УДК 621.92

© С. А. Евтюков, д-р техн. наук, профессор

© В. С. Сизиков, аспирант

© С. А. Сизиков, канд. техн. наук, доцент
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)

E-mail: evsa@online.ru, sizikovvs@ya.ru,

sizikovsa@rambler.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2018-15-1-134-140

© S. A. Evtyukov, Dr. Sci. Tech., Professor

© V. S. Sizikov, post-graduate student

© S. A. Sizikov, PhD in Sci. Tech., Associate Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)

E-mail: evsa@online.ru, sizikovvs@ya.ru,

sizikovsa@rambler.ru

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ МЕХАНОАКТИВАТОРА

DEFINITION OF PARAMETERS OF EXPERIMENTAL APPARATUS FOR MECHANICAL ACTIVATION

Приведены результаты определения параметров экспериментальной установки для исследования процессов механоактивации и оттирки зернистых материалов, полученные на основе проведения вычислительного эксперимента, цель которого — определение закономерностей влияния параметров колебаний рабочих органов установки на процесс объемного деформирования слоя материала и динамику его виброперемещения. Получены уравнения регрессии для вычисления сил нормальной реакции, действующих со стороны слоя на рабочие органы установки на этапе сжатия слоя, продолжительности действия этапов сжатия слоя и его полета, средней скорости транспортирования слоя материала и величины наибольшего сжатия слоя рабочими органами. Выполнена количественная оценка параметров процесса механической обработки зерен материала при разработке конструкции экспериментальной установки и методики проведения физических экспериментов для натурных исследований параметров процессов механической обработки зернистых материалов.

Ключевые слова: экспериментальная установка, уравнения регрессии, вычислительный эксперимент, рабочие органы, адекватность, объемное деформирование, слой зернистой среды, синхронные колебания в противофазе.

The paper presents results of determining the parameters of experimental apparatus for investigation of mechanical activation processes and attrition of granular materials obtained on the basis of numerical experiment. The goal of the experiment was the determination of the influence pattern of oscillation parameters of the apparatus' working tools on the process of volumetric deformation of the material layer and on dynamics of its vibration displacement. There have been obtained regression equations for calculation of normal reaction forces acting on the apparatus' working tools in the stage of layer compression, durations of the layer compression stages acting and its flight, average velocity of transportation of the material layer and the value of maximum compression of the layer by working tools. There have been estimated the quantity parameters of the process of machining the material grains at developing the design of experimental installation and the technique of carrying out physical tests for full-scale research of the parameters of the machine processing of granular materials.

Keywords: experimental apparatus, regression equations, numerical experiment, working tools, adequacy, volumetric deformation, layer of granular material, synchronous oscillations in the reversed phase.

При проектировании экспериментальной установки для исследования процессов механоактивации и оттирки зернистых материалов, осуществляемой методом механической обработки зерен путем виброобъемного деформирования слоя обрабатываемого материала [1] при его транспортировании, предварительно был про-

веден вычислительный эксперимент для определения закономерностей влияния параметров колебаний рабочих органов установки на процесс объемного деформирования слоя материала и динамику его виброперемещения. Проведение вычислительного эксперимента основывалось на предварительно выполненном математиче-

ском моделировании процесса взаимодействия рабочих органов установки с транспортируемым слоем обрабатываемого материала, отображаемым в виде инерционной упруго-вязкой модели [2, 3]. При моделировании была разработана расчетная схема (рис. 1) и получены уравнения движения элементов модели системы «слой материала — рабочие органы виброконвейера», которые полно характеризуют реальный процесс транспортирования и механической обработки зерен материала, основанный на периодическом сжатии слоя материала, заключенного между двумя рабочими органами, колеблющимися синхронно и в противофазе. При этом на этапе сближения рабочих органов происходит объемное деформирование слоя материала, сопровождающееся истиранием поверхности зерен материала внутри слоя, а на этапе их относительного удаления происходит разуплотнение слоя, сопровождающееся микроброском (полетом) слоя при потере его контакта с транспортирующей поверхностью рабочих органов.

Определение основных параметров взаимодействия рабочих органов со слоем материала осуществлялось на основе использования метода экстремального планирования вычислительного эксперимента [4]. В качестве основных параметров, формирующих исследуемый процесс, использованы факторы с интервалами их варьирования, указанными в табл. 1.

