РАЗДЕЛ І

УДК 621.928.235 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636 EDN: FZXZKI Научная статья



ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВИБРОУДАРНОЙ РЕШЕТКИ И СИТА ГРОХОТА В РЕЖИМЕ СИНФАЗНЫХ КОЛЕБАНИЙ

В. С. Сизиков*¹, **С. А. Сизиков**²

¹Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия ²ЗАО НИПКБ «Стройтехника», г. Санкт-Петербург, Россия sizikovvs@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0001-9438-5711 sizikovsa@rambler.ru, http://orcid.org/0000-0003-2492-4972 *ответственный автор

АННОТАЦИЯ

Веедение. Одной из основных технологических операций в строительном производстве является процесс классификации по крупности мелкозернистых минеральных материалов, например, природных песков. При этом актуальным является решение задачи повышения производительности и эффективности грохочения песчаных сред, в частности достижением снижения засоренности просеивающей поверхности виброгрохотов от замазывания и застревания в отверстиях сита клинообразных зерен. Устранение этой проблемы осуществляется путем применения виброударных грохотов различного принципа действия. К инновационным конструкциям виброударных грохотов относится грохот с виброударной решеткой, установленной на упругих элементах с зазором относительно сита и обеспечивающей удар по всей площади поверхности сита. Такая конструкция обеспечивает повышение эффективности очистки сита за счет передачи ему ударного импульса в каждом периоде колебаний грохота, и позволяет снизить чрезмерное повреждение и износ сита за счет увеличения площади взаимодействия виброударной решетки с ситом.

Целью работы является установление функциональной зависимости динамического взаимодействия элементов трехмассовой виброударной системы «корпус грохота – виброударная решетка – сито» для определения необходимой величины передаваемого на сито ударного импульса в зависимости от частоты колебаний корпуса грохота и величины зазора между решеткой и ситом.

Материалы и методы. Исследование выполняется методом математического моделирования с использованием на первом этапе двухмассовой модели «корпус грохота – виброударная решетка» без учета соударений решетки и сита для определения частотного диапазона синфазного режима колебаний и значений зазора, обеспечивающих соударение решетки с ситом. Для расчета перемещений элементов грохота и исследования взаимосвязей его параметров в выбранном диапазоне на втором этапе используется трехмассовая модель виброударной системы грохота с одной ударной парой.

Результаты. В результате выполненного исследования получены зависимости в виде уравнений регрессии влияния зазора между виброударной решеткой и ситом грохота и частоты его колебаний на величину ударного импульса, передаваемого на сито грохота, и размах колебаний сита. На основе полученных зависимостей предложены практические рекомендации по настройке режимов работы виброударного грохота, позволяющие подбирать величину частоты колебаний грохота и зазора между виброударной решеткой и ситом для достижения высокой эффективности очистки ячеек сита от загрязняющих частиц.

Обсуждение и заключение. Выполненное математическое моделирование позволило получить зависимости влияния зазора между ситом и виброударной решеткой и частоты колебаний элементов грохота на ударный импульс, передаваемый на сито грохота, и размах колебаний сита. Разработанные рекомендации для практического применения полученных закономерностей позволят выполнять эффективную настройку режимов работы виброударного грохота и снизить трудоемкость работ, выполняемых при его пусконаладке и эксплуатации.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: виброударный грохот, виброударная система, ударная пара, ударный импульс, очистка поверхности сита, виброударная решетка, зазор, управление режимами работы, колебательная система, деформационные характеристики сита, загрязняющие частицы.

© Сизиков В. С., Сизиков С. А., 2022



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Статья поступила в редакцию 03.09.2022; одобрена после рецензирования 26.09.2022; принята к публикации 14.10. 2022.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Сизиков В. С., Сизиков С. А. Взаимодействие виброударной решетки и сита грохота в режиме синфазных колебаний // Вестник СибАДИ. 2022. Т.19, № 5 (87). С. 624-636. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636

Original article DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-4-624-636 EDN: FZXZKI

INTERACTION OF VIBROIMPACT LATTICE AND SCREEN SIEVE IN ANTI-PHASE OSCILLATION MODE

Valentin S. Sizikov^{*1}, Stanislav A. Sizikov² Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian ZAO NIPKB Stroitekhnika, Saint Petersburg, Russian sizikovvs@yandex.ru, http://orcid.org/0000-0001-9438-5711 sizikovsa@rambler.ru, http://orcid.org/0000-0003-2492-4972 čorresponding author

ABSTRACT

Introduction. One of basic technological operations in construction technology is a process of classification of fine grained mineral materials, for example, natural sand. The related actual problem is connected with increasing performance and effectiveness of screening of sand medium, in particular reducing the contamination of screening surface of vibrating screens from seal particles and sticking in sieve holes wedge-shaped grains. The solution of this problem concludes in performing by the use of vibroimpact screens of various operating principle. One of innovative vibroimpact screen constructions is a screen with vibroimpact lattice, mounted under sieve with a gap on spring elements, which provides an impulse impact on all sieve surface area. Such construction provides increasing the effectiveness of sieve cleaning due to the transfer to sieve impact impulse in each screen oscillation period and reducing its excessive damage and abrasion by increasing the area of vibroimpact lattice and sieve interaction.

The purpose of the work is to determinate functional relationships of dynamical interaction between elements of three-mass vibroimpact 'screen body – vibroimpact lattice – sieve' system for providing the necessary value of impact impulse transferred to sieve in relation to screen body oscillation frequency and amount of gap between lattice and sieve.

