

СИСТЕМА ДИАГНОСТИРОВАНИЯ ШЛАКА ПРИ ВЫПУСКЕ МЕТАЛЛА ИЗ КИСЛОРОДНОГО КОНВЕРТЕРА ПО ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ РАСПЛАВА

Одним из резервов повышения конкурентоспособности отечественной продукции на мировом рынке черной металлургии является повышение эффективности сталеплавильных агрегатов и качества изделий или продукта за счет минимизации объема печного шлака в сталеразливочном ковше. Последнее достигается посредством непрерывного наблюдения, в основном визуального, за потоком расплава на стадии его выпуска из ванны кислородного конвертера в сталеразливочный ковш. В работе приведены результаты экспериментальных исследований и статистической обработки массивов данных интенсивности инфракрасного излучения потока расплава на действующих сталеплавильных агрегатах в различных технологических интервалах выпуска стали. Доказано, что в качестве диагностического признака наличия шлака в выпускаемом расплаве можно применять математическое ожидание инфракрасного излучения расплава. Определены диагностические условия наблюдения шлака в выпускаемом расплаве по изменению интенсивности излучения. Предложены методика и алгоритм расчета диагностических условий наблюдения шлака в расплаве для отечественных кислородных конвертеров. Приведены результаты промышленной апробации результатов исследования.

Ключевые слова: система диагностирования, кислородный конвертер, инфракрасное излучение, выпуск стали, мониторинг.

ВВЕДЕНИЕ

Процесс производства стали в кислородном конвертере заключается в продувке кислородом жидкого чугуна с помощью кислородной фурмы. При продувке окисляются примеси чугуна, продукты реакций переходят в газовую фазу или шлак. Завершающей стадией производства стали в кислородном конвертере является процесс выпуска стали в сталеразливочный ковш. Наиболее важной операцией на этапе выпуска стали является остановка потока шлак-металл в конечной фазе выпуска стали. В крупных кислородно-конвертерных цехах предприятий черной металлургии распространен визуальный способ детектирования наличия шлака в потоке расплава. При данном способе результат детектирования существенно зависит от квалификации сталевара, при этом условия процесса не позволяют относительно точно предугадать момент попадания шлака в сталеразливочный ковш даже опытному специалисту. В результате в ковш попадает непредсказуемое количество высокоокисленного шлака, что приводит к нежелательным с точки зрения технологии последствиям [1-3].

Наиболее перспективным и достоверным методом детектирования шлака в струе при выпуске расплава из кислородного конвертера большого объема (более 200 т) следует считать метод, основанный на анализе интенсивности инфракрасного излучения потока расплава, истекающего из конвертера [1, 2].

В настоящее время крупные производители систем автоматизации металлургических процессов предлагают готовые технические решения, обеспечивающие непрерывный контроль процесса выпуска металла и позволяющие оценить технико-экономические показа-

тели эффективности процесса выпуска стали посредством наблюдения за струей с помощью видеодетекторов инфракрасного диапазона. Среди производителей указанных систем можно выделить компании Technoap, Siemens-VAI, Amera, Infratech, Land.

Проблемой автоматического контроля процесса выпуска стали занимались следующие авторы: А.Н. Сорокин, А.М. Формакидов, Б. Энкер, Д.А. Дюдкин, F. Zahorszki и R. Anthony, A. Lyons, D. Goldstein, T. Zhiheng и др. Большинство из них сходятся во мнении, что задача контроля процесса выпуска расплава из кислородного конвертера с целью, например, диагностирования шлака в потоке является актуальной задачей и позволяет повысить производительность процесса выплавки стали. Из работ указанных авторов также следует, что метод наблюдения за потоком, истекающим из кислородного конвертера при выпуске расплава, обеспечивает наибольшую достоверность и надежность по сравнению с электромагнитным или вибрационным методом [4-8].

Однако применение метода наблюдения за потоком детекторами инфракрасного излучения требует выполнения следующих условий:

1. Детектор должен быть установлен в таком месте, чтобы поток, истекающий из кислородного конвертера, находился в зоне видимости детектора излучения.
2. Задымление и запыление воздушной среды между детектором и объектом наблюдения – потоком расплава вносят погрешность в измерение интенсивности инфракрасного излучения при диагностировании шлака.

Целью данного исследования является анализ излучения в инфракрасном диапазоне струи металла при выпуске его из кислородного конвертера с целью определения возможности автоматического контроля процесса выпуска расплава при помощи детектора инфракрасного излучения.

Достижение указанной цели потребовало решения следующих задач:

1. Разработки функциональной схемы системы сбора, хранения и индикации параметров излучения потока расплава с учетом строительного плана кислородно-конвертерного цеха одного из крупнейших предприятий чёрной металлургии России.

2. Формирования статистических массивов значений интенсивности излучения струи на различных этапах выпуска стали из кислородного конвертера.

3. Статистического анализа указанных массивов с целью определения доверительных интервалов для характеристик излучения расплава на различных этапах процесса выпуска стали и определения диагностических условий наблюдения шлака в расплаве и на их основе разработки алгоритма диагностирования.

4. Оценки полученных результатов.

МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

На **рис. 1** представлена последовательность технологических операций при выплавке стали в кислородном конвертере.

