Истомина М.В.].- М.: Машиностроение, 1966.- 508 с. 4. Левитский Н.И. Колебания в механизмах / Н.И. Левитский.- М.: Наука, 1988.- 336 с. 5. Пановко Я.Г. Введение в теорию механических колебаний / Я.Г. Пановко.- М.: Наука, 1991.- 255 с. 6. Пановко Я.Г. Основы прикладной теории упругих колебаний / Я.Г. Пановко.- М.: Машиностроение, 1967.- 316 с. 7. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний / В.Л. Бидерман .- М.: Высшая школа, 1980.- 408 с. 8. Бабаков И.М. Теория колебаний / И.М. Бабаков.- М.: Наука, 1964.- 560 с.

Bibliography (transliterated): 1. Den-Gartog Dzh.P. Mehanicheskie kolebanija / Dzh.P. Den-Gartog [per. s angl. Petrova L.I].- M.: Fizmatgiz, 1969.- 560 s. 2. Vibracii konstrukcij pri suhom trenii mezhdu jelementami / B.G. Korenev.- H.: Prapor, 1970.- 176 s. 3. Cze F.S. Mehanicheskie kolebanija / Cze F.S., Morze I.E., Hinkl R.T. [per. s angl. Istomina M.V.].- M.: Mashinostroenie, 1966.- 508 s. 4. Levitskij N.I. Kolebanija v mehanizmah / N.I. Levitskij.- M.: Nauka, 1988.- 336 s. 5. Panovko Ja.G. Vvedenie v teoriju mehanicheskih kolebanij / Ja.G. Panovko.- M.: Nauka, 1991.- 255 s. 6. Panovko Ja.G. Osnovy prikladnoj teorii uprugih kolebanij / Ja.G. Panovko.- M.: Mashinostroenie, 1967.- 316 s. 7. Biderman V.L. Teorija mehanicheskih kolebanij / V.L. Biderman .- M.: Vysshaja shkola, 1980.- 408 s. 8. Babakov I.M. Teorija kolebanij / I.M. Babakov.- M.: Nauka, 1964.- 560 s.

Ковтун А.В.

ПРО ЗМІНУ РЕЗОНАНСНИХ ЧАСТОТ КОЛИВАНЬ МЕХАНІЧНИХ СИСТЕМ ПРИ НАЯВНОСТІ ТЕРТЯ

Сформульовано й доведено твердження про зміну резонансних частот коливань механічних систем при наявності тертя. Наведено результати розрахунків.

Kovtun A.V.

TO CHANGE THE RESONANT FREQUENCY OSCILLATION OF MECHANICAL SYSTEMS WITH FRICTION

Formulated and proved the approval to change the frequency of resonance vibrations of mechanical systems with friction. This article describes the results of the calculations.

УДК 631.362:532

Ольшанский В.П., д-р. техн. наук; Ольшанский С.В.

УПРОЩЕННЫЙ РАСЧЕТ КОЛЕБАНИЙ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ, СЕПАРИРУЕМОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ ВИБРОРЕШЕТОМ

Постановка проблемы. Для интенсификации виброрешетного разделения зерновых смесей на фракции нужно знать закономерности движения сыпучих материалов по вибрирующим поверхностям. Часто, с целью упрощения расчетов, определяют усредненную за период колебаний скорость потока зерновой смеси. Но такой приближенный подход к моделированию процесса движения не дает информации об изменении скорости во времени, а также о распределении вибрационных полей внутри зерновой смеси. Поскольку вибрации сопутствуют разделению зернового материала, желательно знать как распространяются они от виброрешета по объему движущегося зернового слоя. С этой целью приходится решать краевые задачи гидродинамики, используя аналогию движений вязкой жидкости и виброожиженной сыпучей среды. Получение и анализ решений таких задач, позволяют усовершенствовать существующие математические модели движения сепарируемых зерновых смесей и поэтому относятся к актуальным научно-прикладным проблемам.