В табл. 1, помимо указанных на рис. 1 обозначений, приведены следующие параметры: частота колебаний рабочих органов n , амплитуда вертикальных колебаний рабочих органов A в режиме колебаний установки без материала и зазор e между верхней поверхностью слоя материала и поверхностью верхнего рабочего органа установки в статике. Величина амплитуды A в табл. 1 при каждом принятом значении частоты n определялась подбором соответствующего значения коэффициента жесткости c_{2y} (рис. 1) с учетом величин масс m_1 и m_2 и возмущающих сил вибраторов, приведенных к единичной площади поверхностей соответствующих рабочих органов установки. Расчетное значение коэффициента жесткости c_{2y} для принятой в табл. 1 частоты $n = 800$ кол./мин при амплитуде $A = 2$ мм составляет $c_{2y} = 2,95$ МН/м, а при $A = 5$ мм — $c_{2y} = 2,1$ МН/м; для $n = 1200$ кол./мин при ампли-

туде $A = 2$ мм — $c_{2y} = 6,75$ МН/м, а при $A = 5$ мм — $c_{2y} = 4,8$ МН/м.

Искомými факторами (откликами), характеризующими параметры упомянутого процесса, являются силы нормальной реакции N_{1y} и N_{2y} , действующие со стороны слоя на рабочие органы установки на этапе сжатия слоя, продолжительность действия этапов сжатия слоя φ_1 и его полета φ_2 , средняя скорость транспортирования слоя материала $V_{тр}$, а также величина наибольшего сжатия слоя рабочими органами по вертикали Δ_{max} .

Величина наибольшего сжатия слоя рабочими органами установки по вертикали Δ_{max} вычислялась как наибольшее значение суммы одновременного сжатия вертикальных пружин c_{3y} в модели слоя материала (см. рис. 1).

Силы нормальной реакции N_{1y} и N_{2y} вычисляются по следующим формулам:

$$N_{1y} = -c_{3y}\Delta y_{3(1)} - b_{3y}\Delta \dot{y}_{3(1)}; \quad (1)$$

$$N_{2y} = -c_{3y}\Delta y_{3(2)} - b_{3y}\Delta \dot{y}_{3(2)}, \quad (2)$$

Рис. 1. Расчетная схема процесса сжатия модели слоя материала рабочими органами установки: m_1, m_2, m_3 — соответственно массы нижнего и верхнего рабочих органов и слоя материала; m_{01}, m_{02} — массы контактных поверхностей модели слоя материала; $x_1, y_1, x_2, y_2, x_3, y_3, x_{01}, x_{02}$ — смещения $m_1, m_2, m_3, m_{01}, m_{02}$ в инерциальной системе отсчета (неподвижное основание) вдоль осей ox и oy ; $b_{1x}, b_{1y}, b_{2x}, b_{2y}, b_{3x}, b_{3y}$ — соответственно вязкие и упругие элементы, характеризующие деформационные свойства слоя материала ($i = 3$) и упругих связей установки ($i = 1, 2$) в направлениях осей x и y ; $F_1(t)$ и $F_2(t)$ — возмущающие силы, передающиеся рабочим органам от синхронно вращающихся дебалансов вибровозбудителей; α — угол наклона установки к горизонту

Таблица 1

Уровни факторов и интервалы их варьирования

Фактор	Обозначение фактора	Уровни			Интервал варьирования	Размерность
		-1	0	+1		
n	X_1	800	1000	1200	200	кол./мин
A	X_2	2	3,5	5	1,5	мм
e	X_3	-0,5	0,75	2	1,25	мм
α	X_4	0	7,5	15	7,5	град
c_{3y}	X_5	38	48	58	10	Н/м, 10^6
b_{3y}	X_6	21,5	24	26,5	2,5	Н · с/м, 10^4
c_{3y}^*	X_7	0,96	1,2	1,44	0,24	Н/м, 10^4
b_{3y}^*	X_8	13	14,5	16	1,5	Н · с/м, 10^3

где $\Delta\dot{y}_{3(1)}$ и $\Delta\dot{y}_{3(2)}$ — соответственно величина деформации (сжатия) слоя материала в направлении оси oy от действия нижнего и верхнего рабочих органов; $\Delta y_{3(1)}$ и $\Delta y_{3(2)}$ — соответственно скорости деформации слоя вдоль оси oy от действия нижнего и верхнего рабочих органов.