На этапе I в ванну конвертера 1 подачей 2 загружается металлолом 3, далее на этапе II выполняется заливка жидкого чугуна 4, затем в течение этапа III через погружаемую сверху водоохлаждаемую фурму 5 подается кислород, обеспечивающий химические реакции окисления и рафинирования металла. На этапе IV через лёточное отверстие 9 происходит выпуск расплава 6 в сталеразливочный ковш 8 и на этапе V осуществляется слив шлака 7 в специально предназначенную чашу 10 [1-3]. В работе [1] приводятся следующие сведения относительно процедуры выпуска расплава из конвертера: при объеме конвертера 370 т и длительности выпуска 5 мин за одну минуту из конвертера истекает 74 т расплава (1,23 т/с), температура которого составляет 1620-1650°C.

При этом в сталеразливочный ковш попадает до 30% конвертерного шлака, увлеченного потоком жидкой стали. Объем шлака в сталеразливочном ковше в среднем на 30-40% состоит из шлака, попавшего в моменты наклона конвертера в начале выпуска расплава

и возврата конвертера в рабочее положение. Указанная доля шлака зависит в основном от состояния выпускного отверстия и скорости изменения угла наклона конвертера, поэтому практически не поддается контролю (при условии отсутствия активных систем отсечки шлака). Приблизительно 60% шлака, попавшего в ковш, поступает в конечной фазе процесса выпуска расплава. Указанная доля шлака может быть значительно сокращена за счет своевременного обнаружения наличия шлака в потоке расплава. Момент появления шлака в потоке расплава на кислородных конвертерах большинства металлургических предприятий России определяется визуально, а отсечка шлака достигается простым отворотом конвертера. Как говорилось ранее, повышенный объем печного шлака в сталеразливочном ковше приводит к существенному снижению эффективности процесса выплавки стали, а при попадании шлака в кристаллизатор машины непрерывного литья заготовок может привести к браку и даже серьезной аварии.

СИСТЕМА РЕГИСТРАЦИИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

С целью получения массивов данных об интенсивности инфракрасного излучения на кислородном конвертере по известной схеме [7, 8] смонтирована система регистрации инфракрасного излучения (**рис. 2**), содержащая инфракрасный детектор (ИД) и промышленный компьютер (ПК).

Основные параметры инфракрасного детектора представлены в **табл. 1**.

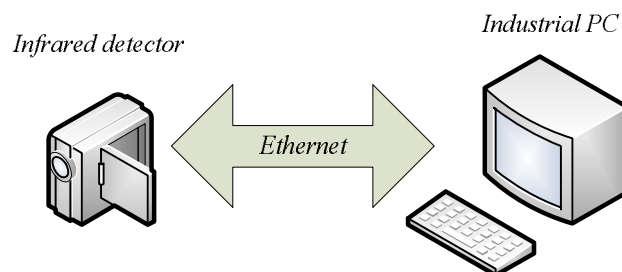


Рис. 2. Структурная схема системы регистрации инфракрасного излучения

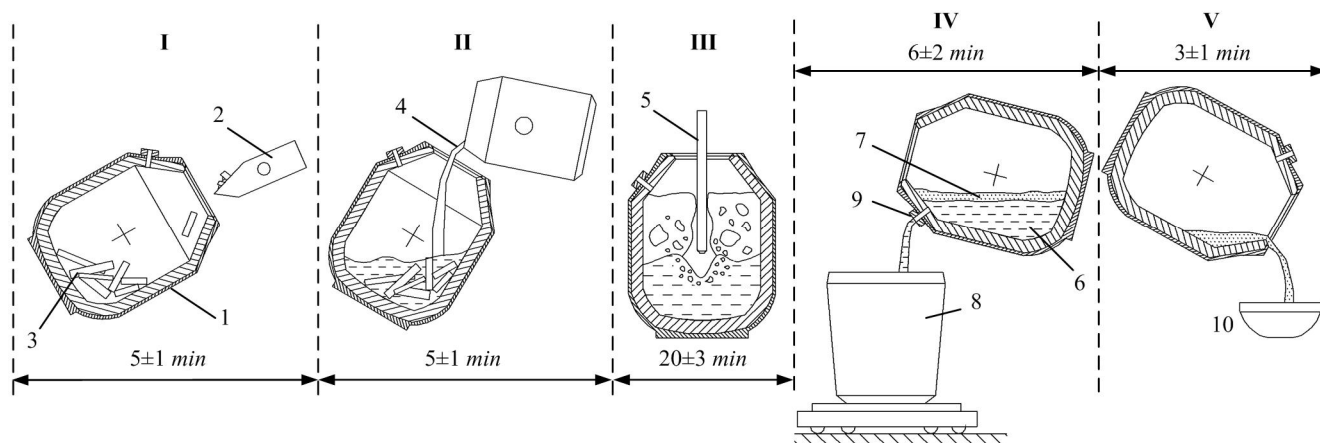


Рис. 1. Этапы выплавки стали в кислородном конвертере:

I – загрузка лома; II – заливка чугуна; III – продувка кислородом; IV – выпуск стали; V – слив шлака

Таблица 1
Основные характеристики инфракрасного детектора

Периметр	Значение	Ед. изм.
Температурный диапазон	-20...+150 0...+650 +300...+2000	°С
Точность измерения интенсивности излучения	±2	°С
Частота кадров	до 50	кадр/с
ИК-разрешение	480×640	пикс.
Фокусное расстояние / Угол обзора	25 / 25 40 / 15	мм/град мм/град
Интерфейсы	USB, Ethernet	

Информация от ИД по сети Ethernet поступает с частотой 12,5 fps в ПК в виде числовых массивов значений, пропорциональных величине интенсивности излучения объектов, попавших в область объектива. Объем массива соответствует разрешающей способности ИД и составляет 480×640 элементов. Программное обеспечение ПК обеспечивает прием массивов данных от ИД, их отображение на мониторе и архивацию.

