

УДК 669.18.046

*д.т.н. Еронько С. П.,
к.т.н. Ткачёв М. Ю.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР),
Понамарёва Е. А.
(ООО «Горловский энергомеханический завод», г. Горловка, ДНР),
д.т.н. Сидоров В. А.,
к.т.н. Ошовская Е. В.
(ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)*

ОЦЕНКА ИНТЕНСИВНОСТИ ПОГЛОЩЕНИЯ УПРУГИХ ВОЛН ОГНЕУПОРАМИ КОВШОВОГО ЗАТВОРА В ПРОЦЕССЕ ВИБРАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Приведены результаты экспериментальных исследований процесса поглощения упругих волн, возбуждаемых пневматическим вибратором направленного действия и распространяющихся в огнеупорных элементах шиберного затвора разливочного ковша вдоль его сталевыпускного канала. Полученная информация послужит основой при расчёте и конструировании системы, обеспечивающей снижение интенсивности отложений частиц на поверхностях керамических изделий, контактирующих с потоком истекающей из ковша стали.

Ключевые слова: разливочный ковш, шиберный затвор, затягивание сталевыпускного канала, вибрационное воздействие, поглощение упругой волны.

Проблема и её связь с научными и практическими задачами. Проблема затягивания сталевыпускных каналов ковшей, оборудованных скользящими затворами, с которой приходится сталкиваться рабочему персоналу сталеплавильных и литейных цехов, по-прежнему остаётся нерешённой, несмотря на проводившиеся за последние 20 лет научно-исследовательские работы, направленные на установление и устранение негативного действия факторов, способствующих уменьшению живого сечения потока при шиберной разливке стали.

Принято считать, что главная причина и механизмы формирования отложений на стенках каналов ковшовых затворов в первую очередь обусловлены протекающими в них во время разливки гидродинамическими, тепловыми и химическими процессами [1]. В связи с этим специалисты предлагали различными способами оказывать влияние на интенсивность развития отмеченных процессов [2–6] и тем самым устранять сужение проходного сечения выпускного канала ковша (минимизация гидравлического сопротивления потока стали,

нанесение на стенки канала специального антиклоггингового покрытия, применение внутреннего и наружного обогрева корпуса разливочного стакана). Такой подход, как показала практика, не всегда гарантировал достижение ожидаемого результата, поскольку предназначенные меры являлись избирательными, так как каждая из них могла влиять на один из учитываемых факторов. В реальных условиях отложение слоёв частиц на контактирующих с жидким металлом поверхностях огнеупорных изделий ковшового затвора может быть итогом комплексного воздействия этих факторов. Поэтому логично предположить, что в этом случае следует инициировать такие условия взаимодействия на границе раздела «огнеупор – жидкий металл», которые будут способствовать разрушению зарождающихся связей между поверхностью канала и частицами отложений вне зависимости от природы их возникновения.

На основании результатов ранее выполненных авторами модельных исследований для этой цели предложено применить направленное вибрационное воздействие

на огнеупорную часть системы ковшового затвора [7, 8].

Предварительная конструктивная проработка такого технического решения показала, что эффективность его промышленного применения в значительной мере будет зависеть от того, насколько вибратор, являющийся вспомогательным структурным элементом системы ковшового затвора, отвечает комплексу требований: компактность; простота и безопасность подвода к нему энергоносителя, необходимого для возбуждения низкочастотной вибрации; возможность гибкого регулирования параметров колебаний.

На основании данных сопоставительного анализа результатов испытаний трёх типов вибраторов (электромеchanического, пневматического и электромагнитного), проведённых в идентичных условиях, установлено, что в качестве возбудителя направленных колебаний, снижающих интенсивность развития процесса затягивания канала ковшового затвора, целесообразно использовать пневматический вибратор. Это обусловлено тем, что у современных ковшовых затворов кассетного типа для прижатия огнеупорных плит применяют блоки тарельчатых или витых пружин, в обязательном порядке охлаждаемых во время разливки стали воздухом, подаваемым по трубопроводу под давлением от цеховой магистрали. Поэтому этот воздух можно одновременно использовать в качестве энергоносителя для приведения в действие возбудителя колебаний ковшового затвора. Причём параметры колебательного процесса, реализуемого в системе шибберного затвора, удаётся легко регулировать путём изменения в известных пределах давления и расхода воздуха, подводимого к вибратору, а также выбирая соответствующую жёсткость его пружин [9].