Materials and methods. The research is based on a method of mathematical modelling. On the first stage the research is being conducted with using two-mass 'screen body – vibroimpact lattice' model without consideration the impact between lattice and sieve for determination the oscillation frequency range of in-phase oscillation regime and gap values providing an impact between lattice and sieve. For the calculation of displacement of screen elements and for research the relationships of its parameters in selected range the three-mass model of vibroimpact model of screen with one impact pair is used on a second stage of research.

Results. As a result of calculation obtained the functional relationships of correlation of the gap between vibroimpact lattice and screen sieve and oscillation frequency on the impact impulse transferred to sieve and sieve double amplitude were obtained. The developed recommendations for practical using of obtained relationships for adjustment operating regimes of vibroimpact screen which allow to establish the screen operating oscillation frequency and value of gap between lattice and sieve for providing high effectiveness of sieve holes cleaning from contaminating particles.

Discussion and Conclusions. Performed mathematical modelling allowed to obtain dependencies of influence of gap between sieve and vibroimpact lattice and screen elements oscillation frequency on impulse transferred on screen sieve and sieve double amplitude. Developed practical recommendations of obtained dependencies allow to perform an effective adjustment of vibroimpact screen operating regimes and reduce the labor intensity of works being performed during its starting-up and maintenance.

© Sizikov V. S., Sizikov S. A., 2022



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License.



KEYWORDS: vibroimpact screen, vibroimpact system, impact pair, impact impulse, sieve surface cleaning, vibroimpact lattice, gap, operation regimes control, oscillatory system, sieve deformation parameters, contaminating particles.

ACKNOWLEDGMENTS. The article is published based on the results of the research work carried out in accordance with the grant for the performance of research work by the academic staff of Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering in 2022.

The article was submitted 03.09.2022; approved after reviewing 26.09.2022; accepted for publication 14.10.2022.

The authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation: Valentin S. Sizikov, Stanislav A. Sizikov Interaction of vibroimpact lattice and screen sieve in antiphase oscillation mode. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022;* 19 (5): 624-636. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2022-19-5-624-636

введение

В строительстве для классификации сыпучих материалов по крупности широко применяются вибрационные грохоты, представляющие собой колеблющийся корпус с закрепленной на нем просеивающей поверхностью с калиброванными отверстиями. В процессе грохочения материала возникает проблема засорения просеивающих поверхностей зернами клиновидной или ступенчатой формы, а также залипания ее отверстий глинистыми и другими вязкими материалами, что уменьшает живое сечение сита и затрудняет прохождение через него частиц мелкого класса и неизбежно приводит к чрезмерному замельчению надрешетного продукта [1, 2]. Для очистки сит грохотов от загрязняющих зерен и замазывающих илистых и глинистых материалов широко применяются разнообразные механические устройства, передающие на сито ударные импульсы движущимися элементами¹ [3, 4, 5, 6, 7]. Одной из простых и эффективных конструкций является инновационный грохот² с виброударной решеткой, приводимой в движение колебаниями корпуса. Схема взаимодействия конструктивных элементов такого виброударного грохота показана на рисунке 1, а расчетная схема – на рисунке 2.

Грохот (см. рисунок 1) включает корпус 1, установленный на основании на опорных пружинах 2, и закрепленное на нем сито 3. Под ситом на специальных прокладках 4 установлены пружины взаимодействия 5 и смонтированный на них ударных элемент 6 в виде виброударной решетки, ширина которой близка по ширине к поперечному размеру сита грохота. Под действием гармонической вынуждающей силы Psin(ωt), передаваемой на корпус грохота вибровозбудителем направленного действия 7, решетка приводится в движение и совершает направленные колебания, ударяя по ситу в каждом периоде колебаний. Между решеткой и ситом имеется регулировочный зазор е, устанавливаемый в статическом положении грохота для управления величиной ударного импульса, передаваемого на сито. Регулирование величины импульса осуществляется двумя параметрами: зазором е между ударной решеткой и ситом и частотой колебаний корпуса грохота.

Настройка рассматриваемого виброударного грохота на эффективные режимы работы является сложной задачей, поскольку механическая система грохота относится к классу виброударных систем (ВУС), и закономерности их движения нелинейно зависят от параметров системы. Как правило, для различных массогабаритных ВУС приходится выполнять отдельные исследования параметров колебаний элементов. Для экономии ресурсов подобные исследования по установлению взаимосвязей между параметрами движения сита и виброударной решетки и регулировочным зазором и частотой колебаний целесообразно выполнять методом математического моделирования.

² Виброударный грохот: пат. 210586 Рос. Федерация. № 2021118793; заявл. 28.06.2021; опубл. 21.04.2022, Бюл. № 12. 2 с.



¹ Многочастотная вибрационная сепараторная система, вибрационный сепаратор, содержащий эту систему, и способ вибрационной сепарации твердых частиц: пат. 2256515 Рос. Федерация. № 2001129167/03; заявл. 28.03.2000; опубл. 20.08.2003, Бюл. № 23. 51 с.

PART I

TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING



Рисунок 2 – Расчетная схема виброударного грохота для интервала безударного движения виброударной решетки и сита (для положения статического равновесия системы): m₁, m₂, m₃ – массы корпуса грохота, виброударной решетки и сита; c₁, c₂ – коэффициенты жесткости опорных пружин и пружин взаимодействия; c₃ – коэффициент жесткости сита при деформировании в поперечном направлении; b₁, b₂ и b₃ – коэффициенты демпфирования пружин и сита грохота при деформации; е –зазор; Psin(*w*t) – вертикальная вынуждающая сила вибровозбудителя Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Computational scheme of vibro-impulse screen for the period of nonimpact motion of vibroimpact lattice and sieve (for the static equilibrium state of the system): m_1, m_2, m_3 – masses of screen body, vibroimpact lattice and sieve; c_1, c_2 – stiffness coefficients of supporting springs and interaction springs; c_3 – stiffness coefficient of transverse sieve deformation; b_1, b_2, b_3 – viscous coefficients of springs and screen sieve under deformation; e –gap; $Psin(\omega t)$ – vertical excitation force of vibration exciter Sourse: compiled by the authors.

