

УДК 669.14

д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ошовская Е. В.,
Пономарева Е. А.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

ОБОСНОВАНИЕ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩЕЙ СНИЖЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ ЗАРАСТАНИЯ КАНАЛА КОВШОВОГО ЗАТВОРА

Проанализированы существующие способы снижения интенсивности налипания частиц на стенки выпускного канала ковшового затвора во время разливки стали и выполнено теоретическое обоснование параметров работы вибрационной системы, препятствующей уменьшению объемного расхода истекающего из ковша металла.

Ключевые слова: разливочный ковш, шиберный затвор, зарастание выпускного канала, вибрационное воздействие.

Наряду с известными преимуществами, полученными от применения на сталеразливочных ковшах шиберных затворов взамен стопорных устройств, производственники столкнулись с проблемами, связанными с интенсивным образованием настывли в выпускном канале во время разливки (резкое снижение скорости истечения жидкого металла и разрушение стенок канала из-за его промывания кислородом для удаления слоя отложений) [1].

Процесс затягивания каналов разливочных стаканов при разливке стали, в соответствии с результатами экспериментальных исследований, приведенных в работе [2], включает несколько последовательных стадий: смачивание жидким металлом поверхности канала стакана; образование на ней пленки, состоящей из окислов компонентов металла; восстановление железа из окислов на поверхности канала алюминием, поступающим из струи стали; избирательная кристаллизация стали на восстановленных кристаллах железа, вызывающая образование сплошной настывли, которая резко уменьшает проходное сечение канала разливочного стакана. Это послужило мотивацией поиска способов снижения интенсивности зарастания канала ковшового затвора с целью стабилизации скоростного режима разливки.

Специалистами фирмы «Шибер» (г. Москва) разработана конструкция шиберного затвора, нижняя (подвижная) огнеупорная плита которого снабжена пористой вставкой для подачи в выпускной канал во время его перекрытия специальной газовой смеси, сгорающей при контакте с жидкой сталью и выделяющей дополнительное тепло, препятствующее образованию твердых частиц [3]. С этой же целью в качестве альтернативного решения сотрудниками фирмы «Вулкан» (г. Тула) предусмотрено использование электрического нагревательного элемента в виде спирали, встроенной в гнездовой блок разливочного узла ковша [4].

В ранее опубликованных работах [5, 6] приведены также данные об использовании разливочных огнеупорных стаканов с газопроницаемой стенкой, позволяющей осуществлять под избыточным давлением подачу инертного газа, пузырьки которого, проникая через поры в канал, должны препятствовать образованию отложений.

С учетом положительного опыта применения вибрационного воздействия для разобобщения кристаллов со стенкой литейной формы в начальный период затвердевания стальных, медных и бронзовых отливок, полученного отечественными исследователями [7–9], возникла идея ис-

пользования установленного эффекта для снижения интенсивности зарастания канала ковшового затвора.

Возможность активного влияния на скорость процесса налипания твердых частиц на стенки канала шиберной системы была подтверждена результатами проведенных авторами данной статьи модельных и теоретических исследований [10, 11], что послужило основой для разработки и патентования конструкции скользящего затвора, оборудованного пневматическим возбудителем вертикально направленных колебаний [12]. Конструктивная схема затвора приведена на рисунке 1. Он содержит верхнюю металлическую обойму 5, жестко закрепленную на днище 7 сталеразливочного ковша и удерживающую неподвижную огнеупорную плиту 4, которая состыкована с разливочным стаканом 6. В нижней металлической обойме 8, имеющей возможность перемещения относительно верхней обоймы 5, размещены огнеупорная плита 3 и прижатый к ней снизу стакан-коллектор 1. На металлической обойме 8 с помощью резьбовых хвостовиков 2 жестко закреплены пневматические вибраторы 9, количество которых может составлять от 2 до 4. Полости вибраторов посредством трубок 10 связаны с тройником 11, соединенным с

помощью гибкого металлического рукава 12 с трубопроводом, подводящим к разливочному ковшу сжатый воздух. При его подаче в полости вибраторов их подвижные элементы, совершая колебания, оказывают вертикально направленное вибрационное воздействие на огнеупорные элементы затвора, формирующие его разливочный канал. Иницируемый при этом колебательный процесс в огнеупорной части разливочного устройства способствует отрыву частиц, налипающих на стенках сталевого выпускного канала, что позволяет снизить интенсивность его зарастания. Новизна данного технического решения защищена патентом Российской Федерации [13].