ИД был стационарно установлен на расстоянии 20 м от кислородного конвертера, а объектив направлен непосредственно на выпускное отверстие. ПК расположен в специализированном помещении автоматики.¹

Один из кадров записи процесса выпуска расплава из кислородного конвертера, полученного от ИД, представлен на **рис. 3**. В верхней части снимка можно наблюдать фрагмент кислородного конвертера в положении, соответствующем процедуре выпуска расплава. В центре кадра наблюдается поток расплава, а в нижней части – верхняя граница сталеразливочного ковша. Наиболее темным участкам кадра (точка 1) соответствуют значения интенсивности излучения в диапазоне 5000-8000 ед., наиболее ярким – значения в диапазоне 25000-28000 ед., жидкому расплаву (точка 2) соответствуют значения в диапазоне 14000-16000 ед. Для сопоставления цветов в кадре и значений интенсивности излучения использована шкала интенсивности. Кроме того, в кадре вертикальными и горизонтальными линиями проведены границы наблюдения потока расплава. Прямоугольник, образованный указанными линиями, формирует матрицу размером 100×35 пикселей, которая содержит информацию о потоке расплава.

Указанная матрица пикселей программным способом выделяется из кадра и формирует массив $I[100;36]$ 16-битных слов, кодирующих значения интенсивности излучения, зафиксированные соответствующей областью чувствительной матрицы ИД. Массив I содержит информацию, требуемую для исследования потока расплава, и использован в качестве исходных данных для последующего статистического анализа.

¹ Инфракрасный детектор и промышленный компьютер безвозмездно для проведения исследований предоставлен компанией ООО «Техноап-Инжиниринг», Россия, г. Москва.

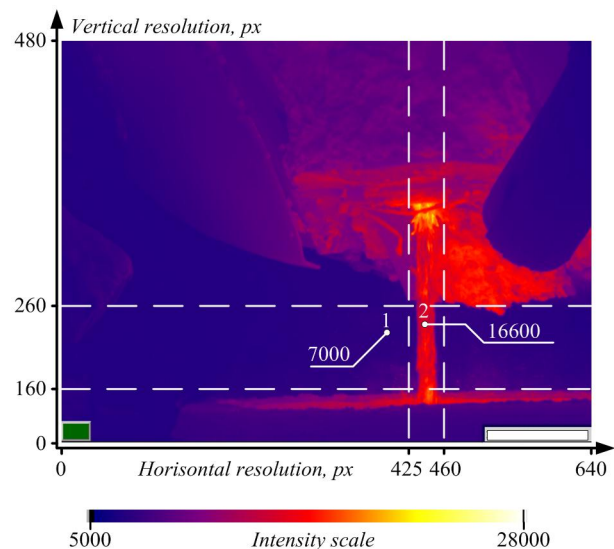


Рис. 3. Кадр записи процесса выпуска расплава из кислородного конвертера

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ МАССИВОВ ЗНАЧЕНИЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ИНФРАКРАСНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПОТОКА РАСПЛАВА

При выполнении статистического анализа массивов значений интенсивности излучения потока расплава процесс выпуска стали разделен на шесть технологических интервалов:

- 1) попадание первичного шлака в ковш;
- 2) до отдачи сыпучих материалов в ковш;
- 3) в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш;
- 4) при значении угла наклона конвертера 85°;
- 5) за 30 с до момента попадания шлака в ковш;
- 6) при попадании шлака в ковш.

В качестве исследуемой величины принято среднее значение интенсивности излучения расплава C_i на произвольном срезе времени каждого из интервалов процесса выпуска:

$$C_i = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{100} \sum_{j=1}^{35} I_{kj}, \quad (1)$$

где i – номер интервала процесса выпуска стали; k – номер строки массива I ; j – номер столбца массива I ; $N = k \cdot j = 350$ – количество элементов массива I .

В **табл. 2** представлены результаты вычисления значений C_i для десяти случаев выпуска расплава, также представлены продолжительность процесса выпуска расплава и значения угла α поворота конвертера, при котором выполнены расчеты.

Таблица 2
Результаты вычисления C_i при выпуске расплава из конвертера

$T_{сл}, c$	C_1 , тыс. ед.	C_2 , тыс. ед.	C_3 , тыс. ед.	C_4 , тыс. ед.	C_5 , тыс. ед.	C_6 , тыс. ед.
363	15,7	12,8	13,9	12,8	13,8	14,5
352	13,9	12,9	13,0	13,5	13,6	15,5
459	12,9	12,8	14,0	12,7	11,7	17,4
391	13,7	13,4	14,5	13,5	13,3	17,2
319	14,0	13,9	13,0	12,7	14,3	16,9
381	12,0	13,1	13,4	13,9	14,0	17,7
354	16,2	13,0	13,3	14,2	12,1	18,4
393	11,8	13,5	12,7	12,7	13,4	18,1
380	12,9	13,7	14,5	13,1	13,5	15,8
426	12,7	14,7	14,1	13,5	12,8	18,3

График изменения значений C_i представлен на **рис. 4**. По оси абсцисс нанесены отсчёты, соответствующие номеру кадра, полученного от ИД. Для пересчёта шкалы в единицы времени следует разделить номер кадра на значение частоты его приема (12,5 кадров в секунду). Также на графике пунктиром нанесены значения угла наклона конвертера.