двумя, четырьмя ударами за период или с одним соударением за несколько периодов), может возникать увод (когда звенья системы колеблются не вблизи своих положений равновесия, а вблизи некоторых смещенных положений динамического равновесия) и неустойчивые режимы движения [11]. Поэтому изучение динамики движения такой системы является сложной задачей, требующей применения специальных методов исследования. Наиболее распространенными методами расчета колебаний ВУС являются приближенные методы, направленные на отыскание установившегося режима движения элементов механической системы с помощью линеаризации уравнений движения, а также точные методы решения уравнений движения [11, 12, 13].

Отметим, что процесс очистки поверхности сита от загрязнений в этих режимах может происходить по-разному. В частности, в режиме противофазных колебаний удар по



Рисунок 1 – Схема поперечного сечения виброударного грохота: 1 – корпус грохота; 2 – опорные пружины; 3 – сито грохота; 4 – прокладки регулирования зазора е; 5 – пружины взаимодействия; 6 – виброударная решетка; 7 – вибровозбудитель направленных колебаний; 8 – классифицируемый материал; e – зазор между виброударной решеткой и ситом; Psin(ωt) – направленная вынуждающая сила; P – амплитудное значение вынуждающей силы; ω – частота колебаний Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Vibroimpact screen scheme (cross-section):

 1 – screen body; 2 – supporting springs;
 3 – screen sieve; 4 – gaskets for gap e adjusting;
 5 – interaction springs; 6 – vibroimpact lattice;

7 – directional vibration exciter; 8 – classifying material;

 e – gap between vibroimpact lattice and sieve;
 Psin(ωt) – directional excitation force;

P – amplitude value of exiting force; ω – oscillation frequency Sourse: compiled by the authors.

Исследованию процесса взаимодействия элементов виброударных грохотов посвящено большое число работ [5, 6, 7, 8, 9, 10], однако задача определения влияния регулировочного зазора и частоты колебаний на передаваемый ситу ударный импульс и размах колебаний сита не являлась в этих работах предметом специального внимания, либо не была проработана достаточно глубоко. В частности, для рассматриваемой трехмассовой ВУС грохота с наличием зазора между двумя соударяющимися массами, взаимодействующими по схеме (см. рисунок 2), подробные исследования такого типа ранее не выполнялись.

По принятой классификации ВУС данная система «корпус грохота – виброударная решетка – сито» относится к классу трехмассовых ВУС с одной ударной парой с начальным зазором [11]. В рассматриваемой ВУС возможно существование нескольких разнообразных режимов периодического движения (с одним, ситу происходит в момент, когда решетка и сито с находящимся на ней слоем материала движутся навстречу друг другу. В этом случае слой, лежащий на сите, препятствует выбиванию частиц вверх из ячеек сита, что приводит при ударе к проскакиванию через ячейки сита относительно крупных зерен в подрешетный продукт и тем самым к увеличению попадания крупных частиц в мелкий подрешетный продукт, что снижает эффективность грохочения.

В режиме синфазных колебаний решетки и сита удар по ситу происходит в момент, когда оба элемента двигаются вверх и решетка догоняет сито. В этот момент слой материала совершает свободный полет над ситом, и застрявшие в ячейках сита зерна могут беспрепятственно выбиваться из ячеек сита вверх, оставаясь при этом в надрешетном продукте. Из сказанного следует, что для качественного грохочения синфазный режим является более предпочтительным.

Интенсивность очистки сита как в синфазном, так и в противофазном режимах колебаний, – будет зависеть от физико-механических свойств классифицируемого материала и будет различной при грохочении твердых, вязких и глинистых материалов. Поэтому для каждого материала следует выполнять отдельную экспериментальную оценку эффективности очистки сита.

В настоящей работе выполняется исследование взаимодействия элементов виброударного грохота при синфазном режиме колебаний виброударной решетки и сита. Определение закономерностей взаимодействия элементов виброударной системы позволит подбирать ее параметры для обеспечения заданных режимов движения рабочих элементов и тем самым даст возможность при настройке грохота управлять режимами его работы для выбора наилучших режимов очистки сита виброударной решеткой при поддержании требуемой эффективности процесса грохочения. Практической целью такого управления является снижение трудоемкости работ, выполняемых в процессе пусконаладки и эксплуатации виброударного грохота.

Целью исследования является установление влияния зазора и частоты колебаний виброударной системы грохота на величину ударного импульса, передаваемого решеткой на сито виброударного грохота в синфазном режиме их колебаний, для настройки эффективных режимов работы виброударного грохота.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач:

 определить границы диапазонов параметров режимов работы виброударного грохота, обеспечивающие синфазный режим колебаний виброударной решетки и сита;

 установить закономерности изменения передаваемого на сито ударного импульса в зависимости от величины зазора между виброударной решеткой и ситом и частоты колебаний грохота;

 разработать практические рекомендации по настройке величины ударного импульса, передаваемого виброударной решеткой на сито грохота, для повышения эффективности очистки ячеек сита от засорения их труднопроходимыми частицами.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Задача исследования параметров движения элементов виброударной системы грохота для синфазного режима колебаний виброударной решетки и сита решается с помощью трехмассовой модели «корпус грохота – виброударная решетка – сито», приведенной в работе [14]. Расчетная схема рассматриваемой модели представлена на рисунке 2, значения используемых в модели численных параметров конструктивных элементов грохота – в таблице 1 [8, 14]. В настоящем исследовании учитываются только вертикальные составляющие колебаний элементов системы.

