

## РАЗРАБОТКА И АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ КРИТЕРИЕВ НАЛИЧИЯ ШЛАКА ПРИ РАЗЛИВКЕ СТАЛИ

Полещенко Д. А.<sup>1</sup>, Корнев А. В.<sup>2</sup>

(Старооскольский технологический институт  
им. А.А. Угарова (филиал) НИТУ «МИСИС», Старый Оскол)

*В настоящее время одной из ключевых задач в промышленности является обеспечение высокой эффективности производства, в том числе и в сталелитейной отрасли. Одной из нерешенных задач в этой области в процессе непрерывной разливки стали является определение момента начала поступления шлака в промежуточный ковш при сливе металла из сталеразливочного ковша. Сравнительный анализ методов раннего распознавания шлака показывает, что в настоящее время высокоэффективной системы отсечки шлака не существует. В данной работе для решения задачи раннего распознавания шлака используется именно вибрационный метод ввиду высокой информативности сигнала виброускорения. Апробируется два метода анализа сигнала виброускорения манипулятора защитной трубы для своевременной отсечки шлака и предотвращения его попадания в промежуточный ковш. Анализ результатов апробации показывает, что наилучшую эффективность, равную ста процентам, обеспечивает подход, основанный на анализе спектра мощности сигнала виброускорения совместно с данными о весе плавки. Критерии отсечки шлака на основании дискретного вейвлет-анализа срабатывают в 67 % случаев, что демонстрирует их работоспособность и дает основания для более тщательного исследования данного метода с целью увеличения его эффективности.*

Ключевые слова: непрерывная разливка стали, огибающая спектра мощности, сигнал веса плавки, дискретный вейвлет-анализ, критерии отсечки шлака.

### 1. Введение

Существует три метода разливки: сверху в изложницы («дождевая» разливка), разливка снизу («сифонная» разливка) и с использованием устройства непрерывной разливки стали. Наиболее распространенным на сегодняшний день является именно последний способ [12], при котором жидкому металлу придается форма прямоугольника или квадрата.

---

<sup>1</sup> Дмитрий Александрович Полещенко, к.т.н., доцент (po-dima@yandex.ru).

<sup>2</sup> Артем Викторович Корнев, студент магистратуры (korenev01@mail.ru).

Данный метод состоит из совокупности операций, одной из которых является процесс слива стали из сталеразливочного ковша. В данной операции наиболее ответственным этапом служит определение начала поступления шлака в промежуточный ковш [7].

Решение задачи своевременного закрытия шиберного затвора для предотвращения попадания шлака в промковш очень важно, так как его унос приводит к большому количеству негативных последствий.

Во-первых, попадание шлака в промковш и затем в кристаллизатор вызывает ухудшение качества стали. Во-вторых, шлак негативно влияет на промковш, сокращая его срок службы. В шлаке содержатся элементы, которые будут постепенно разрушать его футеровку. В итоге из-за эрозии огнеупорной футеровки промежуточного ковша необходимо остановить разливку, чтобы устранить риск для безопасности процесса [11].

Но нужно также учитывать и тот факт, что преждевременное закрытие шиберного затвора приводит к тому, что в стальковше остается большая часть годного металла, которая бракуется вместе со шлаком [2].

Таким образом, металлургические предприятия несут потери в процессе непрерывной разливки стали.

На сегодняшний день существует несколько методов обнаружения шлака, основанных на различных принципах.

Например, инфракрасный метод [21] основывается на анализе инфракрасного излучения струи металла. Главным недостатком данного способа является тот факт, что он требует наличие открытой струи металла. Однако в большинстве случаев поток стали защищен от окисления сливной трубой, что делает невозможным применение данного метода.

Другим методом является косвенный расчет массы стальковша [2], который основывается на пересчете массы стали и шлака в уровень. Ввиду того, что в большинстве случаев погрешность измерения массы является большой, точность данного метода низкая.

Помимо этого разработан электромагнитный способ, который является одним из наиболее точных на сегодняшний день методов. Он основывается на установке в зону потока металла

двух электромагнитных катушек, одна из которых является излучателем, другая – приемником, а поток стали – своеобразным сердечником [11]. Однако данный метод имеет значительный недостаток, который заключается в том, что чувствительные элементы необходимо защищать от действия повышенных температур с помощью футеровки.

