

УДК 669.18:621.87

**С.А. Бедарев** (канд. техн. наук, доц.),  
ГВУЗ «Донецкий национальный технический университет»

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССО-ЦЕНТРОВОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОТСЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПОПЛАВКОВОГО ТИПА**

*В работе представлена математическая модель для определения массо-центровочных характеристик отсечного элемента поплавкового типа, используемого для отсечки конечного технологического шлака при выпуске стали из кислородного конвертера. Также, модель позволяет определить глубину погружения отсечного элемента в жидкую сталь, при которой обеспечивается равновесное состояние элемента после сброса его в ванну конвертера. Представлены результаты расчетов для элементов четырех основных типов, исследования которых выполнялись на физических моделях. Представленная математическая модель позволяет выполнить поиск наиболее рациональной конструкции отсечного элемента для эффективной отсечки шлака.*

**Ключевые слова:** массо-центровочные характеристики, математическая модель, отсечка шлака, поплавковый элемент, кислородный конвертер, физическое моделирование.

### ***Проблема и ее связь с научными и практическими задачами.***

Среди главных задач, решаемых в настоящее время металлургии, можно выделить производство качественной конвертной стали. Показатели качества напрямую зависят от количества конечного технологического шлака, который попадает в сталеразливочный ковш во время выпуска плавки из кислородного конвертера. Одним из наиболее эффективных способов отсечки шлака считается применение отсечных элементов поплавкового типа, которые вводятся в ванну конвертера специальными манипуляторами.

***Анализ исследований и публикаций.*** Существуют несколько типов применяемых отсечных элементов, каждый из которых характеризуется своими геометрическими параметрами и физическими свойствами материалов [1, 2]. Однако, как показали исследования, не все они могут выполнять поставленную задачу с обеспечением необходимой степени отсечки шлака, поэтому поиск и обоснование рациональных конструкций отсечных элементов остается важной и актуальной задачей.

Проведенные на основе физического моделирования исследования функционирования четырех основных типов отсечных элементов, позволили установить явление осцилляции, вызванное соотношением сил, действующих на элемент [3]. Амплитуда колебаний отсечного элемента обуславливает степень отсечки шлака и количество остающейся в конвертере после окончательного перекрытия сталевыпускного отверстия стали. В работе [4] авторами статьи изложены принципы построения математической модели движения отсечного элемента после сбрасывания в ванну конвертера. Данная модель позволяет изучать поведение и определять наиболее рациональные конструктивные параметры отсечных элементов различных конструкций с учетом вместимости конвертера и технологии плавки.

**Постановка задачи.** Для выполнения математического моделирования необходимо иметь полную информацию о массо-центровочных характеристиках элемента. Кроме того количество стали, остающейся в конвертере, зависит от глубины погружения  $h_{\text{ПОГР}}$  головной части отсечного элемента в жидкую сталь (рис.1а). Основываясь на данных [5], условие, соответствующее моменту возникновения осцилляций отсечного элемента, можно представить в виде:

$$h_{\text{СТ}} < 4 \cdot h_{\text{ПОГР}} ,$$

где  $h_{\text{СТ}}$  – высота уровня жидкой стали над разливочным отверстием конвертера,

поэтому, чем меньше  $h_{\text{ПОГР}}$ , тем дольше отсечной элемент сохранит равновесие при уменьшении уровня жидкой стали в конвертере в процессе ее выпуска и тем выше будет эффективность отсечки шлака.

*Целью данной работы* является создание математической модели для определения массо-центровочных характеристик отсечного элемента поплавкового типа, а также его глубины погружения в жидкую сталь, при которой обеспечивается равновесное состояние элемента после сброса его в ванну конвертера, что позволяет обосновать наиболее рациональную конструкцию отсечного элемента для эффективной отсечки шлака.

#### **Изложение материалов и результаты.**

В общем случае отсечной элемент можно представить как тело, состоящее из трех частей: стального стержня, головной части и огнеупорного покрытия стержня (рис.1б), поэтому объем и массу отсечного элемента можно представить как:

$$V_{\Theta} = V_{\text{СТ}} + V_{\Gamma} + V_{\Pi},$$

$$m_{\Theta} = m_{\text{СТ}} + m_{\Gamma} + m_{\Pi},$$

где  $V_{\text{СТ}}$ ,  $m_{\text{СТ}}$  – объем и масса стержня;

$V_{\Gamma}$ ,  $m_{\Gamma}$  – объем и масса головной части;

$V_{\Pi}$ ,  $m_{\Pi}$  – объем и масса огнеупорного покрытия стержня.