Продолжительности действия этапов полета слоя (этап 1) и его сжатия (этап 2), вычисленные в угловых единицах, определяются следующим соотношением:

$$\varphi_i = \frac{\omega t_i}{2\pi}, \quad (3)$$

где $i=1, 2$ — номер соответствующего этапа движения слоя; ω — частота колебаний, t_i — время действия i -го этапа в течение одного периода колебаний.

Средняя скорость транспортирования $V_{тр}$ вычисляется в соответствии со следующим выражением [5, 6]:

$$V_{тр} = \frac{1}{\Delta} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\int_{\omega t_i}^{\omega t_{i+1}} \dot{x}_i d\omega t \right), \quad (4)$$

где Δ — продолжительность периода движения слоя в угловых единицах; n — количество характерных этапов его движения на этом периоде (этапы полета, этапы сжатия слоя, промежуточные этапы с проскальзыванием относительно рабочих органов и без такового); $\dot{x}_i$ — абсолютная скорость движения слоя по оси ox на соответствующем этапе его движения.

Численные значения исходных параметров для проведения вычислительного эксперимента были приняты следующими:

- массы нижнего и верхнего рабочих органов с вибраторами: $m_1 = m_2 = 480$ кг;

- масса слоя обрабатываемого материала (песка), заключенного между рабочими органами: $m_3 = 140$ кг;

- характеристики упругих опор (пружин) установки в направлениях осей ox и oy соответственно: $c_{1x} = 83\,830$ Н/м, $b_{1x} = 960$ Н · с/м, $c_{1y} = 204\,470$ Н/м, $b_{1y} = 1500$ Н · с/м;

- характеристики упругих элементов взаимодействия установки в направлениях осей ox и oy соответственно: $c_{2x} = 0,4c_{2y}$, $b_{2x} = 0,1\sqrt{m_2 c_{2x}}$, $b_{2y} = 0,1\sqrt{m_2 c_{2y}}$;

- статический момент дебалансов одного вибровозбудителя: $M_{деб} = 0,8$ кг · м;

- коэффициенты, характеризующие упругие и вязкие свойства слоя материала в направлении оси ox : $c_{3x} = 0,5c_{3y}$, $b_{3x} = 0,5b_{3y}$;

- коэффициенты трения покоя и скольжения материала о рабочие органы: $\mu_{ст} = 0,5$, $\mu = 0,42$.

Вышеуказанные массы (m_1 , m_2 , m_3) и коэффициенты (c_{1x} , b_{1x} , c_{1y} , b_{1y} , c_{2x} , b_{2x} , b_{2y} , c_{3x} , b_{3x}), а также величина момента дебаланса $M_{деб}$ каждого вибратора и коэффициенты c_{3y} , b_{3y} , c_{3y}^* , b_{3y}^* , представленные на рис. 1, указаны в величинах, приведенных к единичной площади ($S = 1$ м²) поверхности соответствующего рабочего органа установки. При этом определяемые в процессе экспериментов значения сил нормальной реакции N_{1y} и N_{2y} также приведены к единичной площади поверхности соответствующего рабочего органа установки.

С учетом вышеизложенного и принятых условий и параметров работы установки на основе метода рационального планирования экспериментов, по которому выполняется 1/16 реплики от полного факторного эксперимента [4], был проведен вычислительный эксперимент в соответствии с матрицей планирования, приведенной в табл. 2. При построении плана эксперимента использовались следующие генерирующие соотношения: $x_5 = x_1 x_2 x_3$, $x_6 = -x_1 x_2 x_4$, $x_7 = -x_1 x_3 x_4$, $x_8 = -x_2 x_3 x_4$, где x_i — кодированное значение i -го фактора ($i = 1, \dots, 8$).

Результаты вычислительного эксперимента, выполненного по матрице (см. табл. 2), приведены в табл. 3 и получены на основе расчетов на ЭВМ, выполненных с использованием разработанной программы для определения параметров динамики взаимодействия рабочих органов установки с транспортируемым слоем сыпучей среды [7].

На основе результатов вычислительного эксперимента получены следующие уравнения.