Кроме того, все большую популярность приобретает вибрационный метод раннего распознавания шлака, так как сигнал вибрации обладает высокой информативностью [1, 15]. Данный метод позволяет на основе сигнала вибрации сливной трубы зафиксировать момент истечения шлака. В настоящее время ведутся попытки создания таких систем, например, в [10], но качество их работы остается низким.

Таким образом, на сегодняшний день эффективность различных систем раннего распознавания является недостаточной, что требует дополнительных исследований с целью ее повышения.

Все же вибрационная система определения начала истечения шлака является наиболее перспективной ввиду ее преимуществ, таких как высокое быстродействие и низкая стоимость [10].

## **2. Цель и методы исследований**

В данной работе рассматривается вибрационный метод. Сигналы виброускорения получены с реального промышленного объекта – машины непрерывного литья заготовок.

Вибрация создается за счет биения потока стали о шибберный затвор [10]. Различная плотность стали (порядка  $6,9 \text{ т/м}^3$ ) и шлака (порядка  $2,5 \text{ т/м}^3$ ) приводит к снижению уровня вибрации при попадании последнего в струю металла [4, 16].

Данный факт говорит о том, что с помощью анализа уровня сигнала виброускорения существует возможность определить начало истечения шлака [3]. Снижение вибрации на некоторую величину и будет являться сигналом начала истечения шлака.

Таким образом, целью исследования является разработка алгоритма обработки сигналов виброускорения, способного

своевременно выявлять снижение его амплитуды при начале попадания шлака в промежуточный ковш.

Задачи исследований заключаются в модернизации критериев отсечки шлака для фиксации момента его истечения, описанных в [3], с применением методов:

- анализа спектра мощности совместно с данными веса плавки;
- дискретного вейвлет-анализа для фиксации момента истечения шлака.

Разработанный алгоритм будет внедрен в существующую автоматизированную систему поддержания уровня стали в промежуточном ковше. При начале поступления шлака в промежуточный ковш на основании данного алгоритма будет формироваться сигнал управления на закрытие шиберов.

### **3. Модернизация метода отсечки шлака на основании анализа спектра мощности**

В работе [3] был предложен метод отсечки шлака на основании анализа спектральной плотности мощности [20] сигнала виброускорения, эффективность которого составила 93%.

В данной работе рассмотрена модернизация вышеописанного метода, основанная на совместном анализе мощности сигнала и данных о весе плавки. Его усовершенствование будет способствовать уменьшению количества ложных срабатываний, что в конечном итоге позволит увеличить эффективность метода.

Расчет спектров мощности производится на основании формулы (1), т.е. таким же образом, как и в работе [3]:

$$(1) \quad S_{xx}(f) = \lim_{N \rightarrow +\infty} \frac{(\Delta t)^2}{T} \left| \sum_{n=1}^N x_m e^{-i2\pi f n \Delta t} \right|^2,$$

где  $T$  – период времени;  $N$  – длина сигнала  $x$ ;  $\Delta t$  – интервал выборки в секундах.

Спектры мощности анализируются для различных частотных диапазонов (0–3000 Гц, 800–1200 Гц, 0–100 Гц). Помимо этого их построение также производится для различных временных интервалов, а именно за пять, десять и пятнадцать секунд до ручного закрытия шиберов оператором.

Результаты анализа показывают, что для большинства сигналов снижение мощности происходит на частотах 0–100 Гц, что также представлено в работе [8].

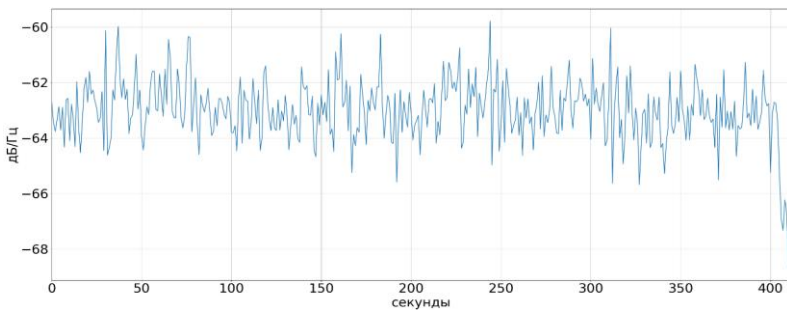
Для данного частотного диапазона вычисляется усредненное значение мощности сигнала (см. формулу (2)):

$$(2) \quad \overline{P_{xx}^q(k)} = \frac{\sum_{i=0}^{f_{max}} S_{xx}^k(i)}{f_{max}},$$

где  $k = \overline{1, K^q}$  – номер такта, соответствующий временному отрезку в одну секунду и содержащий 30 000 отсчетов;  $K^q$  – номер такта, на котором произошло ручное закрытие шибера оператором;  $q = \overline{1, 15}$  – число экспериментов;  $f_{max}$  – верхняя граница частоты, равная 100 Гц.