Расчет и проектирование опытно-промышленного образца модернизированного ковшового затвора предполагают наличие исходных данных для вычисления значений соответствующих конструктивных и энергосиловых параметров его узла возбуждения вибрации. Речь идет о требуемой интенсивности вибрационного воздействия на огнеупорные элементы шиберного устройства, при которой, с учетом поглощения затрачиваемой энергии керамическими изделиями, формирующими сталевогопускной канал, будет обеспечено заметное снижение скорости его зарастания.

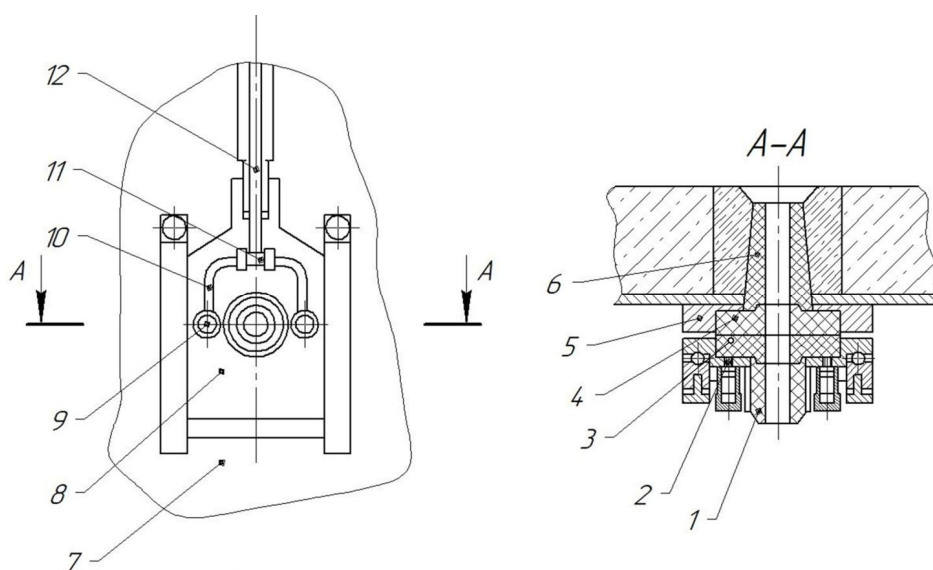


Рисунок 1 Конструктивная схема усовершенствованного затвора

Зарождающийся на поверхности стенки канала кристалл, в соответствии с классическими представлениями о механизме кристаллизации, имеет правильно ограниченную или близкую к ней форму, определяемую типом кристаллической решетки твердого металла. При этом гранями кристалла являются плоскости с наибольшей плотностью упаковки атомов. Для сплава на основе железа кристалл с гране- или объемно-центрированной кубической решеткой имеет форму октаэдра. Рост кристалла происходит по дендритной схеме, и предполагаемый механизм вибрационного воздействия на него связан с увеличением относительной скорости движения жидкой стали, вызванным колебаниями стенки канала разливочного стакана.

Параметры вибрационного воздействия на огнеупорную часть шиберного затвора, при которых может быть гарантирован отрыв от стенки сталевыпускного канала зародившегося кристалла или обламывание растущего дендрита, можно назначить исходя из опыта, полученного при использовании вибрации в целях влияния на кристаллическую структуру отливок из разных металлов. По данным авторов работ [7–9], заметное изменение зерен за счет разрушения фронта кристаллизации под действием вибрации происходило при значениях параметров реализуемых колебательных процессов, указанных в таблице 1. Причем скорость движения металла относительно формирующихся дендритов, обусловленная действием вибрации, должна составлять 0,15–0,2 м/с.