- Уравнение регрессии для силы нормальной реакции N_{1y} :

$$N_{1y} = 40,6 + 13,13x_1 + 3,98x_2 + 7,62x_3 + 0,5x_4 + 2,15x_5 + 3,57x_6 + 1,05x_7 - 0,76x_8. \quad (5)$$

Таблица 2

Матрица планирования эксперимента

№ опыта	Кодированные значения факторов							
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8
1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
2	-1	-1	-1	+1	-1	+1	+1	+1
3	-1	-1	+1	-1	+1	-1	+1	+1
4	-1	-1	+1	+1	+1	+1	-1	-1
5	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	+1
6	-1	+1	-1	+1	+1	-1	+1	-1
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1
8	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	+1
9	+1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
10	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
11	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
12	+1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
13	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
14	+1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
15	+1	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
16	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

При проведении статистической обработки результатов эксперимента табличные значения критериев Фишера и Стьюдента были приняты при пятипроцентном уровне значимости [4]. Результаты обработки показали, что остаточная дисперсия $s_{\text{ост}}^2 = 56,8$, дисперсия модели среднего $s_y^2 = 310,2$, расчетный критерий Фишера $F = 5,45$, что больше его табличного значения $F_{\text{табл}} = 3,51$, и, следовательно, модель (уравнение регрессии (5)) адекватна. Величина доверительного интервала, рассчитанная с помощью табличного значения критерия Стьюдента, составила $\Delta b_i = 4,0$, что больше полученных абсолютных величин коэффициентов при факторах $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$, и, следовательно, упомянутые факторы можно исключить из уравнения регрессии (5).

Повторный расчет приведенных выше параметров для новой модели (без факторов x_2, x_4, x_8) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 74,0$; $F = 4,19$; $F_{\text{табл}} = 2,53$; $\Delta b_i = 4,56$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$N_{1y} = 0,06565n + 26,53A + 0,000143b_{3y} - 68,60. \quad (6)$$

- Уравнение регрессии для силы нормальной реакции N_{2y} :

$$N_{2y} = 64,25 + 19,22x_1 + 12,14x_2 - 0,29x_3 - 0,76x_4 + 0,69x_5 + 7,58x_6 + 0,13x_7 - 2,62x_8. \quad (7)$$

В результате статистической обработки результатов эксперимента были получены следующие значения: $s_{\text{ост}}^2 = 131,7$; $s_y^2 = 682,2$; а $F = 5,18$ при его табличном значении $F_{\text{табл}} = 3,51$, следовательно, модель (7) адекватна. Доверительный интервал $\Delta b_i = 6,08$, что больше абсолютных величин коэффициентов при факторах x_3, x_4, x_5, x_7, x_8 , следовательно, упомянутые факторы можно не учитывать в уравнении (7).

Повторный расчет приведенных выше параметров для новой модели (без факторов x_3, x_4, x_5, x_7, x_8) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 87,5$; $F = 7,79$; $F_{\text{табл}} = 2,62$; $\Delta b_i = 4,96$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$N_{2y} = 0,09610n + 8,093A + 0,000303b_{3y} - 132,94. \quad (8)$$

- Уравнение регрессии для продолжительности действия этапа сжатия ϕ_1 :

Таблица 3

Результаты вычислительного эксперимента

№ опыта	Результаты вычислений					
	N_{1y} , кН	N_{2y} , кН	Φ_1 , град	Φ_4 , град	$\Delta_{\max}$, мм	$V_{\text{тр}}$, м/с
1	19,48	42,04	145,37	42,23	0,4440	-0,0040
2	21,13	46,14	143,95	58,82	0,3839	0,0250
3	26,68	25,69	23,40	227,03	0,3064	0,0574
4	29,94	37,31	22,81	194,74	0,3325	0,1129
5	25,95	55,65	124,67	113,81	0,3879	-0,0127
6	24,81	47,63	125,18	88,33	0,4561	0,0260
7	37,38	63,17	29,97	216,16	0,5291	0,0462
8	34,41	42,68	30,85	230,37	0,5166	0,1003
9	53,52	77,95	31,43	258,70	0,5905	0,1511
10	32,94	60,12	149,67	145,14	0,6148	0,0551
11	58,53	67,95	30,57	264,21	0,6548	0,1499
12	50,73	59,73	34,47	252,93	0,7560	0,1892
13	39,01	77,58	124,52	181,34	0,9061	0,1815
14	46,98	109,24	123,85	171,75	0,8316	0,0689
15	68,20	97,94	41,83	266,56	0,8816	0,1295
16	80,00	117,23	38,87	273,01	0,7863	0,1720

$$\Phi_1 = 76,34 - 4,44x_1 + 3,63x_2 - 44,74x_3 - 7,37x_4 - 6,61x_5 - 8,07x_6 - 7,37x_7 + 6,97x_8. \quad (9)$$

В результате статистической обработки результатов эксперимента были получены следующие значения: $s_{\text{ост}}^2 = 793,0$; $s_y^2 = 2824,0$; а $F = 3,56$ при его табличном значении $F_{\text{табл}} = 3,51$, следовательно, модель (9) адекватна. Доверительный интервал $\Delta b_i = 14,93$, что больше абсолютных величин коэффициентов при факторах $x_1, x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$, следовательно, упомянутые факторы можно не учитывать в уравнении (9).