Анализ последних исследований и публикаций. Сдвиговые колебания зерновой смеси, как вязкой жидкости, вызванные осевыми вибрациями вертикального цилиндрического решета, рассматривали в [1,2]. При этом, упрощая математическую модель, пренебрегали в уравнении движения слагаемым с множителем $1/r$, где $r-$ радиальная координата. По сути, рассматривалось движение смеси по плоской вибрирующей поверхности. Учет названного слагаемого проводился в [3,4], где решения задач гидродинамики получено в функциях Кельвина. Для упрощения расчетов рекомендовано использовать асимптотику цилиндрических функций большого аргумента, который соответствует реальным режимам работы решета. Однако, решая задачи колебаний виброожиженной зерновой смеси, в указанных публикациях не учитывали разделение зернового материала на проходовую и сходовую фракции. Чтобы повысить адекватность теории, следует учитывать просеивание зерен через отверстия в перфорированной поверхности виброрешета. Такой учет проводился в [5], где просеивание проходовой фракции на решете рассматривалось как просачивание жидкости через проницаемую цилиндрическую поверхность. Следуя [5], здесь этот подход к моделированию зернового потока распространяется на вибрирующую цилиндрическую поверхность, т.е. в отличие от указанной публикации, учитываются колебания зерновой смеси. Для упрощения математической модели предлагается в уравнении движения считать постоянным множитель $1/r$. Такое упрощение не дает существенных погрешностей в рассматриваемой задаче, поскольку толщина сепарируемого зернового слоя мала по сравнению с радиусом решета, т.е. $1/r$ изменяется незначительно и его можно заменить средним значением. Пренебрегая изменением $1/r$ удается получить решение краевой задачи в элементарных функциях, что существенно упрощает проведение инженерных расчетов.

Целью работы является вывод и апробация приближенных формул для расчета колебаний скорости потока зерновой смеси внутри цилиндрического виброрешета в установившемся режиме его работы с учетом разделения смеси на проходовую и сходовую фракции.

Основная часть работы. При постановке краевой задачи учитываем осевую симметрию расчетной схемы, представленной на рисунке 1.

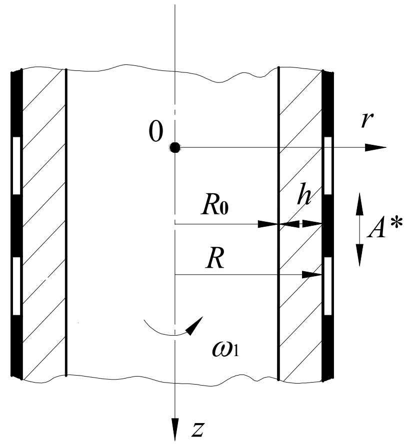

Рис. 1. Расчетная схема вертикального виброрешета с сепарируемой зерновой смесью

Символами r и z обозначены радиальная и осевая координаты; $R-$ радиус решета; $R_0 = R - h -$ внутренний радиус кольцевого слоя смеси толщиной h; A^*, $\omega -$ амплитуда и частота вертикальных вибраций решета.

Вертикальную проекцию скорости потока зерна u_z определяем из уравнения

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1-\lambda}{r}\frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{1}{\nu}\frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{g}{\nu}, \quad (1)$$

которое отличается от уравнения, решаемого в [5], инерционным членом в левой части.

В (1) $\lambda = \varepsilon \upsilon_\Pi R \nu^{-1}$, $\varepsilon -$ коэффициент «живого сечения» решета; $\upsilon_\Pi -$ радиальная проекция скорости просеивания зерен через отверстия в решете; $g -$ ускорение свободного падения; $\nu -$ эффективная кинематическая вибровязкость смеси; $t -$ время.

Значение ν зависит от механико-технологических характеристик зерновой смеси, параметров: R, A^*, ω и угловой скорости вращения решета ω_1 [6].