Для каждого технологического интервала процесса выпуска стали сформированы статистические массивы значений C_i . По данным 100 случаев выпуска расплава из конвертера доказано соответствие распределения величин C_i нормальному закону. Графики функций плотности вероятностей величин C_i , построенные по выборочным значениям математического ожидания $\mu_C = \bar{C}_i$ и дисперсии $\sigma^2 = S_i^2$ для указанных технологических интервалов, представлены на **рис. 5** [10].

По результатам анализа **рис. 5** сделаны следующие выводы:

- 1) функции плотности вероятностей величин C_i в интервалах 1-5 процесса выпуска стали в значительной степени накладываются друг на друга, что может свидетельствовать об однородности параметров излучения расплава в указанных интервалах;
- 2) функции плотности вероятностей величины C_i в интервале 6 значительно отдален от аналогичных функций из интервалов 1-5 по оси абсцисс в сторону увеличения значений C_i , что свидетельствует о значи-

мом отличии параметров излучения расплава в технологическом интервале 6 от значений в интервалах 1-5.

По результатам дисперсионного анализа выборок значений C_i , полученных на технологических интервалах 1-5 процесса выпуска расплава, подтверждена гипотеза о равенстве их математических ожиданий. Также по критерию Кохрена доказана гипотеза об однородности оценочных дисперсий выборок значений C_i в интервалах 1-5. Обобщив полученные результаты, сделан вывод: выборки значений C_i в технологических интервалах 1-5 процесса выпуска расплава принадлежат одной генеральной совокупности (линия 7, **рис. 6**) и могут быть объединены в одну выборку (параметры выборки представлены в **табл. 3**). Указанное может свидетельствовать о том, что процессы, протекающие на указанных интервалах, имеют общую физическую природу [9].

Также было доказано, что математическое ожидание μ_{1245} объединенной выборки 7 и μ_6 выборки 6 (соответствующей этапу выпуска шлака из конвертера) принадлежат разным генеральным совокупностям и значительно отличаются между собой (**рис. 7**). Данное обстоятельство может быть использовано для диагностирования наличия шлака в потоке расплава при выпуске его из конвертера, а величина $\mu_C = \bar{C}_i$ принята в качестве диагностического признака.

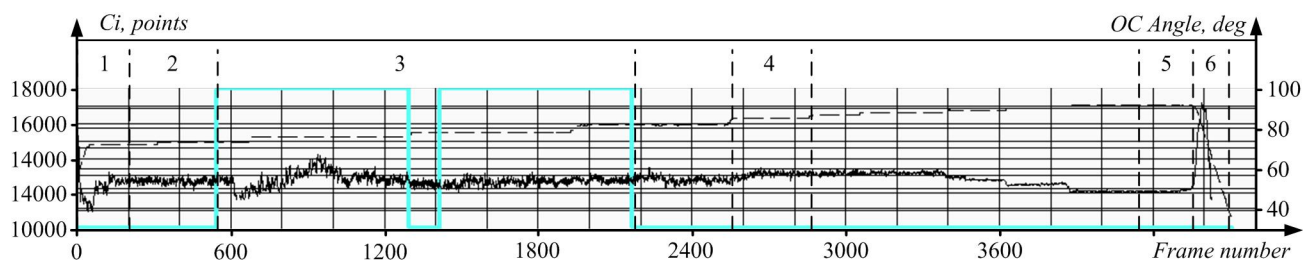


Рис. 4. График изменения значений интенсивности расплава C_i на различных этапах выпуска стали

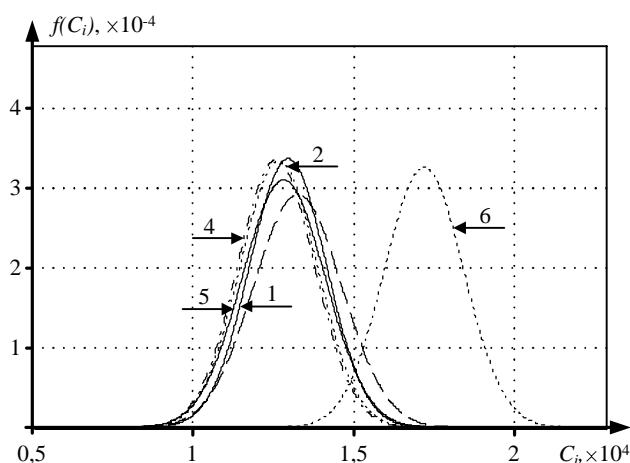


Рис. 5. Графики функций плотности вероятностей величин C_i :

- 1 – попадание первичного шлака в ковш; 2 – до отдачи сыпучих материалов в ковш; 3 – в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш; 4 – при значении угла наклона конвертера 850; 5 – за 30 с до момента попадания шлака в ковш; 6 – при попадании шлака в ковш