Таблица 1

Расчетные конструктивные параметры виброударного грохота [8]

Table 1 [8] Calculation design parameters of vibroimpact screen

Параметр									
<i>т</i> 1, кг	<i>т</i> 2, кг	<i>т</i> 3, кг	<i>с</i> ₁, кН/м	с ₂ , кН/м	с ₃ , кН/м	<i>Р</i> , кН	<i>b</i> ₁, кН·с/м	<i>b</i> ₂, кН∙с/м	<i>b</i> ₃ , кН∙с/м
880,0	180,0	20,5	300,0	1 380,1	807,5	25,0	3,6	2,091	4,8

В системе существует два характерных интервала движения виброударной решетки и сита – интервал бесконтактного движения обоих элементов системы, на котором решетка и сито перемещаются независимо друг от друга до момента соударения, и интервал их движения в контакте, в течение которого оба элемента перемещаются как одно твердое тело. Поиск установившихся периодических режимов движения элементов системы в настоящей работе выполняется методом припасовывания нахождением решений линейных дифференциальных уравнений движения на каждом интервале движения и связыванием соответствующих координат и скоростей элементов рассматриваемой системы на границах интервалов [11]. Уравнения движения решаются методом Рунге-Кутты четвертого порядка точности с помощью специально разработанной компьютерной программы. Полное математическое описание движения рассматриваемой виброударной системы грохота приведено в работе [14].

Границы области синфазного режима колебаний виброударной решетки и сита определяются по известному методу, изложенному, например, в работе [15], где для двухмассовой колебательной системы области синфазного режима колебаний соответствуют рабочей частоте колебаний из диапазона $k_1 < \omega < n_2$, где k_1 – низшая собственная частота колебаний двухмассовой системы, n_2 – парциальная частота колебаний решетки, т. е. собственная частота колебаний массы m_2 при неподвижной массе m_1 . На рисунке 3 приведены амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) перемещений элементов двухмассовой системы, построенные для принятых численных параметров элементов конструкции грохота (см. таблицу 1). Определим границы диапазонов частоты колебаний ω и зазора *е* для принятых численных значений параметров системы.

Частота колебаний назначается с отстройкой от резонансных частот, чтобы отклонения частоты при работе грохота не приводили к существенным изменениям амплитуд колебаний сита и виброударной решетки. С учетом этого примем диапазон 50 рад/с < ω < 75 рад/с, соответствующий наиболее пологим участкам АЧХ решетки и корпуса грохота по сравнению с двумя другими участками синфазного режима колебаний: $k_1 < \omega < \omega_1$ рад/с и $\omega_2 < \omega < n_2$ (см. рисунок 3).



Рисунок 3 – Амплитудно-частотные характеристики перемещений корпуса грохота т, (с безынерционным ситом т₃) и виброударной решетки т₂

для двухмассовой системы «корпус грохота – виброударная решетка».

 $k_{_{1}},\,k_{_2}$ – собственные частоты колебаний системы; $n_{_2}$ – парциальная частота колебаний массы $m_{_{2'}}$

*ω*₁, *ω*₂ – нижняя и верхняя границы исследуемого частотного диапазона Источник: составлено авторами.

Figure 3 – Amplitude-frequency characteristics of displacement of screen body m_1 (with inertialless sieve m_2) and vibroimpact lattice m_2 for two-mass system «screen body – vibroimpact lattice»: k_1, k_2 – system oscillations natural frequencies; n_2 – partial frequency of oscillations of mass m_2 : ω_1, ω_2 – low and high boundaries of being investigated oscillation range Sourse: compiled by the authors.



Таблица 2 Уровни факторов и интервалы их варьирования Источник: составлено авторами.

> Table 2 Levels of factors and its variability intervals

Sourse: compiled by the authors.

Фактор	Коловое			У	Уровни факторов			
	обозначение	Интервал варьирования	Размерность	основной 0	верхний +1	нижний —1		
ω	<i>x</i> ₁	12,5	рад/с	62,5	75	50		
е	x ₂	1,75	ММ	1,75	3,5	0		

Верхняя граница диапазона зазора е определяется из условия обеспечения удара между виброударной решетки и ситом по условию

$$A_2 - A_1 > e \,, \tag{1}$$

где A_1 , A_2 – амплитуды колебаний сита и виброударной решетки.

Для выполнения этого условия во всем выбранном диапазоне частоты колебаний ω необходимо, чтобы оно выполнялось для участамплитудно-частотной характеристики, соответствующего наибольшему сближению амплитудно-частотных характеристик корпуса (сита) грохота и решетки, т. е. при минимальном значении А2-А1. Это достигается при частоте колебаний ω = ω, (см. рисунок 3), когда A₁ = 9,7 мм и A₂ = 14,5 мм, и, следовательно, значение верхней границы зазора е равно 14,5 - 9,7 = 4,8 мм. Примем окончательно значение верхней границы е = 3,5 мм, чтобы обеспечить с запасом выполнение условия (1). В качестве нижней границы исследуемого диапазона принимается значение е = 0, соответствующее контакту сита и решетки в статическом равновесии без натяга.

Уровни и интервалы варьирования факторов, исследуемых в вычислительном эксперименте, приведены в таблице 2.