Постановка задачи. Для эффективного вибрационного воздействия на процесс затягивания канала ковшового затвора, наряду с рациональными значениями параметров функционирования пневматиче-

ского вибратора, необходима также информация об изменении возбуждаемой им вынуждающей силы, действующей вдоль оси канала затвора.

Интенсивность снижения значений параметров возбуждаемых колебаний связана с поглощением упругих волн, проходящих как в однородной среде, так и на границе раздела разных сред.

В соответствии со сложившимися представлениями амплитуда A и интенсивность I волны, распространившейся в поглощающей среде вдоль оси, изменяются по экспоненциальному закону:

$$A(x) = A_0 e^{-2\alpha x}; \quad (1)$$

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

где A_0 и I_0 — амплитуда и интенсивность волны в точке $x=0$; α — линейный коэффициент поглощения упругих волн, зависящий от свойств среды и частоты волн.

Отсутствие в справочной литературе данных о значении коэффициента α для огнеупорных элементов, формирующих сталевыпускной канал разливочного ковша, а также сведений о том, в какой мере происходит угасание упругой волны при пересечении стыков контактирующих между собой керамических изделий ковшового затвора, является побудительным мотивом к проведению экспериментальных исследований с целью получения информации, необходимой для обоснования конструктивных и энергосиловых параметров устройств, обеспечивающих снижение интенсивности процесса затягивания канала шибберной системы.

Изложение материала и его результаты. Поскольку теоретическим путём получить зависимость, описывающую закон, по которому происходит изменение упругой волны по мере её распространения от источника возбуждения вдоль канала шибберного затвора, достаточно проблематично, поставленную задачу решали экспериментальным путём. Для этого спроектировали и изготовили пневматический вибра-

тор направленного действия, схема и внешний вид которого показаны на рисунке 1. Вибратор включает пустотелый цилиндрический корпус 8 с ввинченной в него крышкой 1 и резьбовым хвостовиком. Внутри корпуса размещён с возможностью относительного продольного перемещения сдвоенный поршень 4, удерживаемый в среднем положении частично сжатыми пружинами 7 и 3. В стенке пустотелого цилиндрического корпуса имеются два перепускных канала 10 и 2, а также два выпускных отверстия 9 и 6.

При подаче сжатого воздуха по трубопроводу 5 в среднюю часть рабочей полости он по каналу 10 поступает под сдвоенный поршень 4, который под воздействием давления перемещается вверх, сжимая пружину 3 и вытесняя находящийся под ним воздух через отверстие 9 в атмосферу. Вблизи своего крайнего положения сдвоенный поршень 4 перекрывает выпу-

сское отверстие 9 и перепускной канал 10 и одновременно открывает выпускное отверстие 6 и перепускной канал 2, в результате чего происходит реверсирование движения самого поршня. Под действием давления воздуха теперь уже на верхнюю часть поршня он перемещается вниз, сжимая пружину 7 и вытесняя воздух через отверстие 6 из полости в атмосферу. Достигнув своего нижнего положения, поршень открывает выпускное отверстие 9 и перепускной канал 10, т. е. начинает совершать колебания, частота и амплитуда которых зависит от давления воздуха и жёсткости пружин 7 и 3.

Эксперимент провели в два этапа. Вначале с помощью анализатора вибрации 795 М оценили снижение интенсивности колебательного процесса на разных частотах в зависимости от линейного размера огнеупорного элемента и упругих свойств его материала.