Повторный расчет приведенных параметров для новой модели (без факторов x_1, x_2, x_4-x_8) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 737,0$; $F = 3,83$; $F_{\text{табл}} = 2,46$; $\Delta b_i = 14,4$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$\Phi_1 = -35,79e + 103,18. \quad (10)$$

• Уравнение регрессии для продолжительности действия этапа полета Φ_4 :

$$\Phi_4 = 186,57 + 40,13x_1 + 6,1x_2 + 54,05x_3 + 9,69x_4 + 9,34x_5 + 7,33x_6 + 7,97x_7 + 0,15x_8. \quad (11)$$

В результате статистической обработки результатов эксперимента были получены следующие значения: $s_{\text{ост}}^2 = 1453,2$; $s_y^2 = 5870,8$; а $F = 4,04$ при его табличном значении $F_{\text{табл}} = 3,51$, следовательно, модель (11) адекватна. Доверительный интервал $\Delta b_i = 20,2$, что больше абсолютных величин коэффициентов при факторах $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$, следовательно, упомянутые факторы можно не учитывать в уравнении (11).

Повторный расчет приведенных выше параметров для новой модели (без факторов x_2, x_4-x_8) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 1195,5$; $F = 4,91$; $F_{\text{табл}} = 2,53$; $\Delta b_i = 18,33$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$\Phi_4 = 0,20065n + 43,24e - 46,51. \quad (12)$$

• Уравнение регрессии для величины сжатия слоя $\Delta_{\max}$:

$$\Delta_{\max} = 0,586 + 0,167x_1 + 0,076x_2 + 0,009x_3 + 0,001x_4 - 0,042x_5 - 0,024x_6 + 0,003x_7 - 0,017x_8. \quad (13)$$

В результате статистической обработки результатов эксперимента были получены следующие значения: $s_{\text{ост}}^2 = 0,002$; $s_y^2 = 0,039$; а $F = 20,28$ при его табличном значении $F_{\text{табл}} = 3,51$, следовательно, модель (13) адекватна. Доверительный интервал $\Delta b_i = 0,023$, что больше абсолютных величин коэффициентов при факторах x_3, x_4, x_7, x_8 , следовательно, упомянутые факторы можно не учитывать в уравнении (13).

Повторный расчет приведенных выше параметров для новой модели (без факторов x_3, x_4, x_7, x_8) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 0,002$; $F = 22,2$; $F_{\text{табл}} = 2,72$; $\Delta b_i = 0,022$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$\Delta_{\max} = 0,000835n + 0,051A - 0,004c_{3y} - 0,01b_{3y} + 0,006. \quad (14)$$

• Уравнение регрессии для средней скорости транспортирования $V_{\text{тр}}$:

$$V_{\text{тр}} = 0,09 + 0,047x_1 - 0,002x_2 + 0,029x_3 - 0,003x_4 - 0,004x_5 - 0,001x_6 + 0,016x_7 + 0,001x_8. \quad (15)$$

В результате статистической обработки результатов эксперимента были получены следующие значения: $s_{\text{ост}}^2 = 0,002$; $s_y^2 = 0,004$; а $F = 2,22$ при его табличном значении $F_{\text{табл}} = 3,51$, следовательно,

Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования процессов механической обработки зернистых материалов

но, модель (15) адекватна. Доверительный интервал $\Delta b_i = 0,024$, что больше абсолютных величин коэффициентов при факторах $x_2, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8$, следовательно, упомянутые факторы можно не учитывать в уравнении (15).