Такая величина называется огибающей спектра мощности и вычисляется с момента отключения автоматического регулирования шибера и до его закрытия оператором.

Исследование огибающих показывает, что перед закрытием шибера наблюдается ниспадающий тренд (см. рис. 1).



*Рис. 1. Огибающая спектра мощности*

В данной работе предлагается совместный анализ мощности сигнала виброускорения и данных о весе плавки с целью уменьшения количества ложных срабатываний разрабатываемых критериев отсечки шлака.

Для анализа данных о весе плавки предлагается определить некоторый параметр, на основании которого можно будет судить о начале поступления шлака в промковш.

Данный параметр должен быть обратно пропорциональным весу плавки ввиду того, что вероятность поступления шлака в промковш увеличивается при уменьшении массы содержимого в стальковше. Такая величина называется коэффициентом массы.

Ввиду особенностей съема данных для экспериментов сигнал веса плавки является ступенчатым (см. рис. 2), хотя в реальности он имеет непрерывный характер. Для компенсации данного эффекта формируется коэффициент приращения  $z$ , который может быть вычислен по формуле (3), полученной эмпирическим путем:

$$(3) \quad z(t) = \begin{cases} z(t-1) + h, & m(t) = m(t-1), \\ 0 & \text{иначе;} \end{cases}$$

где  $t$  – время;  $m$  – вес плавки;  $h$  – константа приращения;  $z(0) = 0$ .

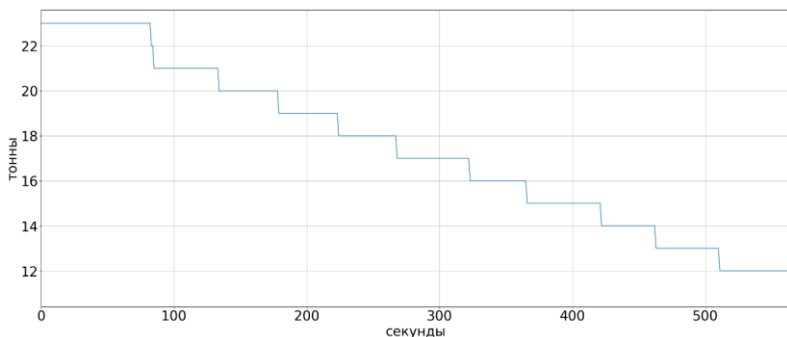


Рис. 2. Сигнал веса плавки

Расчет коэффициента массы осуществляется согласно выражению (4):

$$(4) \quad r = \frac{g + z}{m},$$

где  $g$  – некоторая эмпирически определяемая константа.

### 3.1. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ НАЛИЧИЯ ШЛАКА НА ОСНОВЕ ОГИБАЮЩЕЙ СПЕКТРА МОЩНОСТИ И КОЭФФИЦИЕНТА МАССЫ

Анализ огибающих спектров мощности совместно с данными о весе плавки позволяет разработать следующие критерии наличия шлака.

Критерий 1: если значение мощности снижается более, чем на 6,6% относительно среднего значения мощности за все время наблюдения, то пошел шлак ( $A = 1$ ):

$$(5) \quad A = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < 0,934 \frac{\sum_{j=1}^k P_{xx}^q(j)}{k}, \\ 0, & P_{xx}^q(k) \geq 0,934 \frac{\sum_{j=1}^k P_{xx}^q(j)}{k}. \end{cases}$$

где  $A$  – искомая пороговая функция;  $q = \overline{1,15}$  – число экспериментов;  $k = \overline{10, K^q}$ .

Критерий 2: регистрируется начало поступления шлака, когда уменьшение значения текущей мощности достигает более 5% относительно среднего за все время наблюдения при условии достижения значения коэффициента массы 0,43:

$$(6) \quad A = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < 0,95 \frac{\sum_{j=1}^k P_{xx}^q(j)}{k} \quad \text{и} \quad r > 0,43, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Вычисление коэффициента массы производится по формуле (2) для  $g = 3$  и  $h = 0,002$ .