Решение уравнения (1) должно удовлетворять граничным условиям:

$$u_z(R,t) = A^* \omega \cos(\omega, t); \qquad \left.\frac{\partial u_z}{\partial r}\right|_{r=R_0} = 0. \quad (2)$$

Поскольку $h << R$, то в реальных условиях работы сепаратора величина r меняется незначительно. Поэтому для получения упрощенного решения краевой задачи заменим в (1) переменный коэффициент перед $\dfrac{\partial u_z}{\partial r}$ его средним значением. В результате, вместо (1) будем решать уравнение с постоянными коэффициентами

$$\frac{\partial^2 u_z}{\partial r^2} + \frac{1}{R_*}\frac{\partial u_z}{\partial r} - \frac{1}{\nu}\frac{\partial u_z}{\partial t} = -\frac{g}{\nu}, \quad (3)$$

в котором $R_*^{-1} = \dfrac{2(1-\lambda)}{R_0 + R} = const$.

Представим искомую проекцию скорости суммой

$$u_z(r,t) = u_1(r) + u_2(r,t), \quad (4)$$

в которой первое слагаемое не зависит от t.

Подставив (4) в (2) и (3), приходим к двум краевым задачам:

$$\frac{d^2 u_1}{dr^2} + \frac{1}{R_*}\frac{du_1}{dr} = -\frac{g}{\nu}; \quad (5)$$

$$u_1(R) = 0; \quad \left.\frac{du_1}{dr}\right|_{r=R_0} = 0$$

и

$$\frac{\partial^2 u_2}{\partial r^2} + \frac{1}{R_*}\frac{\partial u_2}{\partial r} - \frac{\partial u_2}{\partial t} = 0; \quad (6)$$

$$u_2(R,t) = A^* \omega \cos(\omega, t); \quad \left.\frac{\partial u_2}{\partial r}\right|_{r=R_0} = 0.$$

Первая из них решается понижением порядка дифференциального уравнения. Этот метод дает:

$$u_1(r) = \frac{gR_*}{\nu}\left\{R - r + R_*\left[\exp\left(\frac{R_0 - R}{R_*}\right) - \exp\left(\frac{R_0 - r}{R_*}\right)\right]\right\}, \quad (7)$$

при $\lambda \neq 1$.

Если $\lambda = 1$, то решением (5) является:

$$u_1(r) = \frac{g}{2\nu}\cdot\left[(R_0 - R)^2 - (R_0 - r)^2\right]. \quad (8)$$

Без усреднения переменной $1/r$, функция $u_1(r)$ представляется выражением [5]:

$$u_1(r) = \frac{g}{\lambda\nu(2-\lambda)}\cdot\left[R_0^{2-\lambda}\left(r^\lambda - R^\lambda\right) + \frac{\lambda}{2}\left(R^2 - r^2\right)\right],\ (\lambda \neq 2). \quad (9)$$

Формула (9) позволяет оценить точность приближения (7).

Решение второй граничной задачи (6) ищем в форме

$$u_2(r,t) = \mathbf{Re}\left[w(r)e^{i\omega t}\right] = \mathbf{Re}\, w(r)\cos(\omega t) - \mathbf{Im}\, w(r)\sin(\omega t), \quad (10)$$

где $i = \sqrt{-1}$; $w(r) -$ комплексная функция вещественного аргумента.

Она, согласно (6), удовлетворяет дифференциальному уравнению

$$\frac{d^2 w}{dr^2} + \frac{1}{R_*}\frac{dw}{dr} - \frac{i\omega}{\nu}w = 0, \quad (11)$$

и граничным условиям:

$$\mathbf{Re}\, w(R) = A^*\omega;\ \mathbf{Im}\, w(R) = \mathbf{Im}\left.\frac{dw}{dr}\right|_{r=R_0} = \mathbf{Re}\left.\frac{dw}{dr}\right|_{r=R_0} = 0. \quad (12)$$

Характеристическое уравнение

$$\gamma^2 + \frac{1}{R_*}\gamma - \frac{i\omega}{\nu} = 0,$$

соответствующее (11), имеет комплексные корни:

$$\gamma_{1,2} = \alpha_{1,2} \pm i\beta,$$

причем $\alpha_{1,2} = -\dfrac{1}{2R_*} \pm \dfrac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{\dfrac{1}{16R_*^4} + \dfrac{\omega^2}{\nu^2}} + \dfrac{1}{4R_*^2}}$; $\beta = \dfrac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{\sqrt{\dfrac{1}{16R_*^4} + \dfrac{\omega^2}{\nu^2}} - \dfrac{1}{4R_*^2}}$, $\lambda \neq 1$.