Таблица 1

Рекомендуемые значения параметров вибрационного воздействия на кристаллизующийся металл

Материал слитков	Значения параметров вибрационного воздействия	
	частота, Гц	амплитуда, мм
Медь	18–20	1,4–1,6
Бронза	24–26	0,3–0,5
Сталь	35–40	1–2,5

Интенсивность распространяющейся волны при вибрационном воздействии численно равна энергии, переносимой ею за единицу времени сквозь единицу площади поверхности, нормальной к направлению волнового движения:

$$I = \frac{1}{2} \rho v \omega^2 A^2, \quad \frac{\text{Дж}}{\text{см}^2}, \quad (1)$$

где ρ — плотность материала огнеупорного изделия, подвергаемого вибрационному воздействию;

v — фазовая скорость распространения продольной волны вдоль вертикальной оси разливочного стакана;

ω — циклическая частота колебаний;

A — амплитуда колебаний.

Фазовая скорость распространения продольной волны:

$$v = \sqrt{\frac{E}{\rho}},$$

где E — модуль Юнга для материала стакана;

ρ — плотность материала стакана.

Для магнетитового разливочного стакана $E = 4 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$, $\rho = 3000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Из-за энергопоглощения огнеупорными элементами затвора интенсивность вибрационного воздействия по мере удаления от точки приложения ослабевает по экспоненциальному закону [14]

$$I_x = I_0 e^{-2\alpha x}, \quad (2)$$

где I_0 — интенсивность упругой волны в точке приложения возбуждающей силы;

α — линейный коэффициент поглощения упругих волн, зависящий от свойств среды и частоты волны;

x — удаление от точки приложения возбуждающей силы.

Значение линейного коэффициента поглощения упругой волны для каждого из огнеупорных изделий шиберного затвора при фиксированной частоте колебаний рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{\ln K}{h},$$

где K — коэффициент отражения по амплитуде сигнала при прохождении через слой материала;

h — толщина слоя материала.

Коэффициент отражения вибрационного сигнала определяли как отношение значения виброускорения на заданной частоте колебаний, возбуждаемых пневматическим вибратором при его контакте с нижней поверхностью огнеупорного элемента α_H , и значения виброускорения в точке контроля на верхней поверхности огнеупора α_B :

$$K = \frac{\alpha_H}{\alpha_B}.$$

С целью получения данных о значениях линейного коэффициента поглощения упругой волны α по методике, подробно описанной в работе [15], с использованием анализатора вибрации 795 М предварительно определили значения коэффициента K для каждого из огнеупорных элементов шибберного затвора и образуемых ими стыков. Затем по данным замеров вычислили соответствующие значения коэффициента α .

Требуемую интенсивность упругой волны в средней части ковшового стакана I_{KC} рассчитали по формуле (1) с учетом рекомендуемых значений амплитуды A и частоты колебаний ω для стали, приведенных в таблице 1; предварительно определенного значения фазовой скорости распространения продольной волны v и справочного значения плотности материала ковшового стакана.

Поскольку в соответствии с конструктивной схемой модернизированного затвора (рис. 1) пневматические вибраторы закреплены под нижней его огнеупорной плитой, то интенсивность упругой волны, распространяющейся от точки их установки вверх вдоль продольной оси сталевого канала, определялась как

$$I_0 = \frac{I_{KC}}{e^{-2\alpha_1 x_1} + e^{-2\alpha_2 x_2}},$$

где α_1 — линейный коэффициент поглощения упругой волны материалом ковшового стакана;

x_1 — расстояние от средней части ковшового стакана до его нижней торцевой поверхности;

α_2 — линейный коэффициент поглощения упругой волны материалом огнеупорной плиты затвора;

x_2 — толщина огнеупорной плиты.