Проводится две серии опытов: сначала выполняется несколько отдельных расчетов с варьированием одного исследуемого фактора при неизменных значениях других параметров с целью оценки качественного влияния этого параметра на ударный импульс, передаваемого на сито, и размах колебаний сита. Уравнение для определения исследуемого ударного импульса получается из закона сохранения импульса:

$$S = m_3 (\dot{y}_{23} - \dot{y}_3), \qquad (2)$$

где \dot{y}_3 – скорость движения в момент времени, предшествующий соударению с решеткой; \dot{y}_{23} – скорость решетки и сита в момент времени сразу после соударения.

Размах колебаний сита *R* определяется как разность координаты верхнего и нижнего положения сита, служит для оценки динамической нагруженности сита при вибрации.

Во второй серии опытов определяются уравнения регрессии ударного импульса и размаха колебаний сита от частоты колебаний и зазора для выбранных значений параметров ВУС грохота [8, 14]. Для проведения вычислительного эксперимента методом экстремального планирования выбран центральный композиционный план с одним опытом в центре плана.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты выполненных расчетов параметров колебаний виброударной системы «корпус грохота – виброударная решетка – сито грохота» при различных значениях частоты колебаний для принятых параметров ВУС грохота и зазора между виброударной решеткой и ситом грохота приведены на рисунках 4 и 5.



Рисунок 4 – Перемещения сита и виброударной решетки при регулировочном зазоре e=1,75 мм: a – частота колебаний ω = 50 рад/с; б – частота колебаний ω = 62,5 рад/с;

 в – частота колебаний ω = 75 рад/с Источник: составлено авторами.

PART I

Figure 4 – Displacement of sieve and vibroimpact lattice for adjustment gap e = 1,75 mm:

a – oscillation frequency ω = 50 rad/s;

b – oscillation frequency ω = 62,5 rad/s; c – oscillation frequency ω = 75 rad/s Source: compiled by the authors.



Рисунок 5 – Перемещения сита и виброударной решетки при частоте колебаний ω = 62,5 рад/с: а – зазор е = 0 мм; б – зазор е = 1,75 мм; в – зазор е = 3,5 мм

Источник: составлено авторами.

631

Figure 5. Displacement of sieve and vibroimpact lattice for oscillation frequency $\omega = 62,5$ rad/s: $a - gap \ e = 0 \ mm; \ b - gap \ e = 1,75 \ mm; \ c - gap \ e = 3,5 \ mm$ Source: compiled by the authors. На графиках (см. рисунки 4 и 5) показаны продолжительности движения сита и виброударной решетки на интервале их движения в контакте Т_{конт} и интервале безударного движения Т_{безуд}, размах колебаний сита *R* и величина поперечного деформирования сита виброударной решеткой δ. Удар по ситу происходит в период, когда слой материала совершает свободный полет над ситом.

При увеличении частоты колебаний (см. рисунок 4) размах колебаний сита *R* уменьшается, как это видно на АЧХ двухмассовой системы (см. рисунок 3). При этом интервал движения решетки в контакте с ситом Т_{конт} уменьшается, а интервал их безударного движения Т_{безуд}, наоборот, увеличивается. Также увеличивается и передаваемый на сито решеткой ударный импульс *S*: при частотах колебаний 50 рад/с, 62,5 рад/с и 75 рад/с импульс, рассчитываемый по формуле (2), принимает соответственно значения 4,64, 6,51 и 10,51 кг·м/с. Это происходит из-за увеличения относительной скорости виброударной решетки и сита, определяемой в момент соударения.

При увеличении зазора е между виброударной решеткой и ситом размах колебаний сита *R* уменьшается, при этом возрастает интервал безударного движения решетки с ситом Т_{безуд} и уменьшается интервал их движения в контакте Т_{конт} (см. рисунок 5). При этом передаваемый ситу ударный импульс *S*, рассчитываемый по формуле (2), уменьшается, последовательно принимая расчетные значения 7,35, 6,51 и 4,73 кг·м/с при соответствующих значениях зазора 0, 1,75 и 3,5 мм. Это объясняется следующим: при увеличении зазора момент соударения виброударной решетки с ситом наступает позднее (см. рисунок 5), величина скорости движения решетки в момент соударения становится меньше, что уменьшает относительную скорость решетки и сита в момент удара, а значит, и величину передаваемого ситу ударного импульса.

Полученные результаты расчета показывают, что в рассматриваемом частном случае изменение частоты колебаний грохота в большей степени влияет на изменение передаваемого ситу ударного импульса и размах колебаний сита, чем изменение величины зазора.

Далее приведем уравнения регрессии для определения влияния зазора е между решеткой и ситом и частоты колебаний ω на ударный импульс и размах колебаний сита, которые определены методом вычислительного эксперимента с применением матрицы планирования, приведенной в таблице 3. При планировании эксперимента принято, что уравнения регрессии представляются полиномами второго порядка. Погрешность при измерении величины ударного импульса составила менее 6,4%, размаха колебаний сита – менее 1,1%. Результаты эксперимента и рассчитанные коэффициенты уравнений регрессии приведены в таблице 3.

Таблица З

Матрица планирования эксперимента и результаты опытов Источник: составлено авторами.

> Table 3 Design matrix and results of experiments Sourse: compiled by the authors.