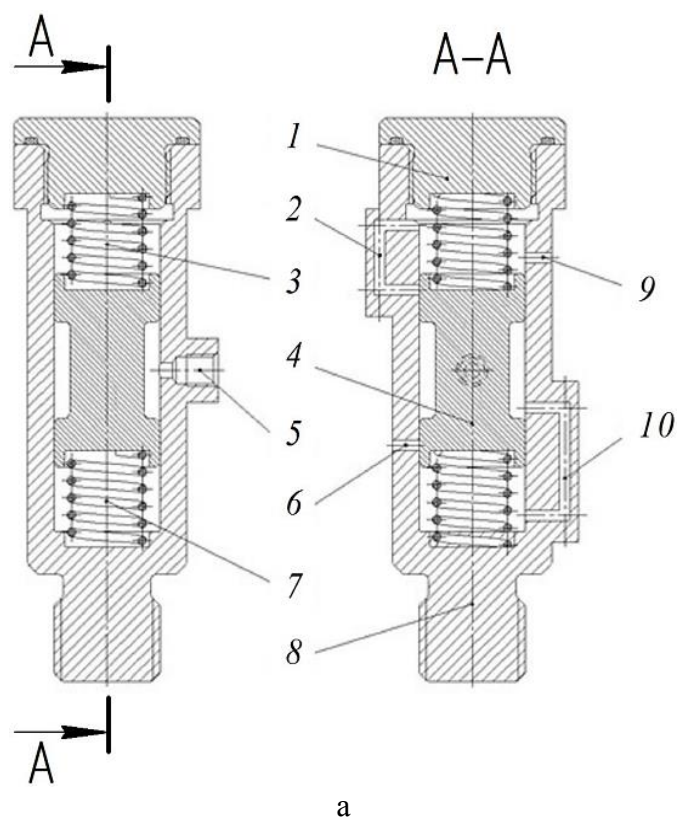


Рисунок 1 Конструктивная схема (а) и изготовленный образец (б) пневматического вибратора

Степень поглощения упругой волны при её прохождении через тело огнеупорного изделия, являющегося элементом керамической части шиберного затвора, определяли по значению коэффициента затухания вибрационного сигнала, вычисленного по формуле [10]

$$\alpha = \frac{\alpha_n}{\alpha_b}, \quad (3)$$

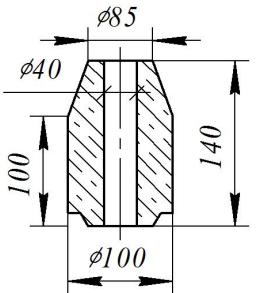
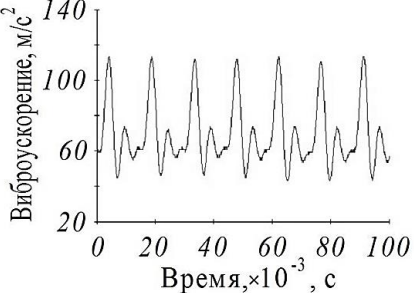
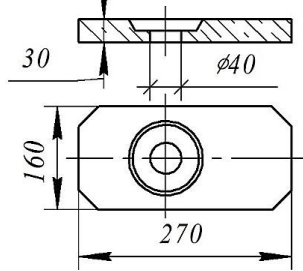
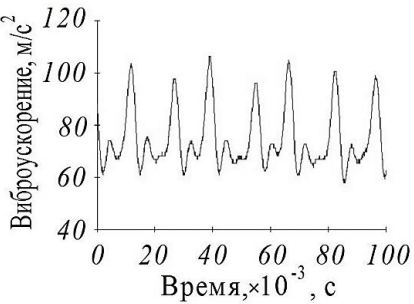
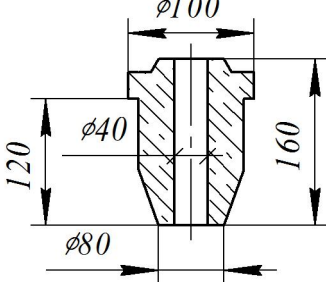
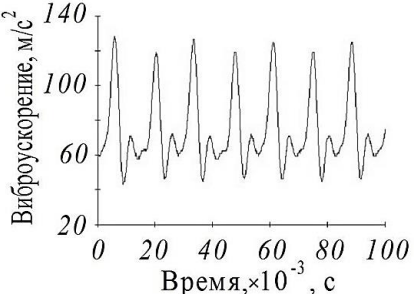
где α_n — значение виброускорения на заданной частоте колебаний, возбуждаемых пневматическим вибратором при его контакте с нижней поверхностью огнеупора;

α_b — значение виброускорения в точке контроля на верхней поверхности огнеупора.