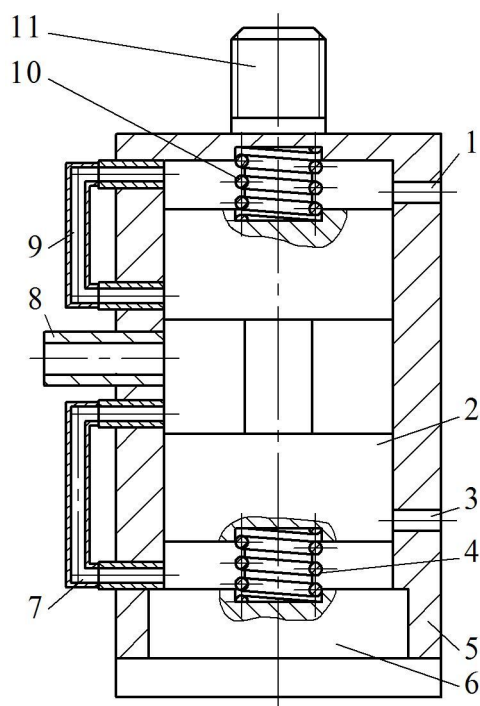
Полученное значение I_0 является основополагающим фактором для расчета конструктивных и энергосиловых параметров вибрационной системы ковшового затвора, которая может включать от 2 до 4 пневматических поршневых вибраторов, равномерно размещенных на металлической обойме нижней огнеупорной плиты вокруг стакана-коллектора. Основная задача при этом состоит в определении динамической осадки и статической нагрузки, эквивалентной ударному воздействию поршня вибратора (рис. 2) на его пружины, размер и упругие свойства которых должны обеспечивать возбуждения вертикально направленных колебаний, сообщаемых огнеупорным элементам шибберного затвора с учетом его типоразмера.

Расчет реальных вибросистем на ударную нагрузку, как известно, связан со значительными трудностями, обусловленными наличием контактных упругих и пластических деформаций, совместный учет которых существенно усложняет решение поставленной задачи. Поэтому для инженерного приложения ограничились энергетическим методом расчета.

Мощность, требуемая для возбуждения вертикально направленных колебаний, позволяющих отрывать частицы от стенок канала ковшового стакана:

$$N_K = I_0 S,$$

где S — площадь поперечного сечения ковшового стакана.



- 1 — верхнее выпускное отверстие; 2 — поршень;
3 — нижнее выпускное отверстие; 4 — нижняя пружина; 5 — корпус вибратора; 6 — пробка;
7 — нижний перепускной канал; 8 — подводный трубопровод; 9 — верхний перепускной канал;
10 — верхняя пружина; 11 — хвостовик

Рисунок 2 Конструктивная схема пневматического поршневого вибратора

В таблице 2 приведены значения N_K для шибберных затворов с учетом вместимости разливочных ковшей, на которых они применяются.

С другой стороны, мощность, развиваемая вибрационной системой затвора

$$N_{BC} = PV_c n,$$

где P — давление, при котором подается сжатый воздух в рабочие полости пневматических поршневых вибраторов, Па;

V — расход воздуха, необходимый для работы одного вибратора, м³/с;

n — требуемое количество вибраторов.

Давление воздуха в пневматической сети

$$P = \frac{F_d}{S_{\Pi}},$$

где F_d — сила динамического воздействия поршня пневматического поршневого вибратора, Н;

S_{Π} — площадь поперечного сечения поршня, м².

