Токсическое действие NO_2 значительно выше, чем у CO и аналогично действию SO_2 , что делает мартеновские выбросы экологически опасными.

Конвертерное производство имеет лучшие экологические показатели, но ограниченные возможности для переработки лома. В конвертерном процессе, благодаря использованию кислорода для продувки ванны и малому подосу воздуха в печное пространство, объёмы отходящих газов почти вдвое ниже, чем в мартеновском. Для конвертерного процесса характерны небольшие объёмы выбросов оксидов азота и серы.

Современные электродуговые печи объединяют в себе достоинства мартеновских и конвертерных печей: высокий уровень рециклинга лома, полный отказ от жидкого чугуна, меньшие энерго- и водозатраты и меньший объём выбросов токсичных веществ. Следовательно, при расширении доли предельной металлургии за счёт электросталеплавильного производства, резко сокращаются затраты энергии и воды, а также выбросы вредных газов в атмосферу.

Одним из важных показателей качества выбранного способа производства продукции может выступать коэффициент выхода годного продукта при переработке единицы массы шихтовых материалов. Величина этого коэффициента может быть определена по формуле:

$$a = \frac{M_{\text{ш}} - M_{\text{от.}}}{M_{\text{ш}}} = 1 - \frac{M_{\text{от.}}}{M_{\text{ш}}}, \quad (1)$$

где $M_{ш}$ и $M_{от.}$ – масса переработанной в данном производстве шихты и масса образовавшихся при этом отходов.

Таблица 1

Оценка различных схем жизненного цикла стали

№ п/п	Состав цикла	Достоинства	Недостатки
1.	Агломерат – кокс – чугуны – сталь	Независимость от внешних источников сырья и энергии	Высокая ресурсоёмкость и объём выбросов
2.	Кокс – чугун – сталь	Сокращение удельных выбросов на 50%, производство кокса и дешёвого газообразного топлива, переработка окатышей	Высокие требования к качеству железорудного сырья по сере, отсутствие возможностей для переработки железосодержащих отходов
3.	Чугун – сталь	Сокращение удельных выбросов на 70% и удельных энергозатрат на 6%, переработка окатышей	Зависимость от поставок сырья и газообразного топлива
4.	Агломерат – чугуны – сталь	Сокращение выбросов на 20%, отсутствие фенольных выбросов и стоков, возможность утилизации железосодержащих отходов	Дефицит газообразного топлива, зависимость от поставок природного газа, утилизация собственных отходов
4-а.	Агломерат – чугуны – сталь (конвертерная + мартеновская)	Возможность переработки большого объёма лома. При доле лома свыше 28% улучшается большинство экологических показателей производства жидкой стали	Высокие энергозатраты и выбросы оксидов азота и серы
4-б.	Агломерат – чугуны – сталь (конвертерная + электросталь)	Высокая производительность, хорошие экологические показатели производства, получение технологического топлива – конвертерного газа	Ограниченные возможности по переработке лома

По величине коэффициента выхода годного продукта можно судить об эффективности использования сырьевых материалов.

Разработанная математическая модель была использована для определения влияния на общие экологические показатели производства жидкой стали такого фактора, как качество сырья: чугуна, лома и флюсов. Качество его определяется наличием примесей, окисляемых в процессе плавки, и количеством окислителя, поступающего в зону контакта жидкого металла и газа. Чем больше примесей содержится в чугуне, тем больше будет температура испарения и выше удельный вынос пыли [3].

1. Расчёт удельных показателей производства стали.

Низкие удельные экологические показатели на отдельных этапах металлургического процесса снижают суммарные показатели металлургической отрасли. За их величину принимаются суммарные экологические показатели производства одной тонны жидкой стали. Они могут быть рассчитаны как отношение массового показателя – затрат сырья, энергии и воды, образования выбросов, сбросов и твёрдых отходов (M), к годовой производительности предприятия по жидкой стали (Π_c):

$$y = \frac{M}{\Pi_c} \tag{2}$$

Удельный показатель производства стали будет иметь вид:

$$Y_{\text{п}} = Y_{\text{а}} \frac{P_{\text{а}}}{P_{\text{с}}} + Y_{\text{к}} P_{\text{к}} + Y_{\text{д}} \frac{P_{\text{д}}}{P_{\text{с}}} + Y_{\text{м}} q_{\text{м}} + Y_{\text{кк}} q_{\text{кк}} + Y_{\text{э}} q_{\text{э}}, \quad (3)$$