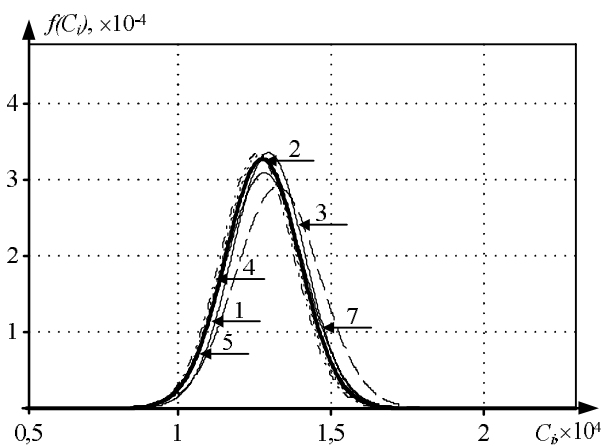


Рис. 6. Графики функций плотности вероятностей величин C_i :

- 1 – попадание первичного шлака в ковш; 2 – до отдачи сыпучих материалов в ковш; 3 – в процессе отдачи сыпучих материалов в ковш; 4 – при значении угла наклона конвертера 850; 5 – за 30 с до момента попадания шлака в ковш; 7 – объединенная выборка

Таблица 3

Параметры объединенной выборки

Объем выборки N_{1245}	Выборочное среднее \overline{C}_{1245} , отн. ед	Выборочная дисперсия S_{1245}^2
400	12746,0	1487178,9

Таблица 5

Границы доверительного интервала для величины C_i

Интервал i	$C_{i \min}$	$C_{i \max}$
Объединённая выборка	10125,4	15366,6
Выборка 6	14304,6	20039,95

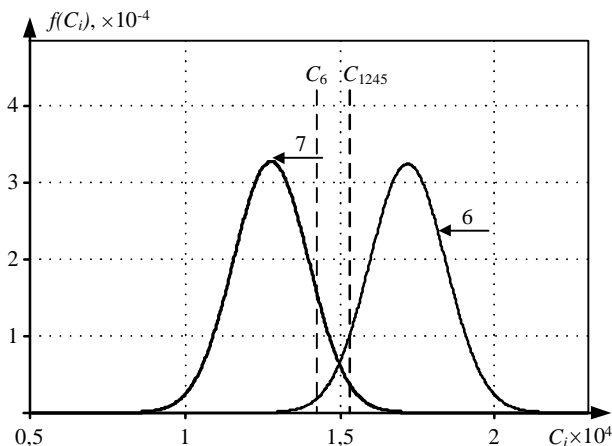


Рис. 7. График функций распределения средних значений интенсивностей в струе металла:
6 – при попадании шлака в ковш;
7 – объединенная выборка

Для определения граничных значения C_i при переходе процесса выпуска с металла на шлак необходимо произвести расчет доверительных интервалов значений C_i при выпуске металла и шлака.

РАСЧЕТ ДОВЕРИТЕЛЬНЫХ ИНТЕРВАЛОВ ИЗМЕНЕНИЯ ВЕЛИЧИНЫ C_i

С целью определения доверительных интервалов для величины C_i из объединенной выборки и выборки 6 выполнена оценка верхней границы доверительного интервала дисперсий σ_i^2 указанных выборок. Оценка выполнена с помощью χ^2 -статистики Пирсона [9] (табл. 4).

Доверительные интервалы с уровнем значимости $q=0,01$ для величины C_i (табл. 5) определены с использованием следующего выражения:

$$\overline{C}_i - \sigma_i < C_i < \overline{C}_i + \sigma_i. \quad (2)$$

С целью определения худшего варианта с точки зрения ошибки диагностирования принят случай наиболее близкого расположения значений C_i : $C_{1245} = C_{1245 \max}$; $C_6 = C_{6 \min}$ (см. рис. 7).

Таблица 4

Верхняя граница доверительного интервала генеральной дисперсии

Выборка	N	$\chi^2_{кр}$	S_i^2	σ_i^2
Объединённая выборка	400	346,5	1487178,9	1716891,38
Выборка 6	96	69,9	1513247,8	2055900,15
Выборка	N	$\chi^2_{кр}$	S_i^2	σ_i^2
Объединённая выборка	400	346,5	1487178,9	1716891,38
Выборка 6	96	69,9	1513247,8	2055900,15

ДИАГНОСТИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ДЕТЕКТИРОВАНИЯ ШЛАКА В ПОТОКЕ РАСПЛАВА ПРИ ВЫПУСКЕ ЕГО ИЗ КОНВЕРТЕРА

Из рис. 7 следует, что области решений о наличии или отсутствии шлака в потоке расплава пересекаются. Следовательно, неизбежны ошибки первого рода H_{21} (ложная тревога) и второго рода H_{12} (пропуск цели). По выражению (3) определена суммарная вероятность ошибочного решения, которая составила 2,1%, что вполне допустимо при решении диагностических задач.

$$E = 2 \int_{-\infty}^{C_{1245}} f_6(C_i) dC_i \cdot \int_{C_6}^{\infty} f_{1245}(C_i) dC_i. \quad (3)$$

По результатам исследований определены диагностические условия детектирования шлака при выпуске расплава из конвертера:

$$\begin{cases} C > 15366,6: \text{ выпуск шлака;} \\ 14304,6 \geq C \geq 15366,6: \text{ состояние} \\ \text{не определено;} \\ C < 14304,6: \text{ выпуск металла.} \end{cases} \quad (4)$$

Следует отметить, что диагностические условия (4) справедливы только для случая использования системы регистрации инфракрасного излучения с конфигурацией элементов, описанной выше, и неизменным местом установки ИД. Так, например, при приближении ИД к потоку расплава абсолютные значения C_i увеличиваются из-за снижения влияния окружающей воздушной среды на прохождение излучения от расплава до сенсора ИД.