Площадь поперечного сечения поршня диаметром d_{Π}

$$S_{\Pi} = \frac{\pi d_{\Pi}^2}{4}.$$

Таблица 2

Расчетные значения величин, влияющих на поглощение огнеупорами затвора энергии вибрационного воздействия

Вместимость ковша, т	Масса ковшевого затвора, кг	Требуемые значения вибрационного воздействия		Полученные значения используемых величин									
		Частота ω , с ⁻¹	Амплитуда A , мм	K_1	α_1 , м ⁻¹	x_1 , м	K_2	α_2 , м ⁻¹	x_2 , м	S_{Π} , м ²	$\frac{I_{KC}, \text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$	$\frac{I_0, \text{Дж}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$	N_K , Вт
100	180	40	2	2,3	10,4	0,08	2	23,1	0,03	0,025	34560	50121	1250
150	220			2,8	10,3	0,10	2	23,1	0,03	0,031		55067	1700
200	250			3,4	12,2	0,10	2,4	25	0,035	0,031		79502	2460
250	300			3,7	8,7	0,15	2,4	25	0,035	0,031		82074	2540
300	350			4,1	7,8	0,18	2,6	23,9	0,04	0,031		97107	3010

Сила динамического воздействия вибратора

$$F_d = c\delta_{дп},$$

где c — коэффициент жесткости пружины, Н/мм;

$\delta_{дп}$ — динамическая осадка пружины вибратора, мм.

Суммарная вынуждающая сила, необходимая для сообщения ковшовому затвору массой m_3 колебаний с заданной амплитудой A и частотой ω , определяется по формуле, приведенной в работе [14]:

$$F_B = m_3 A \omega^2.$$

Эту силу должны обеспечивать пневматические поршневые вибраторы, т. е.

$$F_B = n \frac{\pi d_{п}^2}{4} P.$$

Откуда

$$d_{п} = \sqrt{\frac{4F_B}{n\pi P}} = \sqrt{\frac{4m_3 A \omega^2}{n\pi P}}.$$

Расход воздуха для работы одного вибратора при заданной циклической частоте колебаний системы ω и ходе поршня в одну сторону, равном динамической осадке пружины $\delta_{дп}$, составит

$$V_c = 2\delta_{дп} \frac{\pi d_{п}^2}{4} \omega.$$

Соответственно, общий расход воздуха при функционировании вибрационной системы

$$V_0 = V_c n.$$

Тогда мощность, развиваемая пневматическими поршневыми вибраторами

$$N_{BC} = PV_c n = \frac{4c\delta_{дп}}{\pi d_{п}^2} \cdot 2\delta_{дп} \frac{\pi d_{п}^2}{4} \omega n = 2\delta_{дп}^2 \omega c n.$$

Приравняв $N_{BC} = N_K$, получаем

$$2\delta_{дп}^2 \omega c n = I_0 S.$$

Откуда требуемая жесткость каждой из двух пружин вибратора

$$c = \frac{I_0 S}{2\delta_{дп}^2 \omega n}.$$

Результаты выполненных расчетов приведены в таблице 3.

Проверку правильности принятых технических решений и корректности полученных расчетных зависимостей выполнили на опытном образце шибера затвора (рис. 3), предназначенного для применения на сталеразливочном ковше вместимостью 100 т. Отклонение измеренных значений параметров вибрационной системы от расчетных не превышало 15 %.

Таблица 3

Расчетные значения параметров пневматических поршневых вибраторов для ковшовых затворов сталеразливочных ковшей различной вместимости

Вместимость ковша, т	Требуемое кол-во вибраторов n , шт	Параметры подаваемого воздуха			Параметры пневматического вибратора			
		P , МПа	V_c , м ³ /с	V_0 , м ³ /с	F_B , Н	Диаметр поршня вибратора $d_{п}$, мм	Динамическая осадка пружины $\delta_{дп}$, мм	Жесткость пружины c , Н/мм
100	2	0,4	0,0015	0,003	576	30	30	8
150	3	0,4	0,0013	0,004	704	30	30	8
200	3	0,4	0,002	0,006	800	30	30	9
250	4	0,4	0,0015	0,006	960	30	30	9
300	4	0,5	0,0015	0,006	1120	30	30	10