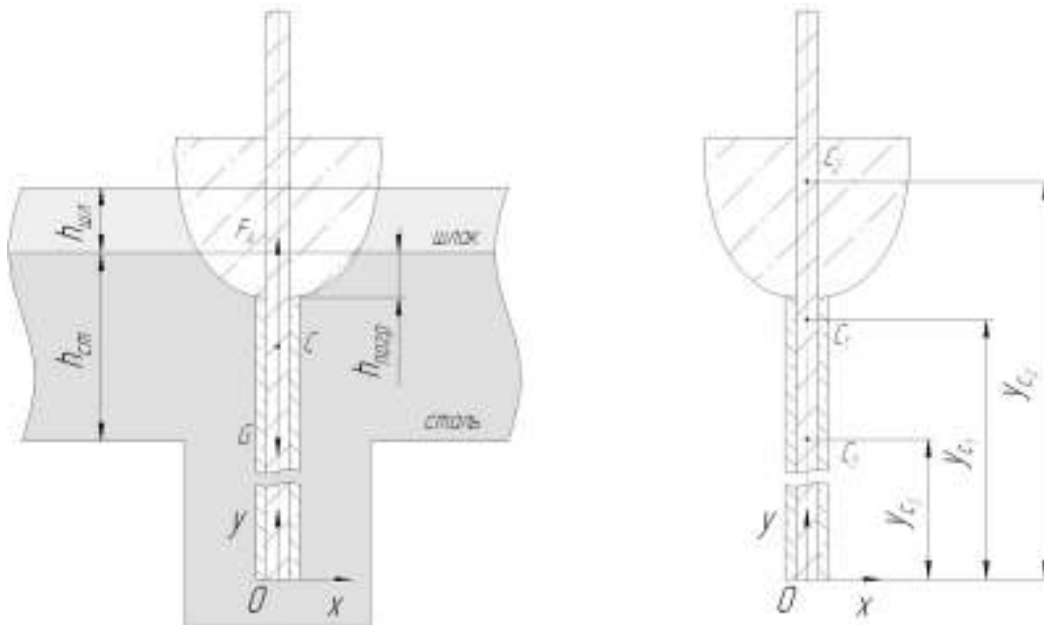


Рис.1 - Равновесное состояние отсечного элемента (а) и расчетная схема к определению центра тяжести (б)

Стальной стержень характеризуется диаметром  $d_{\text{СТ}}$  и длиной  $l_{\text{СТ}}$ , тогда его объем и масса равны

$$V_{\text{СТ}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{СТ}}^2}{4} \cdot l_{\text{СТ}}, \quad m_{\text{СТ}} = \rho_{\text{СТ}} \cdot V_{\text{СТ}},$$

где  $\rho_{\text{СТ}}$  – плотность стали.

Огнеупорное покрытие толщиной  $\Delta$  наносится на боковую поверхность стального стержня на длине  $l_{\Pi}$ , поэтому:

$$V_{\Pi} = \frac{\pi}{4} \left( (d_{\text{СТ}} + 2\Delta)^2 - d_{\text{СТ}}^2 \right) \cdot l_{\Pi}, \quad m_{\Pi} = \rho_{\text{огн}} \cdot V_{\Pi},$$

где  $\rho_{\text{огн}}$  – плотность огнеупорного материала.