В таблице 1 приведены геометрические параметры огнеупорных изделий шиберного затвора и формы регистрировавшихся сигналов при контроле коэффициента затухания виброускорения во время поглощения упругой волны, когда возбуждаемое вибратором ускорение составляло $\alpha_n = 160 \text{ м/с}^2$. Полученная информация свидетельствует в пользу того, что коэффициент затухания вибрационного сигнала при прохождении через тело огнеупора в большей мере зависит от физических свойств его материала, чем от размера.

Таблица 1

Геометрические параметры огнеупоров затвора и вид сигналов, зарегистрированных при контроле виброускорения на их верхних поверхностях

Огнеупорное изделие	Форма и размеры огнеупорного изделия	Вид зарегистрированного сигнала	Значение коэффициента α
Магнетитовый ковшовый стакан			2,3
Циркониевая плита			4
Магнетитовый стакан-коллектор			2

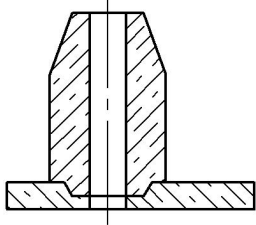
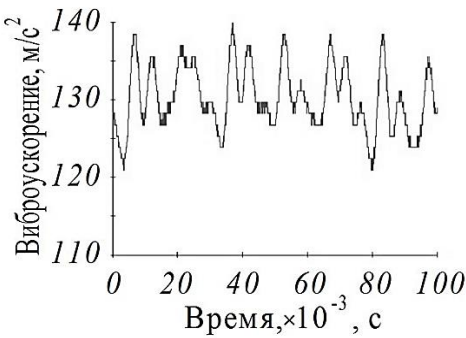
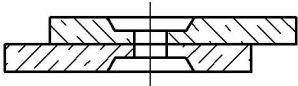
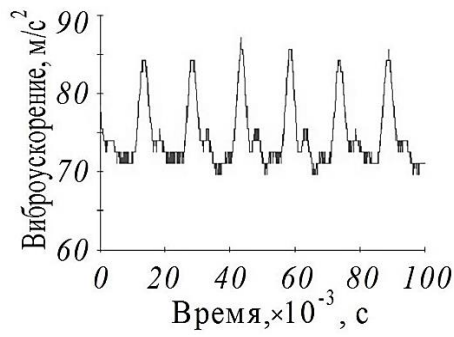
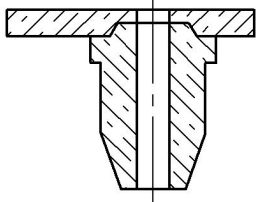
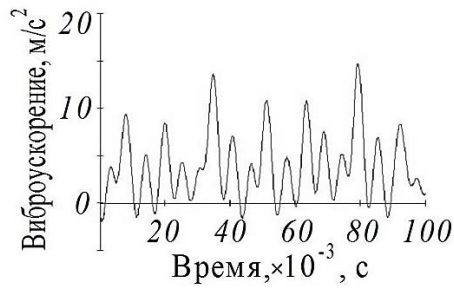
Второй этап проводившихся исследований был связан с получением данных о влиянии поверхностей раздела контактирующих между собой огнеупорных элементов затвора на степень ослабления виброускорения при прохождении упругой волны через зону их контакта.

Интересующую информацию получили следующим образом. Последовательно огнеупорные элементы попарно соединяли между собой, обеспечивая их сжатие с по-

мощью двух винтов с гайками в соответствии со схемами, приведёнными в таблице 2. При этом на нижний элемент оказывали вибрационное воздействие с заданными параметрами, а на свободной поверхности верхнего элемента с помощью анализатора вибрации 795 М фиксировали виброускорение и по его значению рассчитывали общий коэффициент затухания вибрационного сигнала α_0 .

Таблица 2

Вид сигналов, зарегистрированных при контроле виброускорения на паре огнеупоров

Комбинация огнеупоров	Схема контакта двух огнеупорных элементов керамической части затвора	Вид зарегистрированного сигнала	Значение коэффициента $\alpha_{\text{пр}}$
Ковшовый стакан – верхняя плита			1,03
Верхняя плита – нижняя плита			1,01
Верхняя плита – стакан-коллектор			1,54

Затем по полученному значению находили коэффициенты затухания виброускорения на границе раздела двух огнеупорных изделий, используя выражение

$$\alpha_{\text{пр}} = \frac{\alpha_0}{\alpha_1 \alpha_2}, \quad (4)$$

где α_1 и α_2 — значения коэффициентов затухания виброускорения для каждого из двух находящихся в контакте огнеупорных элементов.