Критерий 3: регистрируется начало поступления шлака, когда уменьшение значения текущей мощности достигает более 5% относительно скользящего среднего с размером окна в 10 тактов при условии достижения значения коэффициента массы 0,44:

$$(7) \quad A = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < 0,95 \frac{\sum_{j=k-10}^k P_{xx}^q(j)}{10} \quad \text{и} \quad r > 0,44, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Как и в критерии 2, вычисление коэффициента массы производится по формуле (2) для  $g = 3$ ,  $h = 0,01$ .

Критерий 4: регистрируется начало поступления шлака, когда уменьшение значения текущей мощности достигает более 2,5% относительно скользящего среднего с размером окна в 10 тактов при условии достижения значения коэффициента массы 1,2:

$$(8) \quad A = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < 0,975 \frac{\sum_{j=k-10}^k P_{xx}^q(j)}{10} \quad \text{и} \quad r > 1,2, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Параметры  $h$  и  $g$  равны соответствующим величинам, описанным в критерии 3.

Критерий 5: регистрируется начало поступления шлака, когда текущее значение мощности снижается на величину более 4,5% относительно скользящего среднего шириной окна в 10 тактов при условии, что скользящее среднее на текущем такте меньше среднего за все время наблюдения, а также если текущее значение мощности является минимальным за все время наблюдения и последовательно уменьшается в течение последних трех тактов:

$$(9) \quad A = \begin{cases} 1, & R_1 \cdot R_2 \cdot R_3 \cdot R_4 = 1, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

В свою очередь расчет параметров  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $R_4$  выполняется согласно выражениям (10)–(13):

$$(10) \quad R_1 = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < P_{xx}^q(k-1) < P_{xx}^q(k-2) < P_{xx}^q(k-3), \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$(11) \quad R_2 = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) < 0,955 \frac{\sum_{j=k-10}^k P_{xx}^q(j)}{10}, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$



$$(12) R_3 = \begin{cases} 1, & \frac{\sum_{j=k-10}^k P_{xx}^q(j)}{10} < \frac{\sum_{j=1}^k P_{xx}^q(j)}{k}, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

$$(13) R_4 = \begin{cases} 1, & P_{xx}^q(k) = \min_{1 \leq i \leq k} \{P_{xx}^q(i)\}, \\ 0 & \text{иначе.} \end{cases}$$

Результаты апробации показывают, что данные критерии позволяют зафиксировать момент начала истечения шлака во всех экспериментах, что можно увидеть в таблице 1.

*Таблица 1. Анализ своевременности срабатывания критериев наличия шлака на основе огибающей спектра мощности и коэффициента массы*

| Дата и номер<br>разливки | Активация критерия, такт |      |      |      |      | Ручное<br>закрытие<br>шибера, такт | Расхождение по кри-<br>терию,<br>такт |    |   |   |    |
|--------------------------|--------------------------|------|------|------|------|------------------------------------|---------------------------------------|----|---|---|----|
|                          | 1                        | 2    | 3    | 4    | 5    |                                    | 1                                     | 2  | 3 | 4 | 5  |
| 03.17_1                  | 608                      | —    | —    | —    | —    | 614                                | 6                                     | —  | — | — | —  |
| 03.17_2                  | 748                      | —    | —    | —    | 745  | 751                                | 3                                     | —  | — | — | 6  |
| 03.17_3                  | 665                      | —    | —    | —    | 667  | 668                                | 3                                     | —  | — | — | 1  |
| 05.17_1                  | —                        | —    | 878  | —    | —    | 880                                | —                                     | —  | 2 | — | —  |
| 05.17_3                  | 1025                     | 1025 | 1025 | —    | 1026 | 1029                               | 4                                     | 4  | 4 | — | 3  |
| 05.17_4                  | 1223                     | 1223 | 1223 | 1222 | —    | 1224                               | 1                                     | 1  | 1 | 2 | —  |
| 05.17_5                  | 1085                     | —    | —    | —    | 1084 | 1090                               | 5                                     | —  | — | — | 6  |
| 08.17_1                  | —                        | 815  | —    | —    | —    | 817                                | —                                     | 2  | — | — | —  |
| 08.17_2                  | 508                      | —    | —    | —    | 508  | 548                                | 40                                    | —  | — | — | 40 |
| 08.17_3                  | —                        | —    | 981  | —    | —    | 984                                | —                                     | —  | 3 | — | —  |
| 08.17_4                  | —                        | —    | —    | —    | 564  | 565                                | —                                     | —  | — | — | 1  |
| 09.17_1                  | 677                      | —    | —    | —    | —    | 679                                | 2                                     | —  | — | — | —  |
| 09.17_2                  | —                        | —    | —    | 764  | —    | 765                                | —                                     | —  | — | 1 | —  |
| 09.17_3                  | —                        | 807  | —    | —    | —    | 837                                | —                                     | 30 | — | — | —  |
| 09.17_4                  | 758                      | —    | —    | —    | 758  | 761                                | 3                                     | —  | — | — | 3  |