где $P_{\text{а}}$, $P_{\text{к}}$, $P_{\text{д}}$, $P_{\text{с}}$ – годовое производство соответственно агломерата, кокса, чугуна и стали;

$Y_{\text{а}}$, $Y_{\text{к}}$, $Y_{\text{д}}$ – соответственно удельный показатель производства агломерата, кокса и чугуна;

$Y_{\text{м}}$, $Y_{\text{кк}}$, $Y_{\text{э}}$ – соответственно удельный показатель производства стали мартеновским, конвертерным и электроплавильным способами;

$q_{\text{м}}$, $q_{\text{кк}}$, $q_{\text{э}}$ – доля стали, выплавляемой мартеновским, конвертерным способами и в электропечах.

При помощи данного выражения можно рассчитать экологические показатели производства стали на предприятии с полным металлургическим циклом.

2. Расчёт экономических показателей производства стали.

Для расчёта экономических показателей, таких как расход сырья и энергии, выход и состав годного продукта и его себестоимости, в математическую модель вводятся уравнения для расчёта материального и теплового баланса процессов металлургического передела.

Балансовый метод оценки экономических характеристик создаётся путём составления схем движения материальных и энергетических потоков в каждом конкретном производстве. Он предполагает учёт удельной величины потоков (отнесённой к тонне производимой продукции).

В отличие от распространённой практики расчёта материального баланса металлургических процессов, согласно которому составление схем движения материальных и энергетических потоков производилось в каждом конкретном производстве, в данной модели предложена табличная методика как комплекса протекающих химических реакций.

Используя в тепловом балансе химические реакции, учитываются такие статьи прихода тепла, как суммарный тепловой эффект металлургического процесса, а также приход тепла с шихтой и дутьём. В расходной части баланса учитываются затраты тепла на нагрев шихты и тепло, уносимое с дымовыми газами, твёрдыми отходами и охлаждающей водой.

3. Расчёт экологических показателей производства стали.

В качестве экологических характеристик различных видов топлива предлагается использовать удельное количество дымовых газов и токсичных выбросов в атмосферу, образующихся при получении единицы тепловой энергии за счёт сжигания данного вида топлива:

$$Y_{\text{дг}} = \frac{V_{\text{дг}}}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad Y_{\text{вв}} = \frac{M}{Q_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad (4)$$

где $Y_{\text{дг}}$ – удельное образование дымовых газов;

$Y_{\text{вв}}$ – удельный выброс вредных веществ в окружающую среду;

M – масса выброса в кг при сжигании 1 м³ газообразного или 1 кг твёрдого топлива;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания в ГДж на единицу количества топлива.

В расчёте удельных выбросов при сжигании коксового газа учитываются удельные выбросы, связанные с производством кокса:

$$Y_{\text{кг}} = \frac{M}{V_{\text{кг}} \cdot Q_{\text{н}}^{\text{п}}}, \quad (5)$$

где M – масса выброса вещества в кг при производстве одной тонны кокса;

$V_{\text{кг}}$ – объём коксового газа;

$Q_{\text{н}}^{\text{п}}$ – низшая теплота сгорания коксового газа.

В таблице 2 приведены характеристики различных видов топлива.

Хорошие экологические показатели имеют природный газ и мазут, а самые плохие – уголь и продукты его обогащения. Вторичные энергоресурсы – коксовый и доменный газ –

имеют средние экологические показатели.

Таблица 2

Экологические характеристики различных видов топлива

Вид топлива	Расход кислорода, м ³ /МДж	Объём ды- мовых газов, м ³ /МДж	Удельные выбросы в кг/ГДж				
			пыль	СО	NO _x	SO ₂	всего
Уголь АШ	0,054	0,268	0,32	5	0,11	3,19	8,62
Мазут	0,055	0,303	–	0,325	0,65	0,9	1,29
Природный газ	0,055	0,316	–	0,25	0,065	–	0,315
Доменный газ	0,044	0,427	–	1,9	0,03	–	1,93
Конвертерный газ	0,039	0,242	–	0,003	0,0012	–	0,0042
Коксовый газ							
– производство			0,078	0,68	0,055	0,102	0,917
– горение	0,052	0,335	–	0,11	0,21	0,51	0,83
Итого			0,078	0,79	0,265	0,612	1,747

3.1. Математическое описание процесса образования пыли.