В случае, когда $\lambda = 1$:

$$\alpha_{1,2} = \pm\beta_1; \qquad \beta = \beta_1 = \sqrt{\frac{\omega}{2\nu}}.$$

Общим решением (11), при $\lambda \neq 1$, является:

$$w(r) = (c_1 + ic_2)\mathbf{exp}\left[(\alpha_1 + i\beta)\xi\right] + (c_3 + ic_4)\mathbf{exp}\left[(\alpha_2 - i\beta)\xi\right]. \quad (13)$$

Здесь $\xi = r - R_0$; $c_1, c_2, c_3, c_4 -$ вещественные постоянные.

Их определяем с помощью (12). Решив систему четырех уравнений, находим:

$$c_1=\frac{b_2A^*\omega}{b_1^2+b_2^2}\cdot\mathbf{exp(}-\alpha_1h\mathbf{)};\qquad c_2=-\frac{b_1A^*\omega}{b_1^2+b_2^2}\cdot\exp(-\alpha_1h);$$

$$c_3=a_1c_1+a_2c_2;\qquad c_4=-a_2c_1+a_1c_2;$$

$$a_1=\frac{\beta^2-\alpha_1\alpha_2}{\beta^2+\alpha_2^2};\qquad a_2=\frac{\beta(\alpha_1+\alpha_2)}{\beta^2+\alpha_2^2};$$

$$b_1=\sin(\beta h)-\exp[(\alpha_2-\alpha_1)h]\cdot[a_1\sin(\beta h)+a_2\cos(\beta h)];$$
$$b_2=\cos(\beta h)+\exp[(\alpha_2-\alpha_1)h]\cdot[a_1\cos(\beta h)-a_2\sin(\beta h)].$$

Если $\lambda=1$, то решение краевой задачи (11), (12) имеет компактный вид [2]

$$w(r)=A^*\omega\frac{ch\left(\sqrt{\frac{\omega}{v}}i\xi\right)}{ch\left(\sqrt{\frac{\omega}{v}}ih\right)}. \tag{15}$$

Выделив в (13) вещественную и мнимую части, с учетом (4), (10) и (14), получаем формулу вертикальной проекции скорости потока зерновой смеси:

$$u_z(\xi,t)=\frac{gR_*^2}{v}\left[\frac{h-\xi}{R_*}+\mathbf{exp}\left(\frac{-h}{R_*}\right)-\mathbf{exp}\left(-\frac{\xi}{R_*}\right)\right]+A_1(\xi)\mathbf{cos(}\omega t\mathbf{)}-A_2(\xi)\mathbf{sin(}\omega t\mathbf{)},\tag{16}$$

В ней

$$A_1(\xi)=\mathbf{exp}(\alpha_1\xi)\cdot[c_1\mathbf{cos}(\beta\xi)-c_2\mathbf{sin}(\beta\xi)]+\mathbf{exp}(\alpha_2\xi)\cdot[c_3\mathbf{cos}(\beta\xi)+c_4\mathbf{sin}(\beta\xi)];$$
$$A_2(\xi)=\mathbf{exp}(\alpha_1\xi)\cdot[c_1\mathbf{sin}(\beta\xi)+c_2\mathbf{cos}(\beta\xi)]+\mathbf{exp}(\alpha_2\xi)\cdot[c_4\mathbf{cos}(\beta\xi)-c_3\mathbf{sin}(\beta\xi)];$$

$\lambda\neq1$.