Анализ результатов, представленных в таблице, свидетельствует о том, что этот метод не является идеальным ввиду из-

лишне заблаговременного срабатывания критериев в нескольких экспериментах (порядка 13%). Данный факт свидетельствует о том, что такой метод хотя и обладает высокой эффективностью, однако имеет и свои недостатки.

#### 4. Дискретный вейвлет-анализ

В данной работе описана апробация метода анализа сигнала с помощью вейвлет-преобразования.

Основным преимуществом вейвлет-преобразования по сравнению с Фурье-преобразованием является тот факт, что оно позволяет получить частотно-временное представление сигнала [14].

В данной работе рассматривается метод отсечки шлама на основе дискретного вейвлет-анализа сигнала вибрации [19].

Дискретное вейвлет-преобразование (ДВП) реализуется по следующей формуле [13, 17]:

$$(14) \quad DWT(j, k) = \frac{1}{2^j} \int x(t) \psi\left(\frac{t - 2^j k}{2^j}\right) dt,$$

где  $x(t)$  – входной сигнал;  $\psi(t)$  – материнский вейвлет, или так называемая базисная вейвлет-функция.

Расчет  $\psi(t)$  производится по формуле

$$(15) \quad \psi_{j,k} = \frac{1}{\sqrt{2}} \psi(2^j t - k).$$

Координаты сдвига  $b$  и масштаб  $a$  принимают вид

$$(16) \quad b = 2^j k,$$

$$(17) \quad a = 2^j.$$

В основе получения ДВП сигнала  $x$  лежит использование высокочастотного  $g$  и низкочастотного  $h$  фильтров [5].

В результате получают детализирующие коэффициенты (после ВЧ-фильтра) и коэффициенты аппроксимации (после НЧ-фильтра) (см. рис. 3) [6, 9] согласно формулам

$$(18) \quad y_{high}[k] = \sum_n x[n] g[2k - n].$$

$$(19) \quad y_{low}[k] = \sum_n x[n] h[2k - n],$$

где  $x[n]$  – входной сигнал;  $y_{low}[k]$  – выход после НЧ-фильтра;  $y_{high}[k]$  – выход после ВЧ-фильтра.

Причем частотный диапазон коэффициентов аппроксимации и коэффициентов детализации может быть выражен через (20) и (21) соответственно [18]:

$$(20) \ cA_i = \left[ 0, \frac{f_s}{2^{i+1}} \right],$$

$$(21) \ cD_i = \left[ \frac{f_s}{2^{i+1}}, \frac{f_s}{2^i} \right],$$

где  $i$  – количество уровней декомпозиции;  $f_s$  – частота дискретизации.

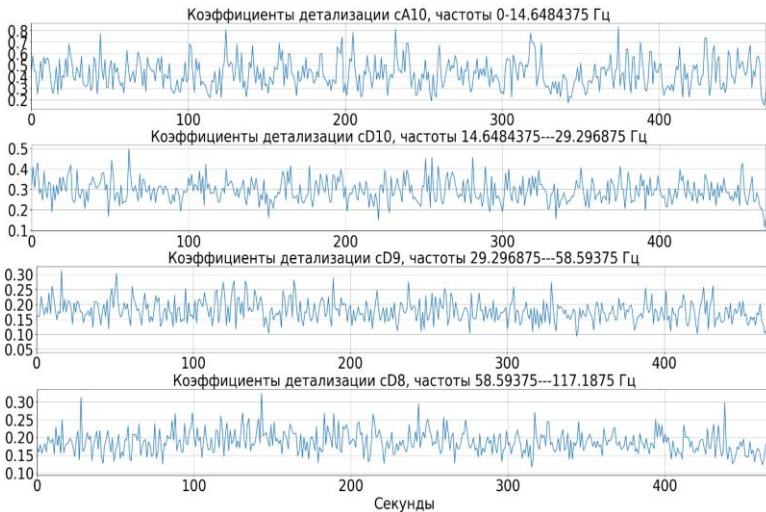


Рис. 3. Кривые значений коэффициентов детализации на данных одной из разливок, полученные с использованием койфлета

Для построения используются функции:

- койфлет;
- Добеши;
- асимметричный вейвлет.