На рис. 8 представлена диаграмма изменения значений C_i в процессе выпуска расплава. На рис. 8 изображена заштрихованная область, границы которой получены из диагностических условий 4. Все значения C_i , расположенные ниже указанной области, соответствуют выпуску металла, значения, попадающие в заштрихованную область, соответствуют неопределённому состоянию, а значения, расположенные выше границы области, соответствуют выпуску шлака.

На рис. 8 в начальный момент времени ($Frame\ number=0\dots50$) значения C_i сначала находятся выше границы заштрихованной области, затем резко снижаются, пересекая её, и затем располагаются ниже границы области. Данные изменения значений C_i объясняются попаданием первичного шлака в ковш на начальном этапе выпуска расплава, затем с увеличением угла наклона конвертера (пунктирная линия на рис. 8) концентрация шлака в потоке расплава сокращается до нуля и поток полностью состоит из жидкой стали. Далее до момента $Frame\ number = 4400$ поток полностью состоит из жидкой стали, и значения C_i не достигают заштрихованной области. Затем при попадании шлака в поток расплава значения C_i начинают увеличиваться, и когда концентрация шлака в потоке достигает примерно 70%, значения C_i , пересекая область неопределённого состояния, попадают в область, соответствующую шлаку. На рис. 8 момент детектирования высокой концентрации

шлака в потоке расплава отмечено красным флажком.

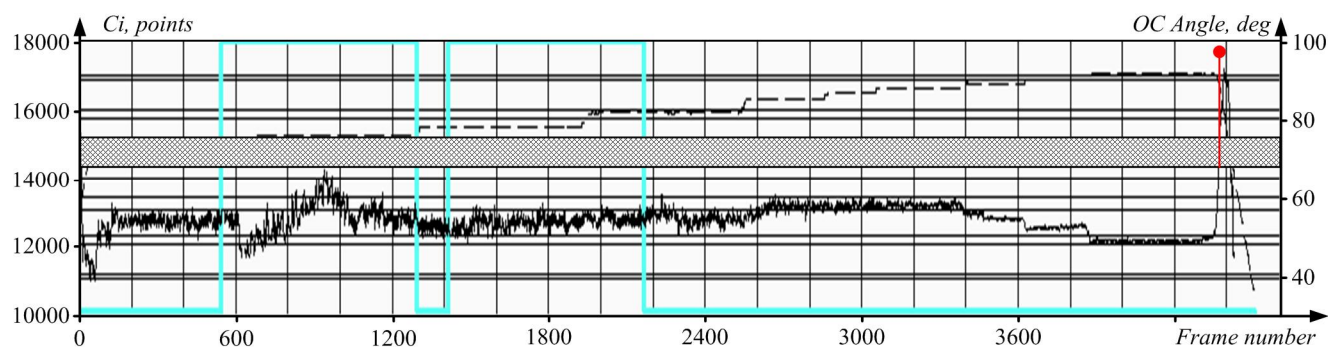


Рис. 8. График изменения значений C_i в процессе выпуска расплава

В результате исследований получены диагностические условия принятия решения о наличии высокой доли шлака (более 70%) в потоке расплава при его выпуске из кислородного конвертера на основе анализа средних значений интенсивности инфракрасного излучения потока расплава и представляют собой совокупность интервалов (4). Макроалгоритм диагностирования содержит следующие этапы:

- в процессе выпуска расплава в реальном масштабе времени создаются массивы значений инфракрасного излучения; по этим массивам по выражению (1) выполняется расчет средних значений интенсивности инфракрасного излучения C_i ;
- значения C_i сравниваются с условиями (4) и принимается решение об одном из следующих трех состояний: выпуск металла, неопределенное состояние, выпуск металла со шлаком.

С целью проверки эффективности диагностирования шлака на конвертере выполнено тестирование приведенного алгоритма диагностирования шлака. Достоверность диагностирования составило 95%. В процессе промышленной апробации результатов исследования было установлено, что система диагностирования вырабатывает сигнал о наличии шлака в потоке расплава на восемь секунд раньше, чем сталевар при визуальном наблюдении потока расплава. С учетом того, что во время выпуска за 1 с в сталеразливочный ковш поступает около 1,23 т расплава, то за 8 с в ковш сможет попасть около 10 т шлака, что весьма негативно сказывается на качестве металлургической продукции и эффективности процесса выплавки стали и её дальнейшей переработки.

В итоге промышленной апробации системы диагностирования появления шлака в расплаве доказано, что её применение позволяет в 2 раза снизить объем шлака в сталеразливочном ковше.