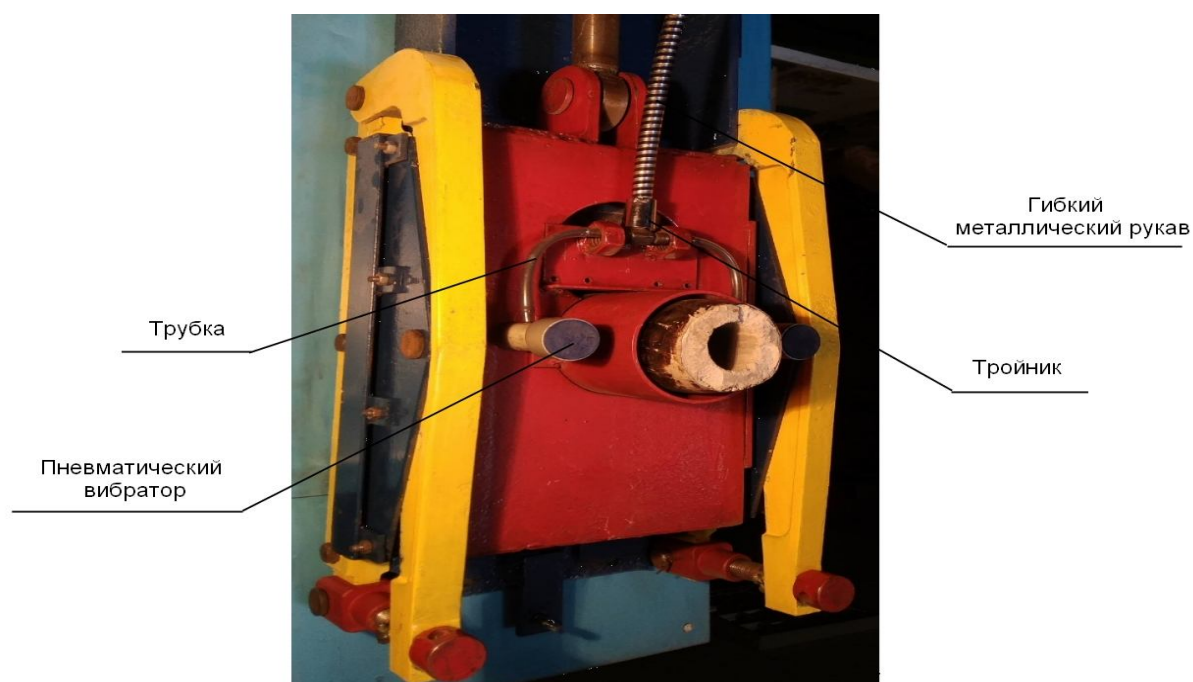


Рисунок 3 Опытный образец затвора с системой вибрационного воздействия

Предложенная методика позволяет обосновать рабочие параметры вибрационной системы ковшового затвора, при которых обеспечивается снижение интенсивности зарастания его канала. Данная методика использована при расчете и конструировании промышленных образцов разработанной системы вибрационного воздействия на огнеупорные элементы

шиберных затворов различного типоразмера, техническая документация на которые передана Волгодонскому энергомашиностроительному заводу, являющемуся владельцем патента на модернизированное разливное устройство и обладающему правом на его изготовление и поставку потенциальным заказчикам.

Библиографический список

1. Еронько, С. П. *Разливка стали: технология, оборудование* [Текст] / С. П. Еронько, С. В. Быковских. — К. : Техніка, 2003. — 216 с.
2. Шевченко, В. П. *Исследование взаимодействия жидкого металла с огнеупором сталеразливочных стаканов* [Текст] / В. П. Шевченко, М. В. Самборский // *Сборник научных трудов Донецкого государственного технического университета. Металлургия.* — Донецк : ДонГТУ. — 1999. — Вып. 1. — С. 91–100.
3. Кононов, В. А. *Разработка шиберных систем для разливки мелких слитков и фасонного литья* [Текст] / В. А. Кононов, В. П. Василенко, А. А. Алпатов // *Новые огнеупоры.* — 2013. — № 11. — С. 18–24.
4. Жилин, Д. И. *Повышение эффективности шиберного затвора с дополнительным подогревом разливного канала* [Текст] / Д. И. Жилин // *Заготовительные производства в машиностроении.* — 2015. — № 11. — С. 3–6.
5. Аксельрод, Л. М. *Разработка технологии изготовления огнеупорного материала, замедляющего процесс затягивания* [Текст] / Л. М. Аксельрод, Г. Г. Мельникова, Г. О. Бодина // *Огнеупоры и техническая керамика.* — 2001. — № 2. — С. 22–25.