Наряду с этим выполнили также эксперимент для оценки значений коэффициента ослабления вибросигнала при прохождении упругой волны через всю керамическую часть ковшового затвора. В этом случае комплект огнеупорных изделий с помощью двух стяжек фиксировали в штативе (фото на рис. 2) и всю собранную систему подвергали направленному вибровоздействию с различной интенсивностью.



Рисунок 2 Комплект огнеупоров затвора в собранном виде

Сопоставление значений общих коэффициентов затухания вибрационного сигнала при прохождении упругой волны через полный комплект огнеупоров ковшового затвора позволяет сделать заключение о том, что изменение интенсивности процесса колебаний, возбуждаемого вибратором в керамической части шибберной системы, не влияет на показатель ослабления энергии упругой волны. В качестве наглядного примера на рисунке 3 приведены распечатки сигналов, зафиксированных при двух режимах работы пневмовибратора (а и б) и отображающих значения виброускорения, измеренного на верхней торцевой поверхности ковшового стакана (в и г). В первом случае значение коэффициента затухания виброускорения составило 11,86, а во втором — 11,43, т. е. они практически были одинаковыми.

Как известно, требованиями действующих технических инструкций по эксплуатации шибберных затворов предусмотрено использование специальных паст для уплотнения стыков между контактными поверхностями огнеупорных плит с ковшовым стаканом и стаканом-коллектором. Наличие таких двух прослоек также будет в определенной мере влиять на интенсивность затухания упругих волн. Поэтому часть опытов провели с целью установления значимости такого влияния, для чего осуществляли измерения виброускорения во время прохождения упругой волны через два огнеупорных элемента, находящихся между собой в сжатом состоянии, при отсутствии и наличии уплотнительной прослойки в их фланцевых соединениях.

Результаты таких измерений позволили установить увеличение в 1,1–1,3 раза значения коэффициента затухания упругих волн, вызванное слоем уплотнительной пасты в зоне контакта стаканов с плитами.

Данные проведенных экспериментальных исследований использованы при обосновании параметров вибрационной системы усовершенствованного шибберного затвора, по которому подана заявка на предполагаемое изобретение.