При производстве агломерата, чугуна и стали на металлургических предприятиях образуется пыль, на долю которой в общем объёме выбросов металлургического процесса приходится 4,5-6,7% выбросов. Пыль относится к стойким загрязнителям и имеет свойство накапливаться в окружающей среде.

Пылевые выбросы в металлургическом производстве образуются в результате уноса из рабочего пространства мелких частиц шихты, а также при испарении жидкого металла. Для оценки влияния на эти процессы различных технологических факторов составляется математическое описание процесса образования пыли.

Например, доля пылевидных фракций в шихте зависит от размера частиц и массовой доли их в данной навеске шихты. Критический размер частиц шихты можно определить, приравняв действующие на частицу аэродинамическую (F_A) и гравитационную (F_g) силы: $F_A = F_g$.

Механизм образования плавильной пыли находится в зависимости от операций с жидким металлом: окисление, диспергирование и испарение металла. Проведя математический расчёт механизма образования плавильной пыли, можно определить массу образующейся пыли, как:

$$M_n = k\omega_d F_i \tau, \quad (6)$$

где k – коэффициент, учитывающий увеличение массы пыли в результате окисления железом;

F_i – площадь испарения металла;

τ – время испарения;

ω_d – скорость дистилляции, которая определяется по уравнению:

$$\omega_d = 0,5a \left(P_{исп.} - P_{ост.} - \frac{a_k P_k}{a} \right), \quad (7)$$

где $P_{исп.}$ и P_k – соответственно давление паров железа при температуре испарения и конденсации;

a и a_k – соответственно величина активности железа при испарении и конденсации.

Основными факторами, влияющими на процесс образования плавильной пыли, являются температура и площадь поверхности испарения, активность испаряемого металла в расплаве, а также температура газа над расплавом.

3.2. Закономерности образования токсичных выбросов.

Образование токсичных газов в металлургическом производстве является следствием протекания комплекса химических реакций [4]. На количество образующихся газов оказывают влияние как термодинамические характеристики процесса, так и количество вступающих в реакцию веществ, определяемое расходом реагентов и площадью раздела реагирующих фаз.

В случае движения сред в виде двух соприкасающихся, но не смешивающихся потоков химическое взаимодействие будет происходить на границе их соприкосновения, куда транспорт реагирующих веществ будет осуществляться путём диффузии через две ламинарные плёнки потоков.

Скорость переноса одного из реагирующих веществ из первой среды к границе раздела фаз будет:

$$j_1 = F\beta_1(C_{1-1} - C_{1p}), \quad (8)$$

где F – площадь контактной поверхности;

β_1 – коэффициент массопереноса вещества через ламинарную плёнку первой среды;

C_{1-1} и C_{1p} – соответственно концентрация реагирующего вещества в первом потоке и на границе раздела фаз.

Скорость превращения вещества на реакционной поверхности будет происходить по закону действующих масс:

$$j_1 = Fk_x C_{1p}, \quad (9)$$

где k_x – константа скорости химической реакции.

Далее прореагировавшее вещество уже в виде соединения перейдёт диффузионным путём во вторую среду, и поток его будет равен:

$$j_1 = kF\beta_2(C_{1p} - C_{1-2}), \quad (10)$$

где k – стехиометрический коэффициент, устанавливающий пропорцию между реагирующим компонентом и продуктом реакции;

β_2 – коэффициент массопереноса продукта реакции через ламинарный слой второй среды;

C_{1-2} – концентрация первого вещества во второй среде.

При стационарных условиях массообмена величина этих потоков будет равна, и при совместном решении уравнений (8), (9), (10) получим скорость превращения реагирующего вещества в виде:

$$j_1 = FK_1(C_{1-1} - C_{1-2}), \quad (11)$$

где K_1 – коэффициент массопередачи от одной среды к другой рассчитывается, как:

$$K_1 = \frac{1}{\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_1\beta_2}}. \quad (12)$$

Протекание реакции в системе газ – твёрдое тело складывается из следующих этапов: транспорта газообразного реагента из потока через ламинарную плёнку к поверхности частицы; диффузии окислителя по порам образующегося продукта реакции к фронту горения; химического взаимодействия газообразного и твёрдого тела в зоне реакции и обратного транспорта газообразных продуктов реакции в газовый поток.