6. Герцык, С. И. Особенности работы литейных ковшей с шибберными затворами [Текст] / С. И. Герцык, М. В. Шишимиров, В. П. Василенко // *Металлургия машиностроения*. — 2009. — № 6. — С. 2–5.
7. Использование вибрационной обработки при производстве стальных отливок [Текст] / Р. К. Мысик [и др.] // *Научные труды XIV отчетной конференции молодых ученых*. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ — УПИ», 2008. — Ч. 1. — С. 30–33.
8. Голоднов, А. И. Влияние вибрационной обработки на структуру и свойства меди [Текст] / А. И. Голоднов, А. В. Сулицын, Г. Л. Хазан // *Расплавы*. — 2009. — № 5. — С. 38–44.
9. Определение оптимальных параметров вибрационного воздействия на бронзу марки БрКд1 в процессе кристаллизации [Текст] / А. В. Сулицын [и др.] // *Литейщик России*. — 2009. — № 10. — С. 43–47.
10. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс зарастания канала ковшового затвора [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачев, Е. А. Понамарева // *Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации*. — 2018. — № 11. — С. 51–58.
11. *Simulating Interaction of Liquid Steel with Gate Wall at Harmonic Motion* [Text] / S. N. Tsarenko [e. a.] // *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. — 2022. — Vol. 988. — P. 1–9.
12. Еронько, С. П. Разработка вибрационной системы снижения интенсивности процесса затягивания выпускного канала сталеразливочного ковша [Текст] / С. П. Еронько, Е. А. Понамарева, Е. С. Цыхмистро // *Черная металлургия: Бюллетень научно-технической и экономической информации*. — 2021. — Т. 77. — № 2. — С. 165–174.
13. Пат. 2751196 РФ, МПК В 22 41/08. Ковшовый шибберный затвор / С. П. Еронько [и др.] ; патентообладатель ООО «Волгодонский энергомеханический завод». — № 2019128142 ; заявл. 06.09.2019 ; опубл. 12.07.21, Бюл. № 20.
14. Зацепин, А. Ф. Акустический контроль. В 2 ч. Ч. 1. Введение в физику акустического контроля [Текст] / А. Ф. Зацепин. — Екатеринбург : ГОУ ВПО «УГТУ — УПИ», 2005. — 88 с.
15. Оценка интенсивности поглощения упругих волн огнеупорами ковшового затвора в процессе вибрационного воздействия [Текст] / С. П. Еронько [и др.] // *Сб. науч. тр. ДонГТУ*. — 2019. — № 16 (59). — С. 69–77.

© Еронько С. П.
 © Ошовская Е. В.
 © Понамарева Е. А.

Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТИ Харламовым Ю. А.,
 д.т.н., проф. каф. МОЗЧМ ДонНТУ Сидоровым В. А.

Статья поступила в редакцию 15.11.2022.

Doctor of Technical Sciences Eron'ko S. P., PhD in Engineering Oshovskaya E. V., Ponomareva E. A.
 (DonNTU, Donetsk, DPR)

JUSTIFICATION OF THE OPERATING PARAMETERS OF THE VIBRATION SYSTEM, WHICH REDUCES THE OVERGROWTH INTENSITY OF THE LADLE GATE CHANNEL

The existing methods of reducing the intensity of particles sticking to the walls of the outlet channel of the ladle gate during steel casting are analyzed, and a theoretical substantiation of the parameters of the vibration system operation, which prevents a decrease in the volume flow of metal flowing from the ladle, is carried out.

Key words: pouring ladle, slide gate, overgrowth of the outlet channel, vibration impact.