Следует отметить, что полученные диагностические условия не являются универсальными для других сталеплавильных агрегатов, так как числовая информация в значительной степени зависит от технических параметров ИД (диапазона чувствительности, типа объектива и др.) и места его установки (удаленность от источника излучения, угол обзора). Однако методика получения диагностических условий (4), приведенная выше, может быть использована при исследовании потока расплава других сталеплавильных агрегатов. Так, по указанной методике были проведены исследования процесса выпуска расплава на электродуговой сталеплавильной печи и кислородных конвертерах

крупных металлургических предприятий России. Абсолютные значения границ интервалов выражения (4) несколько отличались от представленных в данной работе. Однако алгоритм детектирования, построенный на базе проверки полученных диагностических условий, дал такие же высокие результаты с точки зрения достоверности диагностирования появления шлака в потоке расплава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одним из резервов повышения качества металлургической продукции и технической и экономической эффективности сталелитейного производства является минимизация объема печного шлака в сталеразливочном ковше за счет своевременного диагностирования его наличия в потоке расплава и прекращения выпуска стали со шлаком из кислородного конвертера. Показано, что наиболее эффективным способом выявления шлака в потоке расплава на стадии его выпуска из конвертера является способ, основанный на анализе параметров инфракрасного излучения потока расплава. Разработка эффективной системы диагностирования наличия шлака в потоке расплава позволяет автоматизировать процесс выпуска стали из кислородного конвертера и существенно ограничить объем шлака в сталеразливочном ковше.

В работе на основе анализа массивов интенсивности инфракрасного излучения доказано, что величина математического ожидания, рассчитанная по данным интенсивности инфракрасного излучения на заключительной стадии выпуска металла из конвертера, значительно отличается от математических ожиданий интенсивности, рассчитанных на начальных стадиях выпуска стали. Математическое ожидание интенсивности инфракрасного излучения принято в качестве диагностического признака наличия шлака в расплаве. На основе массивов экспериментальных данных для технологических условий кислородного конвертера определены диагностические условия наблюдения шлака в потоке металла. Предложены методика расчёта диагностических условий и алгоритм диагностирования появления шлака в потоке расплава, позволяющие разработать аналогичные системы для различных конвертеров.

В результате опытно-промышленной апробации разработанной системы диагностирования в условиях действующего металлургического предприятия доказана её техническая эффективность: достоверность диагностирования наличия шлака в потоке расплава составила 95%; объем шлака в сталеразливочном ковше

ше уменьшился почти в 2 раза. Создание достоверной системы диагностирования шлака в потоке расплава создало предпосылки автоматизации процесса выпуска расплава из конвертера.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дюдкин Д.А., Кисиленко В.В. Производство стали. Том 1. Процессы выплавки, внепечной обработки и непрерывной разливки. М.: Теплотехник, 2008. 528 с.
2. Система управления электроприводом фурмы кислородного конвертера: монография / С.И. Лукьянов, Е.С. Суспицын, А.Ю. Мещеряков, С.С. Красильников. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2014. 101 с.
3. Лукьянов С.И., Карандаев А.С., Евдокимов С.А. Разработка и внедрение интеллектуальных систем диагностирования технического состояния электрического оборудования // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2014. №1. С. 129-136.
4. Штилькеринг Б. Эффективность методов отсечки шлака при сливе металла из конвертера // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2002. №10. С. 38-41.
5. Система раннего обнаружения шлака / А.Д. Носов, В.Ф. Дьяченко, В.М. Бузинник, А.М. Формакидов // Труды седьмого конгресса сталеплавильщиков. Магнитогорск, 2002. С. 238-242.
6. Frank Zahorski, Anthony R.A. Lyons. Online slag detection in steelmakingProc. SPIE 4020, Thermosense XXII, 2000. doi:10.1117/12.381544.
7. R. Strąkowski, K. Pacholski, B. Więcek, R. Olbrycht, W. Wittchenand, M. Borecki (2014) Radiative parameters of steel slag for FeO content estimation using multispectral thermography system. Quantitative InfraRed Thermography Journal, vol. 11, Issue 2, pp. 222-232. DOI:10.1080/17686733.2014.970754.
8. Pat. EP 0 922 774 A1 int. Cl.6. C21C 5/28, B22D 2/00, G01F 23/292, G01 J 5/00 System and method for minimizing slag carryover during the tapping of a BOF converter in the production of steel/ Goldstein, Daniel A., Sharan, Alok Easton, Elizabeth Ann. Publ. 16.06.1999.
9. Pat. EP 2177947 A1 Int.Cl. B22D2/00, G03B17/00. Video camera device for detecting molten slag in flow of molten steel/Zhiheng Tian. Publ. 21.04.2010.
10. Лукьянов С.И., Панов А.Н., Васильев А.Е. Основы инженерного эксперимента: учеб. пособие. М.: РИОР: ИНФРА-М, 2018. 99 с.

Поступила в редакцию 30 декабря 2019 г.