При $\lambda=1$, учитывая (4), (10) и (15), находим:

$$u_z(\xi,t)=\frac{g}{2v}\left(h^2-\xi^2\right)+A^*\omega[B_1f_1(\xi)+B_2f_2(\xi)]\mathbf{cos(}\omega t\mathbf{)}-$$
$$-A^*\omega[B_1f_2(\xi)-B_2f_1(\xi)]\mathbf{sin(}\omega t\mathbf{)}. \tag{17}$$

Здесь $B_1=\dfrac{ch(\beta_1h)\mathbf{cos}(\beta_1h)}{sh^2(\beta_1h)+\mathbf{cos}^2(\beta_1h)};\qquad B_2=\dfrac{sh(\beta_1h)\mathbf{sin}(\beta_1h)}{sh^2(\beta_1h)+\mathbf{cos}^2(\beta_1h)};$

$$f_1(\xi)=ch(\beta_1\xi)\mathbf{cos}(\beta_1\xi);\qquad f_2(\xi)=sh(\beta_1\xi)\mathbf{sin}(\beta_1\xi).$$

Если известна толщина кольцевого слоя h, то расчет производительности решета по сходовой фракции $Q_c(t)$ также сводится к вычислению элементарных функций. Действительно, используя таблицы интегралов [7] и (16), при $\lambda\neq1$, получаем:

$$Q_c(t)\approx\pi(R_0+R)\int_0^h u_z(\xi,t)d\xi=\frac{\pi g(R_0+R)R_*^2}{v}\left[\frac{h^2}{2R_*}+h\,\mathbf{exp}\left(-\frac{h}{R_*}\right)-R_*\times\right.$$
$$\left.\times\left(1-\mathbf{exp}\left(-\frac{h}{R_*}\right)\right)\right]+\pi(R+R_0)[(c_1S_1-c_2T_1+c_3S_2+c_4T_2)\mathbf{cos(}\omega t\mathbf{)}+$$
$$(-1)(c_1T_1+c_2S_1+c_4S_2-c_3T_2)\mathbf{sin(}\omega t\mathbf{)}].$$

Здесь

$$S_j = \frac{1}{\alpha_j^2 + \beta^2}\left\{\mathbf{exp}(\alpha_j h)\cdot\left[\alpha_j \mathbf{cos}(\beta h) + \beta \mathbf{sin}(\beta h)\right] - \alpha_j\right\};$$

$$T_j = \frac{1}{\alpha_j^2 + \beta^2}\left\{\mathbf{exp}(\alpha_j h)\cdot\left[\alpha_j \mathbf{sin}(\beta h) - \beta \mathbf{cos}(\beta h)\right] + \beta\right\};\quad j = \overline{1;2}.$$

В частном случае, когда $\lambda = 1$, интегрирование (17) дает:

$$Q_c(t) \approx \frac{\pi g(R_0 + R)h^3}{3\nu} + \pi(R_0 + R)A^*\omega\cdot\left[\left(B_1\Phi_1 + B_2\Phi_2\right)\mathbf{cos}(\omega t) + \right.$$
$$\left. + \left(B_2\Phi_1 - B_1\Phi_2\right)\mathbf{sin}(\omega t)\right],$$

причем $\Phi_{1,2} = \dfrac{1}{2\beta_1}\left[ch(\beta_1 h)\,\mathbf{sin}(\beta_1 h) \pm sh(\beta_1 h)\,\mathbf{cos}(\beta_1 h)\right].$

Производительность решета по сходовой фракции $Q_П$, в рамках изложенной теории, не зависит от t и пропорциональна высоте рабочей поверхности L:

$$Q_П = 2\pi RL\varepsilon\upsilon_П.$$

От величины $Q_П$ зависит изменение толщины кольцевого слоя смеси по координате z. Пренебрегая этим изменением, усредненное по высоте решета значение $h = const$ можно приближенно определить по формуле

$$h = \sqrt[3]{\frac{3\nu(Q - Q_П)}{2\pi gR}},$$

где $Q-$ объем смеси, поступающий на решето в единицу времени.

Результаты расчетов и выводы. Используем следующие исходные данные: $\rho = 750$ кг/м^3; $h = 0{,}01$ м; $\rho\nu = 0{,}66$ Па·с; $R = 0{,}3075$ м; $\varepsilon = 0{,}4$.

Вычисленные для них по формулам (7) и (9) значения $u_1(r)$, при $\upsilon_П = 0{,}005$ м/с, представлены в таблице 1.