Головная часть отсечного элемента представляет собой тело вращения и может иметь произвольную форму. Образующая кривая боковой поверхности такого тела может быть представлена уравне-

нием  $x=f(y)$ , тогда объем головной части определяется по зависимости:

$$V_{\Gamma} = \pi \cdot \int_{y_{\text{н}}}^{y_{\text{к}}} f^2(y) dy - \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{СТ}}^2 \cdot l_{\Gamma} , \quad (1)$$

где  $y_{\text{н}}$ ,  $y_{\text{к}}$  – ординаты, соответствующие начальному и конечному сечению головной части, в локальной системе координат, т.е.  $y_{\text{н}} = 0$ ,  $y_{\text{к}} = l_{\Gamma}$ ;

$l_{\Gamma}$  – высота головной части,

а масса равна

$$m_{\Pi} = \rho_{\text{ОГН}} \cdot V_{\Gamma} .$$

Например, в качестве уравнений образующих боковой поверхности могут выступать зависимости

$$f(y) = a + b \cdot y + c \cdot y^2 ; f(y) = a + b \cdot y^{1,5} + c \cdot y^{0,5} ;$$

$$f(y) = \sqrt{a + b \cdot y^{0,5}} ; f(y) = \frac{1}{a + b \cdot y + c \cdot y^3} ,$$

где  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коэффициенты регрессии, определяемые по координатам точек образующей линии  $(r_{\text{н}}, y_{\text{н}})$ ,  $(r_{\text{пр}}, y_{\text{пр}})$ ,  $(r_{\text{к}}, y_{\text{к}})$ . Здесь  $r_{\text{н}}$ ,  $r_{\text{пр}}$ ,  $r_{\text{к}}$  – радиусы начального, промежуточного и конечного сечения головной части.

Нахождение интеграла, входящего в формулу (1), целесообразно выполнять численным методом, например, методом трапеций. При этом шаг интегрирования можно принимать равным 0,001 м.

Для случая, когда головная часть выполнена в виде ступенчатого цилиндра с диаметрами  $D_1$  и  $D_2$  и высотами  $l_1$  и  $l_2 = l_{\Gamma} - l_1$  ступеней, ее объем равен

$$V_{\Gamma} = \frac{\pi}{4} \left[ (D_1^2 - d_{\text{СТ}}^2) \cdot l_1 + (D_2^2 - d_{\text{СТ}}^2) \cdot l_2 \right] .$$

С учетом объема и массы отсечного элемента можно определить его приведенную плотность:

$$\rho_{\text{Э}} = \frac{m_{\text{Э}}}{V_{\text{Э}}} .$$

Ордината центра тяжести отсечного элемента  $u_{\text{С}}$ , как составного тела, определяется по формуле

$$y_C = \frac{y_{C1}m_{CT} + y_{C2}m_{Г} + y_{C3}m_{П}}{m_{CT} + m_{Г} + m_{П}},$$

где  $y_{C1}$ ,  $y_{C2}$ ,  $y_{C3}$  – ордината центра тяжести стального стержня, головной части и огнеупорного покрытия.

Ордината центра тяжести стержня в принятой системе координат:

$$y_{C1} = l_{CT}/2.$$

Ордината центра тяжести головной части определяется по формуле

$$y_{C2} = \frac{\int_{y_H}^{y_K} y \cdot f(y) dy}{\int_{y_H}^{y_K} f(y) dy} + l_{П}.$$

Ордината центра тяжести огнеупорного покрытия:

$$y_{C3} = l_{П}/2.$$

Расчеты показали, что масса головной части составляет 93...97% от массы всего отсечного элемента, поэтому при рассмотрении задачи о равновесии элемента можно рассматривать только головную часть.

Известно, что условие равновесия тела (т.е. равенство силы тяжести  $G$  и выталкивающей силы  $F_A$ , см. рис.1а), находящегося в двух жидкостях, имеет вид:

$$\frac{V_{П.Г}}{V_{Г}} = \frac{\rho_{Э} - \rho_{ШЛ}}{\rho_{Ж.СТ} - \rho_{ШЛ}},$$

где  $V_{П.Г}$  – объем головной части, погруженной в жидкую сталь;  
 $\rho_{ШЛ}$  – плотность конвертерного шлака,  $\rho_{ШЛ} = 2300...2700 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $\rho_{Ж.СТ}$  – плотность жидкой стали,  $\rho_{Ж.СТ} = 7050...7200 \text{ кг/м}^3$ .

Из этого соотношения

$$V_{П.Г} = \frac{\rho_{Э} - \rho_{ШЛ}}{\rho_{Ж.СТ} - \rho_{ШЛ}} V_{Г},$$

тогда из уравнения, полученного на основании (1), можно определить глубину погружения  $h_{\text{ПОГР}}$  головной части в расплав

$$\pi \int_0^{h_{\text{ПОГР}}} f^2(y) dy - \frac{\pi}{4} \cdot d_{\text{СТ}}^2 \cdot h_{\text{ПОГР}} - V_{\text{П.Г}} = 0 . \quad (2)$$

Корень уравнения (2) отыскивается методом итераций, степень точности можно принимать  $10^{-3} \dots 10^{-5}$ .