Скорость образования газообразных продуктов реакции будет равна:

$$j_{гп} = \frac{4\pi r^2 k_2}{k_1} K(C_r - C_r^*), \quad (13)$$

где k_1 – стехиометрический коэффициент взаимодействия газа с твёрдым веществом;

k_2 – стехиометрический коэффициент взаимодействия между твёрдым телом и газообразным продуктом реакции;

K – коэффициент массопередачи;

C_r и C_r^* – соответственно концентрация газа в газовом потоке и равновесная концентрация реакционного газа в данных условиях.

Основными токсичными веществами в выбросах металлургических предприятий являются газообразные примеси, среди которых основная масса представлена оксидами углерода, азота и серы.

В металлургическом процессе образование *оксидов углерода* происходит в процессах горения твёрдого, жидкого и газообразного топлива, а также в процессах окисления и горения углерода шихтовых материалов и углерода растворённого в жидком металле [4].

Скорость выхода CO в дымовой газ определяется как разность между скоростями его образования и окисления:

$$j_{CO} = j_{CO}^{обр.} - j_{CO}^{ок.} \quad (14)$$

Скорость окисления выраженная через скорость образования свободного кислорода в слое, и скорость образования CO определяется из выражений:

$$j_{CO}^{ок.} = k_3 \rho_{O_2} q_{O_2} V_b - k_1 j_c, \quad j_{CO}^{обр.} = k_2 j_c - 1,75(q_{O_2} \rho_{O_2} V_b - 1,33 j_c), \quad (15)$$

- где k_1 – стехиометрический коэффициент между O_2 и C, равный 1,33;
 k_2 – стехиометрический коэффициент, равный 2,33;
 k_3 – стехиометрический коэффициент между O_2 и CO, равный 1,75;
 ρ_{O_2} – плотность кислорода;
 q_{O_2} – доля кислорода в окислительной смеси;
 V_b – расход окислительной смеси;
 j_c – скорость окисления углерода.

Произведя действия с уравнениями (14) и (15) и упростив выражение, скорость выхода CO в дымовой газ будет иметь вид:

$$j_{CO} = 4,66 j_c - 1,75 q_{O_2} \rho_{O_2} V_a \quad (16)$$

Процесс образования CO при выжигании углерода из жидкого металла имеет вид (с учётом выражения (9)):

$$j_{CO} = 0,75 FK(C_{O_2} - C_{O_2}^*), \quad (17)$$

- где C_{O_2} и $C_{O_2}^*$ – концентрация кислорода в реакционной зоне и равновесное значение этой концентрации.

В процессе горения твёрдого топлива продуктами реакции являются дымовые газы и зола. Слой золы, как правило, мал и обладает большой пористостью, что даёт возможность пренебречь им.

Скорость образования CO при горении одной частицы топлива находится из уравнения:

$$j_{CO} = 7\pi r^2 k_r (C_{r0} - C_r^*), \quad (18)$$

- где k_a – константа скорости горения.

Согласно полученной математической модели, образование CO при горении твёрдого топлива переменено во времени и зависит от количества сжигаемого топлива, его фракционного состава и скорости подачи окислительной смеси в слой.

Оксиды серы в металлургическом производстве образуются в результате выгорания серы из железосодержащей шихты, топлива, а также жидкого металла и шлака [4].

С экологической точки зрения этот процесс крайне нежелательный, т.к. в связи со сложностью очистки дымовых газов от SO_2 в районах, окружающих металлургические предприятия, в приземном слое атмосферы содержание этого токсичного вещества нередко в несколько раз превышает предельно допустимую концентрацию.

Скорость выхода оксидов серы в дымовые газы будет равна:

$$j_{SO_2} = j_{SO_2}^p + j_{SO_2}^t - j_{SO_2}^n, \quad (19)$$

- где $j_{SO_2}^p$ и $j_{SO_2}^t$ – соответственно скорость образования оксида серы при выгорании серы из руды и топлива;
 $j_{SO_2}^n$ – скорость поглощения серы известью.

Скорость выгорания серы из топлива может быть определена:

$$j_{SO_2}^t = N_r j_{SO_2}, \quad (20)$$

где N_T – число частиц топлива в слое;
 j_{SO_2} – скорость выгорания серы из одной частицы топлива.

Скорость поглощения SO_2 известью будет равна:

$$j_{SO_2}^u = 4\pi r_n^2 k_1 q_n \rho_n \frac{dr_n}{dt}, \quad (21)$$

где q_n – доля извести в шихте;
 r_n – радиус фронта взаимодействия извести с оксидом серы;
 k_1 – стехиометрический коэффициент, равный 1,14;
 ρ_n – плотность частиц извести.