Численный анализ показывает, что формула (7) является хорошим приближением точного решения (9).

В таблице 2 записаны, вычисленные по (16), значения скорости при $A^* = 0{,}0075$ м; $\omega = 52{,}33$ с$^{-1}$; $\upsilon_П = 0{,}0025$ м/с и прежних остальных исходных данных.

Таблица 1

Значения $10u_1(r)$ в м/с, вычисленные двумя способами

ξh^{-1}	0	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9
$10u_1(r)$, по (7)	5,55543	5,33255	4,66474	3,55279	1,99760	1,05403
$10u_1(r)$, по (9)	5,55540	5,33260	4,66478	3,55282	1,99762	1,05405

Вычисления подтверждают затухание вибрационного поля с удалением от поверхности виброрешета. По мере приближения к свободной поверхности слоя $(\xi \to 0)$ уменьшаются амплитуды колебаний $u_z(r,t)$, но увеличивается среднее значение скорости, относительно которого происходят эти колебания.

Таблица 2

Значения $10u_z(r,t)$ в м/с при различных r и t

$\frac{\omega t}{\pi}$	$10u_1(r)$, м/с; $\omega = 52{,}33$ с$^{-1}$				
	$\xi h^{-1} = 0$	$\xi h^{-1} = 0{,}25$	$\xi h^{-1} = 0{,}5$	$\xi h^{-1} = 0{,}75$	$\xi h^{-1} = 1$
0,00	5,302	5,222	4,992	4,604	3,925
0,25	6,385	6,251	5,787	4,775	2,775
0,50	6,970	6,657	5,620	3,564	0,000
0,75	6,713	6,201	4,590	1,680	-2,775
1,00	5,766	5,151	3,299	0,227	-3,925
1,25	4,683	4,122	2,505	0,056	-2,775
1,50	4,099	3,716	2,671	1,267	0,000
1,75	4,355	4,172	3,701	3,151	2,775
1,95	5,081	4,992	4,751	4,398	3,876

В таблице 3 представленные, вычисленные по (16), значения скорости $u_z(r,t)$ при $A^* = 0{,}005$ м; $\omega = 78{,}5$ с$^{-1}$; $\upsilon_П = 0{,}0025$ м/с.

Увеличивая частоту ω, здесь уменьшили амплитуду колебаний A^*, чтоб сохранить $A^* \cdot \omega$ таким, как в предыдущем случае. Поэтому числа в последних колонках таблиц 2 и 3 совпадают. Но такого совпадения нет при других r. С увеличением ω повысилась интенсивность затухания вибрационного поля с удалением от поверхности виброрешета. При $\xi = 0$ в таблице 3 амплитуды колебаний скорости $u_z(r,t)$, меньше, чем в таблице 2.

Таблица 3

Значения $10u_z(r,t)$ в м/с при различных r и t

$\frac{\omega t}{\pi}$	$10u_1(r)$, м/с; $\omega = 78{,}5$ с$^{-1}$				
	$\xi h^{-1} = 0$	$\xi h^{-1} = 0{,}25$	$\xi h^{-1} = 0{,}5$	$\xi h^{-1} = 0{,}75$	$\xi h^{-1} = 1$
0,00	5,028	4,916	4,644	4,336	3,925
0,25	5,758	5,668	5,351	4,588	2,775
0,50	6,355	6,138	5,352	3,567	0,000
0,75	6,472	6,050	4,646	1,872	-2,775
1,00	6,039	5,457	3,647	0,495	-3,925
1,25	5,311	4,705	2,940	0,243	-2,775
1,50	4,713	4,235	2,941	1,264	0,000
1,75	4,596	4,323	3,645	2,960	2,775
1,95	4,907	4,771	4,450	4,133	3,876

О влиянии эффективной вибровязкости на распространение вибраций позволяют судить графики рисунке 2. Они рассчитаны при $A^* = 0,005$ м; $\omega = 78,5$ с$^{-1}$; $\upsilon_П = 0,0025$ м/с; $\xi h^{-1} = 0,25$ для трех значений $\mu = \rho\nu = 0,4;0,6;0,8$ Па·с.