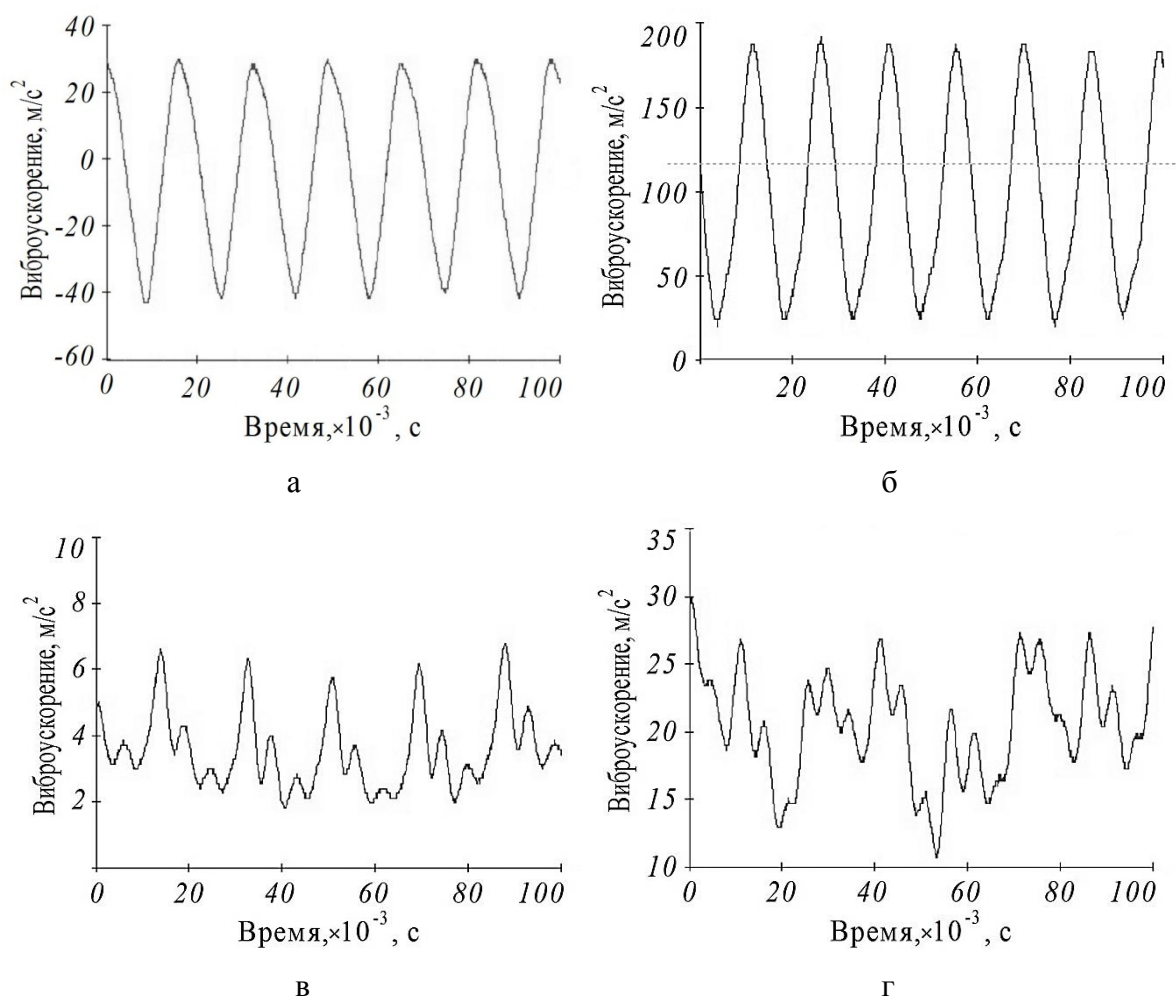


Рисунок 3 Значения виброускорений, возбуждаемых пневмовибратором в месте контакта с нижней торцевой поверхностью стакана-коллектора (а и б), и измеренные на верхней торцевой поверхности ковшового стакана (в и г) при двух интенсивностях колебательного процесса

Выводы и направление дальнейших исследований. Полученная информация будет необходима при расчёте и конструировании ковшового затвора, снабжённого системой вибрационного воздействия на его керамическую часть с целью устранения затягивания разливочного канала из-за отложений неметаллических включений на поверхности, контактирующей с потоком жидкой стали. В частности, данные о

степени поглощения упругой волны при её прохождении вдоль сталевыпускного канала, сформированного огнеупорными элементами затвора, позволят обосновать требуемую интенсивность вибрационного воздействия на них и необходимое число пневматических вибраторов для её обеспечения. Предложенное техническое решение по совершенствованию затвора может составить предмет изобретения.

Библиографический список

1. Аксельрод, Л. М. Предотвращение процесса затягивания канала сталеразливочного узла промежуточного ковша МНЛЗ [Текст] / Л. М. Аксельрод, А. А. Вяткин, Н. А. Вяткина и др. // Новые огнеупоры. — 2007. — № 2. — С. 9–14.