При расчёте выгорания серы из жидкого металла, пренебрегая диффузией кислорода в ламинарной плёнке газа и используя уравнения (11) и (12), можно получить, что скорость образования SO_2 будет равна:

$$j_{SO_2} = F \frac{k_x \beta_{SO_2}}{k_x + \beta_{SO_2}} C_{SO_2}, \quad (22)$$

где β_{SO_2} – коэффициент массопереноса серы через ламинарную плёнку металла на границе раздела фаз жидкий металл – газ;
 C_{SO_2} – концентрация оксида серы в металле.

Скорость выгорания серы из жидкого металла должна увеличиваться с ростом площади раздела фаз жидкий металл – газ и температуры процесса, увеличивающей скорость химического взаимодействия и диффузию серы в металле.

Все газообразные *соединения азота* являются токсичными веществами [4]. В металлургическом производстве осуществляется контроль только за суммарными выбросами оксидов азота, которые, согласно международной практике, принято обозначать в виде единой формулы NO_x .

Удельный выброс NO_x при производстве одной тонны стали на предприятии с полным металлургическим циклом зависит, в первую очередь, от способа выплавки стали.

Влияние температуры воздуха в зоне горения топлива на образование оксидов азота в металлургических агрегатах можно учитывать при помощи уравнения:

$$NO_x = 2 \cdot 10^2 \exp\left(\frac{0,0032}{t_B}\right), \quad (23)$$

где t_B – температура воздуха.

Кроме того, для расчётов выбросов оксидов азота в металлургических процессах необходимо учитывать вид и количество сжигаемого топлива, состав и расход окислительной смеси и наличие свободного водорода в зоне горения.

4. Оптимизация металлургического производства.

Использование приведенных выше математических зависимостей позволяет определить основные направления оптимизации производства с целью улучшения экологических показателей по всему металлургическому циклу [2].

Решение экологических проблем металлургической отрасли должно осуществляться за счёт внедрения мероприятий по ресурсосбережению, которые, во-первых, сокращают образование отходов, а, во-вторых, уменьшают издержки производства, давая предприятию дополнительные средства для установки и эксплуатации высокоэффективных установок для очистки и обезвреживания отходов.

Для расчёта технологических мероприятий, направленных на улучшение отдельных экологических показателей различных стадий получения жидкой стали, а также для расчёта экологической эффективности от внедрения того или иного мероприятия в математическую модель жизненного цикла стали включается уравнение:

$$\eta_{\text{эл}} = 1 - \frac{Y_p}{Y_\phi}, \quad (24)$$

где Y_ϕ и Y_p – соответственно фактическое значение удельного экологического показателя данного производства и расчётное его значение после проведения реконструкции производства или внедрения новой технологии.

Величина экономической эффективности от проведения различных мероприятий определяется при помощи выражения:

$$\eta_{\text{эл}} = 1 - \frac{C_p}{C_\phi}, \quad (25)$$

где C_ϕ и C_p – соответственно величины себестоимости металлургической продукции до и после оптимизации производства; рассчитываются при помощи включённой в модель калькуляции.

Суммарный экологический и экономический эффект от проведения комплекса мероприятий определяется по формуле:

$$\Sigma\eta = 1 - (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)(1 - \eta_3) \dots (1 - \eta_n), \quad (26)$$

где η – эффективность каждого из мероприятий.

4.1. Агломерационное производство.

Все операции агломерационного процесса: разгрузка, транспортировка, дробление, рассев шихты и агломерата – сопровождаются выносом пыли. Однако, наибольшее количество пыли образуется при спекании шихты на агломерационной ленте за счёт фильтрации её воздухом [1].

Путём исследования, полученного математической моделью, была установлена зависимость процесса спекания шихты от доли возврата в шихте, её основности, а также скорости охлаждения спечённого агломерационного «пирога».

Требуемый для доменного процесса агломерат с основностью 1,4 можно получать, спекая двухслойную шихту с высокой и низкой основностью, или производить агломерат разной основности на отдельных машинах, а затем смешивать его при дроблении или отсеиве.

Другим важным технологическим мероприятием, направленным на снижение выбросов пыли, является повышение высоты спекаемого слоя. Повышением высоты слоя до 400-500 мм можно сократить вынос пыли минимум на 12%. Для реализации этого мероприятия необходимо увеличить мощность эксгаустеров, обеспечивающих работу вакуум-камер.