С увеличением $\rho\nu$ возрастают амплитуды колебаний и уменьшаются средние значения скорости движения, относительно которых происходят эти колебания.

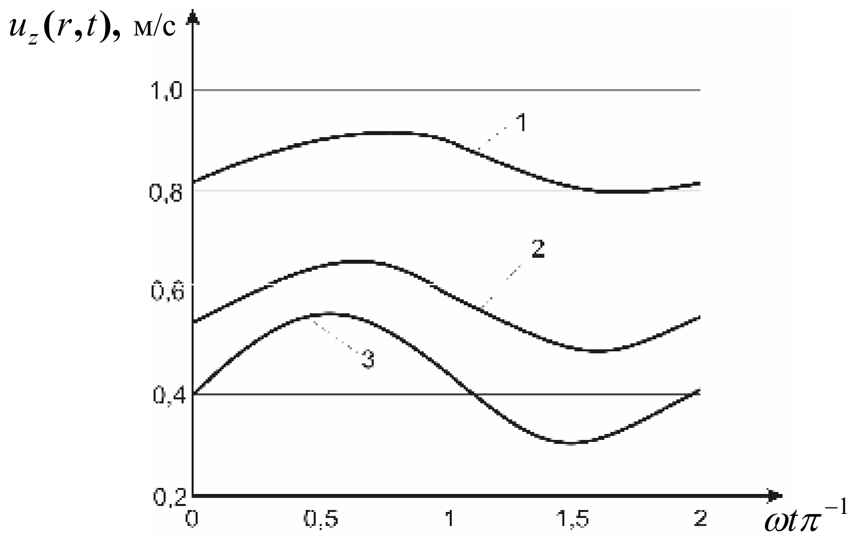

Рис. 2. Значения $u_z(r,t)$: 1,2,3 – $\rho\nu = 0,4$; 0,6; 0,8 Па·с

Таким образом, изложенная упрощенная теория позволяет рассчитывать вибрационное поле в сепарируемой зерновой смеси цилиндрическим виброрешетом с учетом разделения ее на проходовую и сходовую фракции без применения специальных функций.

Литература: 1. Моделирование процессов зерновых сепараторов / Л.Н. Тищенко, Д.И. Мазоренко, М.В. Пивень, С.А. Харченко, В.В. Бредихин, А.В. Мандрыка. – Харьков: Міськдрук, 2010. – 360 с. 2. Тищенко Л.Н. О колебаниях скорости потока зерна на решете виброцентробежного сепаратора / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Механізація сільськогосподарського виробництва та переробки сільськогосподарської продукції: Вісник ХНТУСГ. – Харків: ХНТУСГ, 2010. – Вип. 103. – С. 95-104. 3. Ольшанский В.П. Колебания скорости потока сепарируемой зерновой смеси на цилиндрическом виброрешете / В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Динаміка і міцність машин: Вісник НТУ «ХПІ». – Харків: НТУ, 2010. – Вип. 69. – С. 100-108. 4. Тищенко Л.Н. Кинетика сепарируемых зерновых смесей в вертикальных цилиндрических виброрешетах / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – 2011. – № 1(61). – С. 177-181. 5. Тищенко Л.Н. К расчету движения зерновой смеси по вертикальному цилиндрическому решету вибросепаратора / Л.Н. Тищенко, В.П. Ольшанский, С.В. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – 2009. – № 2(54). – С. 50-55. 6. Тищенко Л.Н. Сравнение двух способов определения коэффициента вибровязкости псевдоожиженной зерновой смеси при виброцентробежном сепарировании / Л.Н. Тищенко, Ф.М. Абдуева, В.П. Ольшанский // Вібрації в техніці та технологіях. – 2008. – № 1(50). – С. 96-100. 7. Градштейн И.С. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.С. Градштейн, И.М. Рыжик. – М.: Наука, 1962. – 1100 с.