Правильность конструкции головной части проверяется по условию

$$l_{\Gamma} - h_{\text{ПОГР}} > h_{\text{ШЛ}} ,$$

где  $h_{\text{ШЛ}}$  – высота слоя шлака в конвертере.

Выполнение этого условия свидетельствует о том, что головная часть отсечного элемента будет находиться над уровнем шлака.

В таблице приведены результаты расчета для отсечных элементов разной конструкции (рис. 2), исследования которых выполнялись на физических моделях [3]. При этом было принято  $d_{\text{СТ}} = 0,015$  м;  $l_{\text{СТ}} = 1,25$  м;  $\Delta = 0,01$  м;  $l_{\text{П}} = 0,75$  м;  $\rho_{\text{СТ}} = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $\rho_{\text{ОГН}} = 2800$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{ШЛ}} = 2500$  кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_{\text{Ж.СТ}} = 7200$  кг/м<sup>3</sup>;  $h_{\text{ШЛ}} = 0,200$  м.

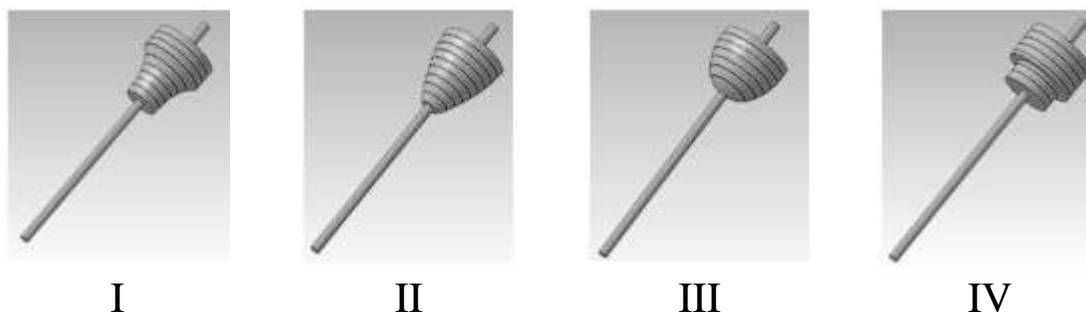


Рис. 2 - Типы исследованных отсечных элементов

Анализ полученных результатов, что для исследованных отсечных элементов, имеющих близкие геометрические параметры, масса варьируется от 53,5 до 119 кг, приведенная плотность практически одинакова и составляет около 2830...2860 кг/м<sup>3</sup>, центр тяжести расположен на высоте около 0,9 м от начала координат, а глубина погружения в жидкую сталь имеет широкий диапазон изменения. Наименьшие значения глубины погружения имеют элементы типа IV (головная часть – ступенчатый цилиндр), I (гиперболлоид) и III (эллипсоид), т.е. отсечные элементы с таким конструктивным исполнением дольше сохраняют равновесие при уменьшении уровня жидкой стали в

конвертере в процессе ее выпуска и, в конечном итоге, обеспечат более высокую степень отсечки шлака. Полученные результаты расчетов согласуются с данными исследований, проведенных на физических моделях [3] и установивших, что наиболее эффективными являются варианты элементов типа IV и III.