Достижение норм по выбросам пыли, предусмотренных стандартом, можно достичь при эффективности системы газоочистки в 95,5%. Такую эффективность очистки агломерационных газов могут обеспечить электрофильтры, позволяющие ликвидировать подсос воздуха в газовый тракт и сократить объём отходящих газов.

За счёт неполного сгорания твёрдого топлива в спекаемом слое шихты образуется угарный газ. Математическое описание показывает, что процесс образования СО можно сократить не только за счёт подбора оптимального фракционного состава топлива, но и за счёт внедрения системы рециркуляции дымовых газов в агломерационной машине.

Основными факторами, влияющими на переход серы в агломерационные газы, являются: содержание серы в сырье, фракционный состав флюсуемых добавок и топлива. Содержание SO_2 в агломерационных газах уменьшается с увеличением размеров кусков топлива и уменьшением кусков извести. Но численные исследования математической модели агломерационного процесса свидетельствуют в пользу совершенствования технологии спекания шихты.

Помимо оксидов углерода и серы в ходе агломерационного процесса в окружающую среду выбрасываются такие газы как оксид азота и органические соединения [4]. На их образование, главным образом, влияет вид и количество газообразного топлива, используемого для розжига шихты, и температура зон агломерации. При горении твёрдого топлива в слое шихты происходит образование оксидов азота в результате реакции окисления азота. Выход NO зависит только от температуры процесса испарения влаги, зависящей, в свою очередь, от расхода твёрдого топлива. Следовательно, основные мероприятия, снижающие расход топлива на спекание шихты, – это снижение влажности шихты и сокращение недожога топлива в слое, что

достигается выбором оптимального фракционного состава шихты.

4.2. Доменное производство.

Выполненные расчёты согласно математической модели свидетельствуют о том, что причиной низких экологических показателей производства чугуна могут быть: некачественное сырьё, устаревшие технологии производства, неэффективные системы очистки и утилизации доменного газа, а также наличие мощных источников неорганизованных выбросов в цехе [3]. Перечень веществ, переходящих из шихты в газ, складывается из сгорающего углерода, кислорода шихты, углекислого газа, образующегося при разложении известняка и массы пыли шихты, состоящей из мелких фракций шихты.

Основная доля улетающих из шихты веществ приходится на углерод (54%). В связи с этим наиболее эффективной мерой снижения выхода летучих веществ из доменной шихты является уменьшение расхода кокса на проведение доменного процесса, использование металлизированных железорудных окатышей и снижение влагосодержания шихтовых материалов. Расчёты показывают, что снижение удельного расхода кокса на каждый кг даёт возможность уменьшать выход доменного газа на 1%. На выход доменного газа большую роль оказывает также объём и состав доменного дутья. Замена природного газа в дутье на пылеугольное топливо (ПУТ) снижает выход доменного газа на 2%. Внедрение этой технологии является крайне актуальным мероприятием, предусматривающим целый комплекс природоохранных мероприятий. Установка предусматривает полностью герметичный тракт измельчения угля и подачи угольной пыли в доменные печи, что исключает какие-либо дополнительные выбросы пыли; а также оснащение мельниц угля, перегрузочных узлов, бункеров закрытого угольного склада современными передовыми системами аспирации.

Исследование математического описания образования выбросов вредных веществ на литейном дворе доменной печи показало, что на этот процесс оказывает влияние скорость слива металла и площадь поверхности испарения. Сократить выбросы пыли на литейном дворе и на всех дальнейших этапах его переработки даст применение способа десиликонизации чугуна вдуванием окалины в сливной желоб, а также внедрение технологии подавления пыли азотом.

Для локализации выбросов вредных веществ наиболее эффективной схемой оказалась схема слива металла по укрытым желобам непосредственно в передвижной миксер, узкая горловина которого уменьшает подсос воздуха и вынос из него капель металла.

Для очистки газовых потоков от пыли необходимо использовать только высокоэффективные фильтры – рукавные.

Сокращение выбросов вредных веществ с дымовыми газами, отходящими из воздухонагревателей, обеспечивается снижением содержания токсичных примесей в доменном газе и улучшением условий его сжигания. Меры по уменьшению недожога топлива в воздухонагревателях должны быть направлены на улучшение процесса смешения топлива с газом и повышение содержания горючих компонентов в газообразном топливе путём обогащения доменного газа более калорийным топливом. Хорошие условия смешения и высокая долговечность горелок могут быть достигнуты при установке на воздухонагревателях короткофакельных керамических горелок.