Bibliography (transliterated): 1. Modelirovanie processov zernovyh separatorov / L.N. Tiwenko, D.I. Mazorenko, M.V. Piven', S.A. Harchenko, V.V. Bredihin, A.V. Mandryka. – Har'kov: Mis'kdruk, 2010. – 360 s. 2. Tiwenko L.N. O kolebanijah skorosti potoka zer-na na reshete vibrocentrobezhnogo separatora / L.N. Tiwenko, V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij // Mehanizacija sil's'kogospodars'kogo virobnictva ta pererobki sil's'kogospodars'koї produkcії: Visnik HNTUSG. – Harkiv: HNTUSG, 2010. – Vip. 103. – S. 95-104. 3. Ol'shanskij V.P. Kolebanija skorosti potoka separiruemoj zerno-voj smesi na cilindricheskom vibroreshete / V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij // Dinamika i micnist' mashin: Visnik NTU «HPI». – Harkiv: NTU, 2010. – Vip. 69. – S. 100-108. 4. Tiwenko L.N. Kinetika separiruemyh zernovyh smesej v vertikal'nyh cilindricheskih vibroreshetah / L.N. Tiwenko, V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij // Vibracії v tehnici ta tehnologijah. – 2011. – № 1(61). – S. 177-181. 5. Tiwenko L.N. K raschetu dvizhenija zernovoj smesi po vertikal'nomu cilindricheskomu reshetu vibrose-paratora / L.N. Tiwenko, V.P. Ol'shanskij, S.V. Ol'shanskij // Vibracії v tehnici ta tehnologijah. – 2009. – № 2(54). – S. 50-55. 6. Tiwenko L.N. Sravnenie dvuh sposobov opredelenija kojefficienta vibrovjazkosti psevdoozhizhennoj zernovoj smesi pri vib-rocentrobezhnom separirovanii / L.N. Tiwenko, F.M. Abdueva, V.P. Ol'shanskij // Vibracії v tehnici ta tehnologijah. – 2008. – № 1(50). – S. 96-100. 7. Gradshtejn I.S. Tab-licy integralov, summ, rjadov i proizvedenij / I.S. Gradshtejn, I.M. Ryzhik. – M.: Nauka, 1962. – 1100 s.

Ольшанський В.П., Ольшанський С.В.

СПРОЩЕНИЙ РОЗРАХУНОК КОЛИВАНЬ ЗЕРНОВОЇ СУМІШІ, ЯКА СЕПАРУЄТЬСЯ ЦИЛІНДРИЧНИМ ВІБРОРЕШЕТОМ

В результаті спрощення диференціального оператора Лапласа в полярній системі координат, за допомогою елементарних функцій описано гармонічні коливання швидкості руху зернової суміші в циліндричному решеті за усталеного режиму його роботи. Показано розрахунками, що введене спрощення диференціального рівняння не призводить до суттєвих похибок у розв’язку граничної задачі гідродинаміки для вібророзрідженої зернової суміші.

OlshanskiiV.P., OlshanskiiS.V.

SIMPLIFIED CALCULATION OF GRAIN MIX VIBRATIONS THAT SEPARATING OF THE CYLINDRICAL VIBROSIEVE

As a result of simplification of the differential Laplace operator in polar coordinate system using elementary functions described harmonic vibration velocity of grain mixtures in cylindrical sieve for its steady-state operation. Calculations show that the simplification introduced a differential equation does not lead to significant errors in the hydrodynamics of the boundary problem for vibroroliquefaction grain mixture.

УДК 618.514.01:517.977.5

Радиевский А. Е., канд. техн. наук

ВЫНУЖДЕННОЕ ДВИЖЕНИЕ ГАРМОНИЧЕСКОГО ОСЦИЛЛЯТОРА

Введение. Развитие механики тесно связано с изучением маятника и маятниковых систем. Ни одной механической системе не было уделено столько внимания как маятнику [1]. Маятник и маятниковые системы постоянно привлекали к себе внимание исследователей в различных областях математики, механики, физики и техники. В силу своей простоты маятник служил хорошей моделью для изучения сложных динамических процессов [2], что позволяло проводить экспериментальную проверку различных