Первоначально строятся кривые значений коэффициентов детализации на основе функции койфлета. Для этого анализи-

руются имеющиеся данные 15 разливок, из них выделяются отрезки с момента отключения системы автоматического регулирования положения шиберов до отсечки потока оператором, т.е. прекращения разливки (см. рис. 3).

Для проведения сравнительного анализа подобные кривые строятся с использованием прочих функций вейвлет-преобразования (асимметричный вейвлет и Добеши). Анализ показывает, что изменение применяемой функции вейвлет-преобразования не дает существенного изменения в характере получаемого на выходе результата, поэтому далее принимается решение проводить исследование с использованием койфлета.

#### 4.1. РАЗРАБОТКА КРИТЕРИЕВ ОТСЕЧКИ ШЛАКА

В ходе анализа графиков, получаемых на различных разливах, формируются эмпирические критерии, позволяющие идентифицировать ситуацию начала истечения шлака из сталковша.

Для этого в качестве базового значения выбирается среднее значение сигнала, на основании которого строятся огибающие коэффициентов аппроксимации и детализации:

$$(22) \quad M_q^{n,\psi}(k) = \frac{\sum_{i=1}^l y_k^{n,\psi}(i)}{l},$$

где  $k = \overline{1, K^q}$  – номер такта (1 такт равен 1 с);  $q = \overline{1, 15}$  – число экспериментов;  $K^q$  – номер такта, на котором оператор закрыл шибер;  $l$  – количество коэффициентов аппроксимации (детализации)  $k$ -го такта;  $n$  – уровень преобразования;  $y_k^{n,\psi}$  – коэффициенты аппроксимации (детализации)  $k$ -го такта  $n$ -го уровня преобразования, полученные на основании вейвлета  $\psi$ .

Рассматриваемая частотная область выбирается в диапазоне 0–117 Гц, при этом берется различное (8 и 9) количество ступеней разложения.

Критерии выглядят следующим образом.

Критерий 1: регистрируется начало поступления шлака при условии, когда уменьшение значения ОКД восьмого уровня

преобразования достигает более 40% относительно среднего за все время наблюдения:

$$(23) \quad A = \begin{cases} 1, & M_q^{8,coif}(k) < 0,6 \frac{\sum_{j=1}^k M_q^{8,coif}(j)}{k}, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $M_q^{8,coif}$  – ОКД 8-го уровня преобразования на основании вейвлет-функции койфлет;  $A$  – пороговая функция.

Критерий 2: регистрируется начало поступления шлака, когда уменьшение значения ОКД девятого уровня преобразования достигает более 50% относительно среднего за все время наблюдения при условии достижения значения коэффициента массы 0,21:

$$(24) \quad A = \begin{cases} 1, & M_q^{9,coif}(k) < 0,5 \frac{\sum_{j=1}^k M_q^{9,coif}(j)}{k} \quad \text{и} \quad r > 0,21, \\ 0 & \text{иначе,} \end{cases}$$

где  $M_q^{9,coif}$  – ОКД 9-го уровня преобразования на основании вейвлет-функции койфлет.

Расчет коэффициента массы производится для  $g = 3$ ,  $h = 0,002$ .

Полученные на данных всех разливок результаты сводятся в таблицу 2 с целью обобщающего анализа.

Из представленных данных наглядно видно, что полученные критерии позволяют зафиксировать начало истечения шлака в 67 процентах случаев, что в условиях реального производства недостаточно. В дальнейшем планируется более углубленное изучение данного метода с целью увеличения показателя эффективности.

*Таблица 2. Результаты срабатывания критериев отсечки шлака на основе анализа коэффициентов детализации вейвлет-преобразования*