Повторный расчет приведенных выше параметров для новой модели (без факторов $x_2, x_4 - x_8$) подтвердил ее адекватность и значимость ее коэффициентов: $s_{\text{ост}}^2 = 0,001$; $F = 4,65$; $F_{\text{табл}} = 2,53$; $\Delta b_i = 0,016$. Окончательно уравнение регрессии для натуральных значений факторов имеет следующий вид:

$$V_{\text{тр}} = 0,000235n + 0,0004b_{3y} - 0,14. \quad (16)$$

Полученные уравнения регрессии (6), (8), (10), (12), (14), (16) позволяют определять скорость вибротранспортирования слоя и получать количественные оценки процесса механической обработки зерен материала. Кроме того, результаты вычислительного эксперимента послужили основой для разработки конструкции экспериментальной установки (рис. 2) и методики проведения физических экспериментов для натурных исследований параметров процессов механоактивации и оттирки зернистых материалов.

Библиографический список

1. Сизиков В. С. Виброобогащение мелких заполнителей бетонов методами оттирки и механоак-

тивации // Вестник гражданских инженеров. 2015. № 6 (59). С. 205–210.

2. Сизиков В. С. Упруго-вязкая модель взаимодействия слоя сыпучей среды с двумя противофазно вибрирующими стенками виброконвейера // Вестник гражданских инженеров. 2016. № 2 (55). С. 225–231.

3. Сизиков В. С. Математическое моделирование виброперемещения сыпучей среды противофазно вибрирующими стенками транспортирующего органа (часть 1) // Вестник гражданских инженеров. 2017. № 1 (60). С. 214–220.

4. Адлер Ю. Г., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 280 с.

5. Спиваковский А. О., Гончаревич И. Ф. Вибрационные конвейеры, питатели и вспомогательные устройства. М.: Машиностроение, 1972. 328 с.

6. Сизиков С. А., Вяткин Г. М., Сизиков В. С., Шуляков А. Д. Расчет производительности установок для сушки и обеспыливания отсеков производства щебня в аэровиброкопиющем слое // Обогащение руд. 2013. № 5. С. 25–29.

7. Сизиков В. С. Виброорган с двумя антифазно колеблющимися стенками. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2016618506, 06 июня 2016 г.

References

1. Sizikov V. S. *Vibroobogashchenie melkikh zapolniteley betonov metodami ottirki i mekhanoaktivatsii* [Vibration enrichment of fine concrete aggregates by the attrition and mechanical activation techniques]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2015, no. 6 (59), pp. 205–210.

2. Sizikov V. S. *Uprugo-vyazkaya model' vzaimodeystviya sloya sypuchey sredy s dvumya protivofazno vibriruyushchimi stenkami vibrokonveyera* [Viscoelastic model of interaction between the layer of granular media and two vibratory conveyor walls oscillating in antiphase]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2016, no. 2 (55), pp. 225–231.

3. Sizikov V. S. *Matematicheskoe modelirovanie vibroperemeshcheniya sypuchey sredy protivofazno vibriruyushchimi stenkami transportiruyushchego organa (chast' 1)* [Mathematical modeling of vibrational displacement of granular media by two transportation tool walls oscillating in antiphase (Part 1)]. *Vestnik grazhdanskikh inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*, 2017, no. 1 (60), pp. 214–220.

4. Adler Yu. G., Markova E. V., Granovskiy Yu. V. *Planirovanie ehksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Planning of the experiment by search of optimum conditions]. Moscow, Nauka Publ., 1976, 280 p.

5. Spivakovskiy A. O., Goncharevich I. F. *Vibratsionnye konveyery, pitateli i vspomogatel'nye ustroystva* [Vibrational conveyors, feeders and auxiliary devices]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1972, 328 p.

6. Sizikov S. A., Vyatkin G. M., Sizikov V. S., Shuloyakov A. D. *Raschet proizvoditel'nosti ustanovok dlya sushki i obespylivaniya otsefov proizvodstva shchebnya v aehrovibrokipyashchem sloe* [Calculation of productivity of installations for drying and dust removal waste of

crushed stone production in the aero vibro-fluidized bed layer]. *Obogashchenie rud – Ore Benefication*, 2013, no. 5, pp. 25–29.

7. Sizikov V. S. *Vibroorgan s dvumya antifazno koleblyushchimisya stenkami. Svidetel'stvo ob ofitsial'noy registratsii programmy dlya EhVM no. 2016618506, 06 iyunya 2016 g.* [Vibro-body with two reversed phase oscillating walls. Certificate on the official registration of the computer program no. 2016618506, June the 6, 2016].