INFORMATION IN ENGLISH

SLAG DIAGNOSTIC SYSTEM FOR METAL RELEASE FROM THE OXYGEN CONVERTER BY THE INTENSITY OF INFRARED MELT RADIATION

Sergei I. Lukyanov

D.Sc. (Engineering), Professor, Department of Electronics and Microelectronics, the Director of Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: ieiac@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4685-7627>

Sergey S. Krasilnikov

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «MMK-Informservice», Magnitogorsk, Russia. E-mail: krasilnikov.ss@yandex.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3131-7193>

Dmitry V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Vice Director of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: schvidmit@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1932-9239>

Nickolay V. Shvidchenko

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: n.shvidchenko@magtu.ru. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3917-9218>

Roman S. Pishnograev

Ph.D. (Engineering), Associate Professor, the Department of Electronics and Microelectronics, Power Engineering and Automated Systems Institute, Magnitogorsk State Technical University, Leading Engineer of OSC «Technoap Engineering», Magnitogorsk, Russia. E-mail: rspishnograev@gmail.com. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8854-5723>

One of the ways to increase the competitiveness of domestic products on the world market of ferrous metallurgy is to increase the efficiency of steelmaking units and the quality of products or product by minimizing the amount of furnace slag in a steel pouring ladle. The latter is achieved through continuous monitoring, mainly visual, of the melt flow at the stage of its release from the bath of the oxygen converter into the steel pouring ladle. The work presents the results of experimental studies and statistical processing of data sets of the intensity of infrared radiation from the melt flow on existing steelmaking

units in various technological ranges of steel production. It has been proved that as a diagnostic sign of the presence of slag in the produced melt, one can apply the mathematical expectation of infrared radiation of the melt. Diagnostic conditions for observing slag in the produced melt are determined by the change in the radiation intensity. A technique and an algorithm for calculating the diagnostic conditions for observing slag in the melt for domestic oxygen converters are proposed. The results of industrial testing of the research results are presented.

Keywords: diagnostic system, oxygen converter, infrared radiation, steel production, monitoring.

REFERENCES

1. Dyudkin D.A., Kisilenko V.V. *Proizvodstvo stali. Tom 1. Protsessy vyplavki, vnepechnoy obrabotki i nepreryvnoy razlivki* [Steel production. Vol. 1. Processes of smelting, secondary refining and continuous casting]. Moscow, Heat engineer, 2008. 528 p. (In Russian)
2. Lukyanov S.I., Suspitsyn E.S., Meshcheryakov A.Yu., Krasilnikov S.S. *Sistema upravleniya elektropriivodom furny kislorodnogo konvertora: monografiya* [Oxygen converter lance electric drive control system : monograph]. Magnitogorsk: Publishing House Nosov Magnitogorsk State Technical University, 2014. 101 p.
3. Lukyanov S.I., Karandaev A.S., Evdokimov S.A. Development and implementation of intelligent systems for diagnosing the technical condition of electrical equipment. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Bulletin of MSTU], 2014, no 1, pp. 129-136. (In Russian)
4. Shilker B. The effectiveness of methods of slag cutoff when draining metal from the converter. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* [Metallurgical and mining industry], 2002, no. 10, pp. 38-41. (In Russian)
5. Nosov A.D., Diachenko V.F., Buzinnik V.M., Formakidov A.M. Early slag detection system. *Trudy sedmogo kongressa staleplavilscshikov* [Proceedings of the Seventh Congress of Steelmakers]. Magnitogorsk, 2002, pp. 238-242. (In Russian)
6. Frank Zahorszki, Anthony R. A. Lyons. Online slag detection in steelmaking Proc. SPIE 4020, Thermosense XXII, 2000. doi: 10.1117 / 12.381544
7. R. Strąkowski, K. Pacholski, B. Więcek, R. Olbrycht, W. Wittchen and M. Borecki. Radiative parameters of steel slag for FeO con-tent estimation using multispectral thermography system . *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, vol. 11, issue 2, pp. 222-232. DOI: 10.1080 / 17686733. 2014.970754
8. Patent EP 0 922 774 A1 int. CI.6. C21C 5/28, B22D 2/00, G01F 23/292, G01 J 5/00/ System and method for minimizing slag carryover during the tapping of a BOF converter in the production of steel / Goldstein, Daniel A., Sharan, Alok Easton, Eliza-beth Ann, publ. 06/16/1999.
9. Patent EP 2 177 947 A1 Int.CI. B22D2 / 00, G03B17 / 00 Video camera device for detecting molten slag in flow of molten steel / Zhiheng Tian, publ. 04/21/2010
10. Lukyanov S.I., Panov A.N., Vasiliev A.E. *Osnovy inzhernogo eksperimenta* [Fundamentals of an engineering experiment: textbook. Manual]. Moscow: RIOR: INFRA-M, 2018. 99 p. (In Russian)

Система диагностирования шлака при выпуске металла из кислородного конвертера по интенсивности инфракрасного излучения расплава / С.И. Лукьянов, С.С. Красильников, Д.В. Швидченко, Н.В. Швидченко, Р.С. Пишнограев // Электротехнические системы и комплексы. 2020. № 1(46). С. 46-53. [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-46-53)

Lukyanov S.I., Krasilnikov S.S., Shvidchenko D.V., Shvidchenko N.V., Pishnograev R.S. Slag Diagnostic System For Metal Release From the Oxygen Converter by the Intensity of Infrared Melt Radiation. *Elektrotekhnicheskie sistemy i komplekсы* [Electrotechnical Systems and Complexes], 2020, no. 1(46), pp. 46-53. (In Russian). [https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1\(46\)-46-53](https://doi.org/10.18503/2311-8318-2020-1(46)-46-53)