| Дата<br>и номер<br>разливки | Срабатывание<br>критерия, такт |      | Отсечка<br>шлака<br>оператором,<br>такт | Отклонение<br>по критерию,<br>такт |    |
|-----------------------------|--------------------------------|------|-----------------------------------------|------------------------------------|----|
|                             | 1                              | 2    |                                         | 1                                  | 2  |
| 03.17_1                     | –                              | 605  | 614                                     | –                                  | 9  |
| 03.17_2                     | 749                            | 749  | 751                                     | 2                                  | 2  |
| 03.17_3                     | 665                            | –    | 668                                     | 3                                  | –  |
| 05.17_1                     | –                              | –    | 880                                     | –                                  | –  |
| 05.17_3                     | 1026                           | 1025 | 1029                                    | 3                                  | 4  |
| 05.17_4                     | 1223                           | –    | 1224                                    | 1                                  | –  |
| 05.17_5                     | 1088                           | 1086 | 1090                                    | 2                                  | 4  |
| 08.17_1                     | –                              | –    | 817                                     | –                                  | –  |
| 08.17_2                     | 510                            | 509  | 548                                     | 38                                 | 39 |
| 08.17_3                     | –                              | –    | 984                                     | –                                  | –  |
| 08.17_4                     | 533                            | –    | 565                                     | 32                                 | –  |
| 09.17_1                     | 674                            | –    | 679                                     | 5                                  | –  |
| 09.17_2                     | –                              | –    | 765                                     | –                                  | –  |
| 09.17_3                     | –                              | 829  | 837                                     | –                                  | 8  |
| 09.17_4                     | –                              | –    | 761                                     | –                                  | –  |

## 5. Заключение

В данной работе проведено исследование двух различных методов анализа сигнала виброускорения.

Эффективность методов представлена в таблице 3.

*Таблица 3. Эффективность рассмотренных методов*

| Наименование метода                            | Эффективность метода, % |
|------------------------------------------------|-------------------------|
| Метод на основании анализа спектра мощности    | 100                     |
| Метод на основании дискретного вейвлет-анализа | 67                      |

Наилучший результат показали критерии отсечки шлака, основанные на анализе спектра мощности сигнала виброускорения совместно с данными о весе плавки, сработавшие во всех экспериментах, однако в 13% случаев их срабатывание было излишне раннее.

Помимо того в данной работе проведено исследование сигналов виброускорения с помощью дискретного вейвлет-анализа совместно с данными о весе плавки, на основании которых разработаны критерии отсечки шлака, эффективность которых составила порядка 67%. Это демонстрирует работоспособность данного метода, и в перспективе дальнейшие исследования позволят увеличить его эффективность. Таким образом, станет возможным его апробация в реальных промышленных условиях, что и является для авторов целью будущей работы.

### ***Литература***

1. ЕРЕМЕНКО Ю.И., ПОЛЕЩЕНКО Д.А. *О разработке и промышленной апробации системы отсечки шлака при разливке стали* // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. – 2019. – Т. 62, №5. – С. 353–359.
2. КРИВОНОСОВ В.А., МИТИН А.С. *Повышение точности оценки уровней металла в стальковше и промковше МНЛЗ с использованием нелинейного наблюдателя состояния* // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2010. – Т. 6, №4. – С. 41–45.
3. ПОЛЕЩЕНКО Д.А., КОРЕНЕВ А.В. *Разработка метода раннего распознавания шлака сталеразливочного ковша машины непрерывного литья заготовок* // Управление большими системами. – 2024. – Вып. 107. – С. 121–141.
4. СЕМЕНОВ М.В., КРАСИЛЬНИКОВ С.С., ШВИДЧЕНКО Д.В. и др. *Вибродетектирование шлака при сливе стали из стальковша в промежуточный ковш* // Автоматизированные технологии и производства. – 2015. – №2. – С. 40–42.
5. ALSHARABI K., BIN SALAMAN Y., ABDURRAQUEEB A.M. et al. *EEG signal processing for Alzheimer's disorders using discrete wavelet transform and machine learning approaches* // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 89781–89797.