Номер опыта		Факто (кодированны	оры е значения)	Факторы (натуральные значения)		Отклик	
		X ₁	x ₂	ω	е	S, кг∙м/с	<i>R</i> , мм
Ядро плана	1 2 3 4	-1	-1	50	0	7,17	24,13
		+1	-1	75	0	9,93	13,41
		-1	+1	50	3,5	1,31	21,41
		+1	+1	75	3,5	10,34	10,95
	5 6 7 8	-1	0	50	1,75	4,64	22,51
Звездные		+1	0	75	1,75	10,51	12,22
точки		0	-1	62,5	0	7,35	16,95
		0	+1	62,5	3,5	4,73	13,81
Центр плана	9	0	0	62,5	1,75	6,51	15,37
Расч	етные з	$b_0 = 6,94$ $b_1 = 2,944$ $b_{11} = 0,12233$ $b_2 = -1,345$	$b_0 = 16,75$ $b_1 = -5,245$ $b_{11} = 2,0617$ $b_2 = -1,387$				



Таблииа 4

Результаты статистической обработки экспериментальных данных и оценки адекватности регрессионных моделей Источник: составлено авторами.

Table 4

Resuts of statistical analysis of experimental data and adequacy evaluation of regression models Sourse: compiled by the authors.

Характе- ристика	Вид модели	Число степеней свободы, <i>f</i> для расчета s ² _{ад}	Дисперсия адекват- ности, <i>\$</i> ² _{ад}	Дисперсия воспроиз- водимости, <i>\$</i> ² _(/)	Расчетный критерий Фишера, <i>F</i> _{расч}	Табличный критерий Фишера, <i>F</i> _{табл} (при α = 0,05)
Ударный импульс S	$S = b_{0} + b_{1} \cdot x_{1} + b_{11} \cdot x_{1}^{2} + b_{2} \cdot x_{2}$	5	2,533	0.00	0,362	3,48
	$S = b_{0} + b_{1} \cdot x_{1} + b_{2} \cdot x_{2}$	6	2,113	8,39	0,252	3,37
Размах колебаний сита <i>R</i>	$R = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_2 \cdot x_2$	5	3,433	20.50	0,167	3,48
	$R = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2$	6	1,444	20,59	0,070	3,37

Результаты статистической обработки экспериментальных данных и оценки адекватности уравнений регрессии приведены в таблице 4. Статистические характеристики рассчитывались для двух моделей регрессии - квадратичной и линейной.

Из полученных результатов видно, что расчетное значение критерия Фишера для линейных моделей меньше, чем для квадратичной. Это справедливо как для передаваемого на сито ударного импульса S, так и для размаха колебаний сита R. Поэтому окончательные уравнения регрессии имеют линейный вид:

$$S = 6,94 + 2,944x_1 - 1,345x_2, \tag{3}$$

$$R = 16,75 - 5,245x_1 - 1,387x_2. \tag{4}$$

Переходя к натуральным значениям факторов, получаем

$$S = -6,44 + 0,2355\omega - 0,7686e, \qquad (5)$$

$$R = 44,36 - 0,4196\omega - 0,7926e.$$
 (6)



Рисунок 6 – Зависимости параметров взаимодействия сита и виброударной решетки в синфазном режиме от частоты колебаний ω и зазора е; а – ударный импульс S, передаваемый на сито; б – размах колебаний сита R Источник: составлено авторами.

Figure 6 – Dependences of sieve and vibroimpulse lattice interaction parameters from oscillation frequency ω and gap e for in-phase oscillation regime: a – impact impulse S transmitted to sieve; b – sieve double amplitude R Sourse: compiled by the authors.



Графики изменения передаваемого на сито ударного импульса и размаха колебаний сита в зависимости от частоты колебаний и зазора представлены на рисунке 6.

Полученные результаты (уравнения (3), (4), рисунок 6) показывают, что с увеличением зазора одновременно снижается передаваемый ситу ударный импульс и размах колебаний решетки. При увеличении частоты колебаний передаваемый на сито ударный импульс увеличивается, а размах колебаний сита – уменьшается. При этом частота колебаний влияет на оба этих параметра в большей степени, чем зазор, что согласуется с результатами, полученными в первой серии опытов (см. рисунки 4 и 5). Данные результаты необходимы для выполнения настройки оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота при изменении физико-механических свойств минеральных сыпучих сред, например, песков, поступающих из карьера. Как известно, при углублении карьера неизбежно происходит изменение фракционного состава песка и содержания частиц клиновидной или ступенчатой формы, а также пылеватых, глинистых и других липких частиц, что приводит к изменению степени засорения ячеек сита труднопроходимыми частицами, а также их залипанию на сите. Это в конечном итоге снижает активную поверхность сита и приводит к увеличению засоренности верхнего класса нижним.

С учетом сказанного, при изменении свойств исходного сырья, т. е. входных параметров регулируемой системы, задача настройки оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота заключается в том, чтобы выходной контролируемый показатель качества грохочения (засоренность верхнего класса нижним) не превышал заданное значение до момента его выхода за пределы допустимых ограничений. При превышении требуемой величины засоренности верхнего класса нижним необходима перенастройка параметров работы грохота выбором большей величины передаваемого на сито ударного импульса, обеспечивающего лучшее прохождение через сито зерен нижнего класса. Для этого, как видно из уравнения регрессии (5) для ударного импульса S, следует увеличивать частоту колебаний грохота ω до достижения необходимой величины выходного показателя качества грохочения. В том случае, если при такой подстройке частота колебаний грохота ω достигнет значения верхней границы рассмотренного диапазона ω₂ = 75 рад/с (см. рисунок 3), но при этом ударный импульс S не будет обеспечивать удовлетворительное значение показателя качества грохочения, следует уменьшать величину зазора е между виброударной решеткой и ситом грохота, как это видно из формулы (5).