4.3. Сталеплавильный процесс.

Исследования, проведенные с помощью расчётных зависимостей для определения экологических показателей производства стали, показали, что самыми эффективными мерами улучшения этих показателей является использование качественного сырья, которое определяется наличием примесей, и способа производства [5].

Главными факторами, влияющими на процесс образования выбросов в сталеплавильном процессе, являются: скорость окисления примесей, зависящая от их содержания в шихте, скорость подачи окислителя в зону реакции, площадь поверхности реакционной зоны и температура газовой фазы над ней.

Высокое содержание кремния в чугуне повышает выбросы из сталеплавильных печей пыли, оксидов серы и азота. Выброс пыли увеличивается за счёт повышения температуры реакционной зоны при выгорании избыточного количества кремния, а выброс оксида серы увеличивается вследствие разложения сульфида серы в дополнительных количествах извести. С повышением расхода кислорода на плавку увеличивается и выход оксида азота.

В последнее время активное развитие получили процессы комплексной обработки чугуна

на пути из доменного цеха к кислородному конвертеру. Согласно этой технологии уже при сливе чугуна из доменной печи проводится десиликонизация его путём ввода оксидов железа вдуванием их в жидкий чугун, движущийся по сливным желобам. В качестве раскислителя используется окалина. Это мероприятие уменьшает выбросы пыли при переливах чугуна, снижает расход извести и выход шлака в сталеплавильном агрегате [1].

Высокоэффективным способом пылеподавления при сливах металла является подача инертного газа на струю металла и в приёмный ковш. Это мероприятие предотвращает контакт металла с кислородом воздуха. В качестве инертного газа лучше использовать углекислый газ и азот. Исследованиями пылеподавления при переливах чугуна в миксерном отделении показано, что подача нейтрального газа на сливающуюся струю под углом 45-60° к вертикали на 75-85% подавляет процесс пылеобразования. При подаче на струю металла и в заливочный ковш CO₂ при сливе чугуна из передвижного миксера обеспечивается снижение выбросов пыли и CO на 87%. Другим способом пылеподавления при сливе чугуна из передвижного миксера является организация этого процесса под специальным укрытием с отводом образующихся газов на очистку.

На участке слива чугуна в печь эффективное пылеподавление более экономично можно организовать установкой единой системы очистки вентиляционных газов, отводимых из печного пролёта конвертерного цеха. Эффективность этого мероприятия по защите окружающей среды зависит от герметичности стен цеха.

Значительное снижение выбросов пыли, без снижения доли перерабатываемого лома, даёт использование многосопловых фурм, которые увеличивают поверхность реакционной зоны, уменьшая удельную скорость выгорания примесей, что снижает её температуру реакционной поверхности.

Проведение процесса рафинирования стали в агрегатах типа «ковш-печь» значительно сокращает все виды выбросов при внепечной обработке металла.

Учитывая высокую дисперсность испарения пыли и высокую запылённость газовых потоков, образующихся в сталеплавильных цехах, для очистки их от пыли необходимо использовать высокоэффективные газоочистные аппараты. Здесь целесообразно использовать электрофильтры, где подготовка газов для очистки сводится к необходимости снижения температуры газа и понижению входной концентрации пыли. Для повышения эффективности улавливания высокодисперсной конвертерной пыли в электрофильтре используют современные фильтры с высокой напряжённостью электрического поля.

Рассмотрев современные металлургические процессы по всем переделам, с целью улучшения экологического состояния окружающей среды целесообразно объединить металлургическое производство с выработкой электроэнергии. Кроме того, эффективно перейти на технологию производства стали с прямым восстановлением железа природным газом или восстановительным синтез-газом, получаемым плазменной газификацией угля. Суть схемы состоит в объединении производства экологически чистых энергоносителей (электричество, водород, синтез-газ) и металлопродукции и использование плазмы как преобразователя видов энергии [6].

Вредное воздействие металлургических объектов производства стали на окружающую среду, обусловленное выбросом газообразных и твёрдых веществ, при прямом восстановлении железа природным и синтез-газом в несколько раз меньше, чем при обычной технологии.

Выводы

1. Разработанная математическая модель позволяет с достаточной точностью прогнозировать потребление энергетических и материальных ресурсов при производстве стали.
2. На основе системного исследования представлены расчёты экономических и экологических показателей производства стали, которые дают возможность ввести экологически чистые производства.