6. BELKACEMI B., SAAD S., GHEMARI Z. et al. *Detection of induction motor improper bearing lubrication by discrete wavelet transforms (DWT) decomposition* // Instrum. Mes. Metrol. – 2020. – Vol. 19, No. 5. – P. 347–354.
7. CHAKRABORTY A., GHOSE J., CHAKRABORTY S. et al. *Vision-based detection system of slag flow from ladle to tundish with the help of the detection of undulation of slag layer of the tundish using an image analysis technique* // Ironmaking & Steelmaking. – 2022. – Vol. 49, No. 1. – P. 10–15.
8. CHEN D., XIAO H., JI Q. *Vibration style ladle slag detection method based on discrete wavelet decomposition* // The 26th Chinese Control and Decision Conference (CCDC-2014). – IEEE, 2014. – P. 3019–3022.
9. GUO T., ZHANG T., LIM E. et al. *A review of wavelet analysis and its applications: Challenges and opportunities* // IEEE Access. – 2022. – Vol. 10. – P. 58869–58903.
10. GÜVENÇ M.A., KAPUSUZ H., MISTIKOĞLU S. *Experimental study on accelerometer-based ladle slag detection in continuous casting process* // The Int. Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2020. – Vol. 106. – P. 2983–2993.
11. KAPUSUZ H., GÜVENÇ M.A., MISTIKOĞLU S. *A review study on ladle slag detection technologies in continuous casting process* // Int. Advanced Researches and Engineering Journal. – 2019. – Vol. 3, No. 3. – P. 144–149.
12. LOUHENKILPI S. *Continuous casting of steel* // Treatise on Process Metallurgy. – Elsevier, 2014. – P. 373–434.
13. NISHAT T.R., KIM J.M. *Bearing fault classification of induction motors using discrete wavelet transform and ensemble machine learning algorithms* // Applied Sciences. – 2020. – Vol. 10, No. 15. – P. 5251.
14. POUYANI M.F., VALI M., GHASEMI M.A. *Lung sound signal denoising using discrete wavelet transform and artificial neural network* // Biomedical Signal Processing and Control. – 2022. – Vol. 72. – P. 103329.
15. TAN D.P., JI S.M., LI PEIYU et al. *Development of vibration style ladle slag detection methods and the key technologies* // Science China. Technological Sciences. 2010. – Vol. 53, No. 9. – P. 2378–2387.



16. TAN D.P., LI P.Y., JI Y.X. et al. *SA-ANN-based slag carry-over detection method and the embedded WME platform* // IEEE Trans. on Industrial Electronics. – 2012. – Vol. 60, No. 10. – P. 4702–4713.
17. WAHAB M.F., O'HAVER T.C. *Wavelet transforms in separation science for denoising and peak overlap detection* // Journal of Separation Science. – 2020. – Vol. 43, No. 9–10. – P. 1998–2010.
18. WANG M.H., LU S.D., LIAO R.M. *Fault diagnosis for power cables based on convolutional neural network with chaotic system and discrete wavelet transform* // IEEE Trans. on Power Delivery. – 2021. – Vol. 37, No. 1. – P. 582–590.
19. WANG Y., LI Z., WANG C. et al. *Implementation of discrete wavelet transform* // 12th IEEE Int. Conf. on Solid-State and Integrated Circuit Technology (ICSICT). – IEEE, 2014. – P. 1–3.
20. YOUNGORTH R.N., GALLAGHER B.B., STAMPER B.L. *An overview of power spectral density (PSD) calculations* // Optical Manufacturing and Testing VI. – 2005. – Vol. 5869. – P. 206–216.
21. ZHANG Z., BIN L., JIANG Y. *Slag detection system based on infrared temperature measurement* // Optik. – 2014. – Vol. 125, No. 3. – P. 1412–1416.

## **DEVELOPMENT AND EFFICIENCY ANALYSIS OF SLAG CRITERIA DURING STEEL CASTING**

**Dmitry Poleshchenko**, Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol, Cand.Sc., assistant professor (po-dima@yandex.ru).

**Artem Korenev**, Sary Oskol technological institute n.a. A.A. Ugarov (branch) NUST «MISIS», Sary Oskol, master's student (korenev01@mail.ru).

*Abstract: Currently, one of the key tasks in industry is to ensure high production efficiency, also in the steel industry. One of the unsolved problems in this area in the process of continuous casting of steel is the determination of the moment when slag begins to enter the intermediate ladle when pouring metal from the ladle. A comparative analysis of methods of early slag detection shows that currently there is no highly effective slag cut-off system. In this paper, in order to solve the problem of early slag detection, the vibration method was used due to the high informativeness of the vibration acceleration signal. Two methods of analyzing the vibration accel-*

*eration signal of the protective tube manipulator were tested for timely slag cutoff and preventing its entering into the intermediate ladle. Analysis of the results of testing showed that the best efficiency, equal to one hundred percent, was provided by the approach based on the analysis of the power spectrum of the vibration acceleration signal together with the data on the weight of the melting. Slag cutoff criteria based on discrete wavelet analysis worked in 67 percent of cases, which demonstrates their performance and gives grounds for more thorough research of this method in order to increase its efficiency.*

**Keywords:** continuous steel casting, power spectrum envelope, melting weight signal, discrete wavelet analysis, slag cutoff criteria.

УДК 658.562.3 + 004.021

ББК 30.607

*Статья представлена к публикации  
членом редакционной коллегии С.Л. Подвальным.*

*Поступила в редакцию 25.10.2024.  
Опубликована 31.03.2025.*