2. Shusen, L. Inclusions and nozzle clogging during steel continuous casting process [Text] / L. Shusen, J. Wei, Z. Lifeng etc // The Iron and Steel Technology Conference and Exposition (AISTech 2008). — Pittsburgh : Warrendale, 2008. — P. 1247–1261.
3. 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.
4. Кононов, В. А. Разработка шибберных систем для разлива мелких слитков и фасонного литья [Текст] / В. А. Кононов, В. П. Василенко, А. А. Алпатов // Новые огнеупоры. — 2013. — № 11. — С. 18–24.
5. Кононов, В. А. Эффективность внедрения шибберной разливки в литейном производстве [Текст] / В. П. Василенко, С. И. Герцык и др. // Литейщик России. — 2010. — № 11. — С. 23–26.
6. Жилин, Д. И. Повышение эффективности шибберного затвора с дополнительным подогревом разливочного канала [Текст] / Д. И. Жилин // Заготовительные производства в машиностроении. — 2015. — № 11. — С. 3–6.
7. Еронько, С. П. Модельные исследования процесса зарастания канала ковшового затвора [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачёв, Е. А. Пономарёва // Инновационные перспективы Донбасса : сборник трудов 4-й международной научно-практической конференции в 6-ти томах. Т.3. Инновационные технологии проектирования, изготовления и эксплуатации промышленных машин и агрегатов. — Донецк : ДонНТУ, 2018. — С. 11–15.
8. Еронько, С. П. Модельные исследования влияния вибрационного воздействия на процесс зарастания канала ковшового затвора [Текст] / С. П. Еронько, М. Ю. Ткачёв, Е. А. Пономарёва // Чёрная металлургия : бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2018. — № 11. — С. 51–58.
9. Еронько, С. П. Модельные исследования параметров работы вибрационных устройств для систем ковшовых затворов. [Текст] / С. П. Еронько, Е. В. Ошовская, М. Ю. Ткачёв, Е. А. Пономарёва // Сборник научных трудов ДонГТУ. — Алчевск, 2018. — № 11 (54). — С. 119–128.
10. Ошовская, Е. В. Оценка коэффициента затухания параметров вибрационного сигнала [Текст] / Е. В. Ошовская, В. А. Сидоров, Д. В. Щедринский // Научно-технический прогресс в чёрной металлургии : материалы III международной научной конференции. — Череповец, 2017. — С. 190–196.

© Еронько С. П.© Ткачёв М. Ю.© Понамарёва Е. А.© Сидоров В. А.© Ошовская Е. В.

**Рекомендована к печати д.т.н., проф. каф. ОПМ ДонНТУ Ченцовым Н. А.,
д.т.н., проф. каф. ММК ДонГТУ Харламов А. Ю.**

Статья поступила в редакцию 05.11.19.

д.т.н. Еронько С. П., к.т.н. Ткачов М. Ю. (ДонНТУ, м. Донецк, ДНР), Понамарёва О. О. (ТОВ «Горлівський енергомеханічний завод», м. Горлівка, ДНР), д.т.н. Сидоров В. А., к.т.н. Ошовська О. В. (ДонНТУ, м. Донецк, ДНР)

ОЦІНКА ІНТЕНСИВНОСТІ ПОГЛИНАННЯ ПРУЖНИХ ХВИЛЬ ВОГНЕТРИВАМИ КОВШОВОГО ЗАТВОРУ В ПРОЦЕСІ ВІБРАЦІЙНОГО ВПЛИВУ

Наведено результати експериментальних досліджень процесу поглинання пружних хвиль, що порушені пневматичним вібратором направленої дії, які поширюються у вогнетривких елементах шибберного затвору розливного ковша уздовж його сталевипускного каналу. Отримана інформація послужить базою при розрахунку та конструюванні системи, що забезпечує знижен-

ня інтенсивності відкладення нашарувань на поверхнях керамічних виробів, які контактують з потоком стікаючої з ковша сталі.

Ключові слова: розливний ківш, шибєрний затвор, зтягування сталевипускного каналу, вібраційна дія, поглинання пружної хвилі.

Doctor of Technical Sciences Eron'ko S. P., PhD in Engineering Tkachov M. Yu. (DonNTU, Donetsk, DPR), Ponamaryova E. A. (OOO "Gorlovsky Power-Mechanical Plant" (Limited Liability Company), Gorlovka, DPR), Doctor of Technical Sciences Sidorov V. A., PhD in Engineering Oshovskaya E. V. (DonNTU, Donetsk, DPR)

ASSESSMENTS FOR THE INTENSITY OF ABSORPTION OF ELASTIC WAVES BY LADLE SLIDE REFRACTORIES DURING VIBRATION IMPACT

There have been given the findings of investigation of the attenuation coefficient of a signal passing through the fire-resistant elements of the ladle slide of elastic waves generated by a pneumatic vibrator in order to prevent the process of clogging of steel outlet channel. There has been determined the influence of the following factors on this process: dimensions, elastic properties and interface surfaces of refractories, intensity of vibration impact, sealing paste.

Key words: ladle, slide gate systems, clogging of steel channel, vibration impact, absorption of the elastic wave.