Список использованных источников:

1. Харлашин П.С. Металургія (проблеми, теорія, технологія, якість) : підручник для ВУЗів / П.С. Харлашин, В.С. Волошин, Г.С. Єршов, Т.М. Чаудрі, В.П. Тарасов, О.М. Скребцов, В.І. Капранов, В.О. Роянов, Л.К. Лещинський, В.П. Сударев. – Маріуполь: ПДГУ, 2004. – 723 с.
2. Буторина И.В. Основы устойчивого развития металлургической отрасли / И.В. Буторина. – Донецк : Каштан, 2005. – 332 с.

3. Буторина И.В. Поиск путей устойчивого развития металлургической отрасли методом математического моделирования / И.В. Буторина, П.С. Харлашин // Электromеталлургия. – 2003. – № 4. – С. 56-60.
4. Буторина И.В. Расчёт выбросов оксидов азота в металлургическом производстве / И.В. Буторина // Сталь. – 2004. – № 3. – С. 70-72.
5. Бойченко Б.М. Конвертерное производство стали : учебник / Б.М. Бойченко, В.Б. Охотский, П.С. Харлашин. – Днепропетровск : РВА «Дніпро-ВАЛ», 2006. – 454 с.
6. Андо Д. Проблемы загрязнения окружающей среды оксидами серы и азота и современные меры сокращения их выброса в различных странах / Д. Андо // Черметинформация. – 1987. – Т. 23. – № 7. – С. 3-13.

Bibliography:

1. Kharlashin P.S. Metallurgy (problems, theory, technology, quality) : textbook for universities / P.S. Kharlashin, V.S. Voloshin, G.S. Yershov, T.N. Chaudri, V.P. Tarasov, A.M. Skrebtsov, V.I. Kapranov, V.A. Royanov, L.K. Leschinsky, V.P. Sudaryev. – Mariupol : PSTU, 2004. – 723 p. (Ukr.)
2. Butorina I.V. Framework for sustainable development of the metallurgical industry / I.V. Butorina. – Donetsk : Kashtan, 2005. – 332 p. (Rus.)
3. Butorina I.V. Finding ways to sustainable development of the metallurgical industry by mathematical modeling / I.V. Butorina, P.S. Kharlashin // Electrometallurgy. – 2003. – № 4. – P. 56-60. (Rus.)
4. Butorina I.V. The calculation of emissions of nitrogen oxides in metallurgical production / I.V. Butorina // Steel. – 2004. – № 3. – P. 70-72. (Rus.)
5. Boychenko B.M. Converter steel production: textbook / B.M. Boychenko, V.B. Okhotsky, P.S. Kharlashin. – Dnepropetrovsk : FDA «Dnipro-VAL», 2006. – 454 p. (Rus.)
6. Ando D. The problems of environmental pollution of sulfur and nitrogen oxides, and modern-reduction measures of their release in different countries / D. Ando // Chermetinformatsiya. – 1987. – V. 23. – № 7. – P. 3-13. (Rus.)

Рецензент: В.А. Маслов
д-р техн. наук, проф. ГВУЗ «ПГТУ»

Статья поступила 21.03.2012

УДК 669.15-194.2

©Тарасюк Л.И.¹, Морнева В.В.², Карлос Вера Мендоза³

ВЛИЯНИЕ ИТТРИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТРУБНОЙ СТАЛИ

Проведены исследования механических свойств трубной стали (предела прочности, относительного удлинения, ударной вязкости при +20°C и -40°C), выплавленной в полупромышленных условиях и модифицированной иттрием.

Ключевые слова: *трубная сталь, модифицирование, иттрий, механические свойства.*

Тарасюк Л.И., Морнева В.В., Карлос Вера Мендоза. *Вплив іттрію на механічні властивості трубної сталі. Проведені дослідження механічних властивостей трубної сталі (межі міцності, відносного подовження, ударної в'язкості при +20°C і -40°C), виплавленої в напівпромислових умовах і модифікованої іттрієм.*

Ключові слова: *трубна сталь, модифікування, іттрій, механічні властивості.*

¹ канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

² аспирант, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь

³ доктор философии (PhD), начальник подразделения Корпорации по исследованию материалов для газонефтедобывающей отрасли (COMIMSA), г. Салтильо, Мексика