Таблица - Результаты расчета

Вид отсечного элемента	Геометрические параметры головной части	Объем $V_{\Sigma}$ , м <sup>3</sup>	Масса $m_{\Sigma}$ , кг	Приведенная плотность $\rho_{\Sigma}$ , кг/м <sup>3</sup>	Ордината центра тяжести $U_{\Sigma}$ , м	Глубина погружения в расплав, м
I	$f(y) = \frac{1}{9,1 - 7 \cdot y - 85,1 \cdot y^3}$ ; $l_1 = 0,3$ м; $l_{\Gamma} = 0,45$ м	0,025	70	2845	0,845	0,045
II	$f(y) = 0,06 + 0,59 \cdot y - 0,55 \cdot y^2$ ; $l_{\Gamma} = 0,45$ м	0,0378	107	2830	0,9	0,103
	$f(y) = 0,03 - 0,46 \cdot y^{1,5} + 0,5 \cdot y^{0,5}$ ; $l_{\Gamma} = 0,35$ м	0,042	119	2826	0,934	0,067
III	$f(y) = \sqrt{0,00085 + 0,086 \cdot y^{0,5}}$ ; $l_{\Gamma} = 0,35$ м	0,039	110	2828	0,93	0,058
IV	$D_1 = 0,3$ м; $D_2 = 0,18$ м; $l_1 = 0,2$ м; $l_{\Gamma} = 0,35$ м	0,0187	53,5	2860	0,934	0,042

### **Выводы и направления дальнейших исследований.**

В статье представлены зависимости для определения массовых характеристик и глубины погружения в жидкую сталь отсечных элементов поплавкового типа.

Данные зависимости являются составной частью математической модели движения отсечного элемента, позволяющей выполнять поиск наиболее рациональной конструкции.

### Список литературы

1. Опыт разработки систем отсечки шлака для сталеплавильных агрегатов / [С.П. Еронько, А.Ю. Цупрун, С.А. Бедарев, С.В. Мечик] // «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». - 2007. - Вып. 9. - С. 81 - 87.

2. Новые устройства для реализации технологии бесшлакового выпуска стали из кислородного конвертера / [С.П. Еронько, А.Н. Смирнов, С.А. Бедарев и др.] // Процессы литья. – 2007. – №4. – С. 16 – 21.
3. Исследования на физической модели процесса взаимодействия отсечных элементов поплавоквого типа с потоками расплава в ванне конвертера / [С.П. Еронько, Е.В. Ошовская, С.А. Бедарев, С.В. Мечик] // «Черметинформация». Бюллетень «Черная металлургия». – 2009. – Вып.6. – С. 39–45.
4. Ошовская Е.В. Задача поиска эффективной конструкции элементов поплавоквого типа для отсечки конвертерного шлака / Е.В. Ошовская, С.А. Бедарев, И.А. Брозьянский // Материалы X Международной научно-технической студенческой конференции [«Механика жидкости и газа»]. - Донецк: ДонНТУ, 2011. – С. 90-94.
5. Стурова И.В. Присоединение массы цилиндра, пересекающего границу раздела двухслойной невесомой жидкости конечной глубины / И.В. Стурова // Прикладная механика и техническая физика. – 2003. – Т.44, №4. – С. 76–82.

Стаття надійшла до редакції 26.04.2013

**С.О. Бедарев. ДВНЗ «Донецькій національний технічний університет»**

### **Визначення масоцентровочних характеристик відсічних елементів поплавоквого типу**

*Представлена математична модель для визначення масоцентровочних характеристик відсічного елемента поплавоквого типу, що використовується для відсічення кінцевого технологічного шлаку при випуску сталі із кисневого конвертера. Також модель дозволяє визначити глибину занурення відсічного елемента в рідку сталь, при якій забезпечується рівноважний стан елемента після скидання його в ванну конвертера. Представлені результати розрахунків для елементів чотирьох основних типів, дослідження яких виконувалися на фізичних моделях. Представлена математична модель дозволяє виконати пошук найбільш раціональної конструкції відсічного елемента для ефективного відсічення шлаку.*

**Ключові слова:** масоцентровочні характеристики, математична модель, відсічення шлаку, поплавоквий елемент, кисневий конвертер, фізичне моделювання.

**S.Bedarev. Donetsk National Technical University**

### **Defining Mass-Centering Characteristics of Cut-off Parts of Float Type**

The paper presents a mathematical model for defining mass centering characteristics of cut-off parts, which are used to cut-off the final process slag during steel teeming from BOF. Besides, the model allows estimating the depth of a cut-off part's immersion in liquid steel, which provides the equilibrium state of this part after it was dropped to the converter bath. The calculation results for the parts of the four major types are presented, the research was performed on physical models. This mathematical model allows searching for the most rational design of cut-off parts for the effective slag cut-off.

**Keywords:** mass-centering characteristics, mathematical model, slag cut-off, cut-off parts, oxygen converter, physical modeling.