Описанный процесс регулирования режимов работы грохота выполняется циклически с периодом, действующим с момента появления неудовлетворительного значения контролируемого показателя засоренности верхнего класса нижним до наступления следующего такого момента. При этом контроль значений показателя качества грохочения отбором проб материала для лабораторного анализа эффективности грохочения при эксплуатации грохота выполняется ежечасно в соответствии с требованиями ГОСТ 8735-88. При неудовлетворительном результате лабораторного анализа эффективности грохочения необходимо повторно выполнить настройку оптимальных режимов работы эксплуатируемого грохота, при которой по вышеуказанной процедуре выбирают значения частоты колебаний ω и зазора е, обеспечивающие наилучшие параметры очистки сита.

Таким образом, описанный процесс регулирования режимных параметров позволяет выполнять простую и эффективную настройку режимов работы виброударного грохота и снизить трудоемкость выполнения работ, осуществляемых в процессе его пусконаладки и эксплуатации.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Актуальной задачей при классификации зернистых материалов по крупности на вибрационных грохотах является обеспечение режимов работы виброударных устройств для очистки сит от загрязняющих зерен. Решение этой задачи позволяет увеличить живое сечение сита, тем самым повысив качество переработки сыпучих строительных материалов. Данная задача для приведенной конструкции виброударного грохота решается на основе установления закономерностей влияния частоты колебаний и зазора виброударной системы на величину ударного импульса, передаваемого на сито виброударной решеткой, и размах колебаний сита и определения диапазона устойчивых режимов колебаний виброударной системы грохота в режиме синфазных колебаний виброударной решетки и сита.

Поставленная задача решена методом математического моделирования. При этом установлено, что уменьшение зазора и увеличение частоты колебаний позволяет увеличить передаваемый на сито ударный импульс, что обеспечивает улучшение процесса очистки сита. На основе этого предложены рекомендации по настройке рациональных режимов работы грохота, заключающиеся в подборе частоты колебаний и зазора между виброударной решеткой и ситом, обеспечивающих высокие значения показателей качества процесса грохочения в условиях непрерывно изменяющихся характеристик поступающего на грохочение исходного материала. Это позволит снизить трудоемкость выполнения работ, осуществляемых в процессе пусконаладки и эксплуатации виброударного грохота.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Иткин Г. Е. Контроль крупности минерального сырья автоматическими гранулометрами. М.: Недра, 1986. 88 с.

2. Вайсберг Л. А., Картавый А. Н., Коровников А. Н. Просеивающие поверхности грохотов. СПб.: ВСЕГЕИ, 2005. 252 с.

3. Островский Г. М. [и др.] Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. СПб.: НПО «Профессионал», 2006. Ч.2. 916 с.

4. Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Изучение кинетики разделения по крупности и обезвоживания минерального сырья при виброударном грохочении // Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. 2013. Т. 53, № 94. С. 179–188.

5. Надутый В. П., Лапшин Е. С., Шевченко А. И. Математическое моделирование виброударного движения просеивающей поверхности с учетом диссипации для повышения эффективности грохочения // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук. -техн. журнал. 2012. Вип. 1(65). С. 106–109.

6. Надутый В. П., Лапшин Е. С., Хмеленко И. П. Анализ виброударного движения просеивающей поверхности грохота // Вібрації в техніці та технологіях: Всеукр. наук. -техн. журнал. 2009. Вип. 2(54). С. 69–72.

7. Шевченко Г. А., Шевченко В. Г., Бобылев А. А. Вибрационные грохоты с поличастотными колебаниями просеивающих поверхностей для тонкого разделения // Уголь Украины. 2013. №. 2. С. 23–29.

8. Евтюков С. А., Сизиков В. С. Динамика взаимодействия рабочих элементов виброударного грохота со слоем перемещаемого материала // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 4. С. 133–139.

9. Скрипилов А. П. Теоретическое и экспериментальное исследования виброударного грохота для фракционирования песка // Вестник гражданских инженеров. 2013. № 5. С. 188–193.

10. Gursky V., Murashev S., Gogol R. Optimal synthesis of the impulsive resonant two-mass vibroimpact systems // Proceedings of III International scientific conference of young scientists Engineering mechanics & transport 2013 (EMT-2013). Lviv: Lviv Polytechnic publishing house. 2013. P. 54–55.

11. Вибрации в технике: Справочник. В 6 т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). М.: Машиностроение,

1979. Т.2. Колебания нелинейных механических систем. 351 с.

12. Пановко Я. Г. Введение в теорию механического удара. М.: Гл. ред. физ.-мат. лит. изд-ва «Наука», 1977. 224 с.

13. Крупенин В. Л. Прогнозирование режимов движения виброударных систем // Сборник трудов XVIII Международного симпозиума «Динамика виброударных (сильно нелинейных) систем» DYVIS–2015, посвященный 100-летию со дня рождения д.т.н., проф. А. Е. Кобринского. М.: ИМАШ РАН. 2015. С. 140–148.

14. Сизиков В. С. Расчет параметров грохота с виброударным режимом колебаний сита. НИПКБ «Стройтехника». СПб, 2013. 102 с. Деп. в ВИНИТИ 25.11.13, № 329-В2013.

15. Тимошенко С. П. Колебания в инженерном деле. М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1967. 444 с.

REFERENCES

1. Itkin G.E. *Kontrol' krupnosti mineral'nogo syr'ya avtomaticheskimi granulometrami* [Control the size of mineral raw materials by automatic granulometers]. Moscow, Nedra, 1986. 88 p. (In Russ.)

2. Vaisberg, L.A., Kartavyi A.N., Korovnikov A.N. Proseivayushchie poverhnosti grohotov. Konstrukcii, materialy, opyt primeneniya [Screens screening media. Design, materials, application experience]. Saint Petersburg, VSEGEI, 2005. 252 p. (In Russ.)

3. Ostrovskij G. M. [and oth.] *Novyj spravochnik himika i tekhnologa. Processy i apparaty himicheskih tekhnologij* [The new handbook of chemist and technologist. Processes and equipment of chemical technologies]. Saint Petersburg, NPO Professional, 2006. P. 2. 916 p. (In Russ.)

4. Lapshin E. S., Shevchenko A. I. *Izuchenie kinetiki razdeleniya po krupnosti i obezvozhivaniya mineral'nogo syr'ya pri vibroudarnom grohochenii* [Study of the kinetics of separation by size and dehydration of mineral raw materials during vibroimpact screening]. Zbagachennya korisnih kopalin: Nauk. tekhn. Zb., 2013; T. 53, no. 94: 179-188. (In Russ.)

5. Nadutyj V. P., Lapshin E. S., Shevchenko A. I. Matematicheskoe modelirovanie vibroudarnogo dvizheniya proseivayushchej poverhnosti s uchetom dissipacii dlya povysheniya effektivnosti grohocheniya [Mathematical modelling of vibroimpact motion of the sifting surface taking into account dissipation to increase the efficiency of screening]. Vibracii v tekhnice i tekhnologiyah: Vseukr. nauchno-tekhn. Zhurnal. 2012; 1(65):106-109. (In Russ.)

6. Nadutyj V.P., Lapshin E.S., Hmelenko I. P. Analiz vibroudarnogo dvizheniya proseivayushchej poverhnosti grohota [Analysis of vibroimpulse motion of the deck plate of screen]. Vibracii v tekhnice i tekhnologiyah: Vseukr. nauchno-tekhn. Zhurnal. 2009; 2(54): 69-72. (In Russ.)

7. Shevchenko G. A., Shevchenko V. G., Bobylev A. A. Vibracionnye grohoty s polichastotnymi kolebaniyami proseivayushchih poverhnostej dlya tonkogo razdeleniya [Vibrating screens with multi-frequency vibrations of sifting sur-faces for fine separation]. Ugol' Ukrainy. 2013: 2: 23-29. (In Russ.)



8. Evtukov S. A., Sizikov V.S. *Dinamika vzaimodejstviya rabochih elementov vibroudarnogo grohota so sloem peremeshchaemogo materiala* [Dynamics of interaction of working elements of the vibroimpact screen with the layer of transported material]. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2015; 4(51): 133-139. (In Russ.)

9. Skripilov A. P. Teoreticheskoe i eksperimental'noe issledovaniya vibroudarnogo grohota dlya frakcionirovaniya peska [Theoretical and experimental study of vibrating screen for sand fractionation]. Vestnik grazhdanskih inzhenerov. 2013; 5: 188-193. (In Russ.)

10. Gursky V., Murashev S., Gogol R. Optimal synthesis of the impulsive resonant two-mass vibro-impact systems. Proceedings of III International scientific conference of young scientists Engineering mechanics & transport 2013 (EMT-2013). Lviv: Lviv Polytechnic publishing house. 2013, pp. 54-55.

11. Chelomej V.N. [and oth.] Vibracii v tekhnike: spravochnik [Vibration in engineering: handbook]. In 6 p. Red. sovet: V.N. Chelomej (chairman). Moscow, Mashinostroenie, 1979. P.2. Kolebaniya nelinejnyh mekhanicheskih sistem [Vibrations of nonlinear mechanical systems]. 351 p. (In Russ.)

12. Panovko Y.G. *Vvedenie v teoriyu mekhanich-eskogo udara* [Introduction to the theory of mechanical shock]. Moskow, Nauka, Gl. red. fiz. -mat. lit., 1977. 224 p. (In Russ.)

13. Krupenin V.L. *Prognozirovanie rezhimov dvizheniya vibroudarnyh system* [Prediction of motion regimes of vibroimpact systems]. Sbornik trudov XVIII Mezhdunarodnogo simpoziuma *«Dinamika vibroudarnyh (sil'no nelinejnyh) sistem»* DYVIS-2015, posvyashchennyj 100-letiyu so dnya rozhdeniya d.t.n., prof. A.E. Kobrinskogo [Proceedings of the XVIII International Symposium "Dynamics of vibroimpact (highly nonlinear) systems" DYVIS-2015, dedicated to the 100th anniversary of the birth of Doctor of Technical Sciences, Prof. A.E. Kobrinsky]. Moscow, IMASH RAN, 2015: 140–148. (In Russ.)

14. Sizikov V.S. Raschet parametrov grohota s vibroudarnym rezhimom kolebanij sita [Calculation of screen parameters with vibroimpact regime of sieve oscillations]. SPb, NIPKB «Strojtekhnika», 2013. 102 p. Deposited in VINITI 25.11.13, № 329-B2013. (In Russ.)

15. Timoshenko S.P. *Kolebaniya v inzhenernom dele* [Vibration problems in engineering]. Moscow, Nauka, Gl. red. fiz. -mat. lit., 1967. 444 p. (In Russ.)

ВКЛАД СОАВТОРОВ

Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTIONS

Each coauthor contributed equally to the work on every stage of conducted theoretical research and to the creation the sections of present article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Сизиков Валентин Станиславович – канд. техн. наук, старший преподаватель, кафедра «Технологии строительного производства».

Сизиков Станислав Анатольевич – канд. техн. наук, доц., генеральный директор.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Valentin S. Sizikov – Cand. of Sci., Department of Construction Technology.

Stanislav A. Sizikov – Cand. of Sci., Associate Professor, Managing Director.