



Тищенко Л. Н.

Пивень М. В.

Харьковский
национальный
технический
университет
сельского хозяйства
имени Петра Василенко

Tishchenko L. N.

Piven M. V.

Kharkiv Petro Vasylenko
National Technical
University of Agriculture

УДК 621.928.13

ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВНУТРИСЛОЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ СЕПАРИРУЕМОЙ ВИБРАЦИОННЫМ РЕШЕТОМ

В статье представлены результаты исследований скоростей внутрислоевого движения частиц зерновой смеси сепарируемой плоским вибрационным решето. Исследовано влияние кинематических параметров решета, удельной загрузки, глубины слоя, конструктивных параметров разрыхлителей на скорость движения частиц внутри слоя зерновой смеси.

Ключевые слова: вибрация, решето, зерновая смесь, разрыхлители, сепаратор.

Вступление. Процесс сепарирования зерновой смеси (ЗС) на решете состоит из двух основных этапов: сегрегации – продвижения мелких частиц сквозь слой к решету и просеивания – прохождения частиц через его отверстия. Следовательно, количество просеявшихся частиц определяется числом выделившихся из слоя и поступивших на решето. При сепарировании ЗС толстым слоем, в режимах высоких удельных загрузок, эффективность процесса будет зависеть преимущественно от интенсивности сегрегации. При решетном сепарировании интенсивность сегрегации оценивают скоростью продвижения мелких частиц внутри слоя к поверхности решета. Таким образом, исследование скоростей внутрислоевого движения частиц ЗС является актуальной задачей в изучении процесса сепарирования и интенсификации сегрегации.

Анализ исследований и публикаций. Исследованию внутрислоевого движения частиц ЗС посвящены работы П.М. Заики, И.И. Блехмана [1,2]. В этих работах исследовалось погружение-всплытие шаровых тел в ЗС подверженной вибрированию. Обоснованы границы разделяемости компонентов смеси по удельному весу и размерам, установлены оптимальные для сегрегации семян кинематические режимы виброоживления смеси.

Экспериментальными исследованиями О.Б. Юшкова, А.Н. Куди [3] установлено, что преобладающее влияние на процесс

сегрегации оказывает механизм гидромеханического разделения и миграции. Для управления сегрегацией по размеру частиц необходимо воздействовать на среду путем изменения скорости сдвига.

В.В. Гортинский [4], исследуя вертикальное перемещение проходовой частицы через поры нижележащих слоев установил, что максимальная эффективность сегрегации достигается при кинематическом режиме, обеспечивающем послыное движение во всем сыпучем теле.

Я.И. Лейкиным, М.А. Идиным [5] установлено, что эффективное протекание сегрегации имеет место в весьма узком диапазоне частот колебаний.

Кинематические параметры вибрационного решета, оптимальные для сегрегации, не являются таковыми для просеивания частиц сквозь отверстия. Задача интенсификации сегрегации при кинематическом режиме оптимальном для просеивания в литературе не рассматривалась.

Цель исследований – исследовать возможность интенсификации сегрегации при оптимальном для просеивания кинематическом режиме работы решета.

Изложение основного материала. Наиболее рационально интенсифицировать сегрегацию применением разрыхлителей ЗС. Они сообщают дополнительные воздействия в смесь, разрыхляют ее и не препятствуют прохождению зерен сквозь отверстия решета.



Однако, предлагаемые различными авторами разрыхлители имеют недостатки: сложную конструкцию, повышенную металлоемкость, снижают срок службы решет, хаотически перемешивают ЗС. Исследования сегрегации ЗС с разрыхлителями в литературе отсутствуют.

Лабораторией послеуборочной обработки зерна ХНТУСХ им. Петра Василенко предложены новые конструкции разрыхлителей, в виде наваренных металлических ребер или выштампованных продолговатых рифлей на поперечных перемычках рабочей поверхности решета. При вибрациях решета, ребра и рифли сообщают дополнительные воздействия в ЗС, разрыхляют ее и увеличивают скорость послыного движения. Конструктивными параметрами разрыхлителей являются: диаметр ребер и высота рифлей $d_{реб} = h_{риф} = 1,3$ мм, расстояние между ребрами и рядами рифлей $l_{реб} = l_{риф} = 21$ мм, расстояние между рифлями в ряду $l^* = 16$ мм, ширина рифля $b_{риф} = 1,5 \dots 2$ мм и длина $a_{риф} = 3 \dots 4$ мм.

Для описания динамики внутрислоевых процессов использована теория быстрых движений гранулированных сред. Математическая модель внутрислоевых процессов на рабочей поверхности плоского вибрационного решета получена в работе [6]. Уравнения описывающие движение ЗС имеют вид:

на свободной поверхности слоя

$$\frac{\partial v}{\partial y} = 0, \quad \frac{\partial v_1}{\partial y} = 0, \quad (3)$$

на поверхности серийного решета

$$\left| \vec{n} \cdot \mathbf{F}^{(1)} \right|_{\tau} = f_{ск} \left| \vec{n} \cdot \mathbf{F}^{(1)} \cdot \vec{n} \right|,$$

на поверхности оребренного решета

$$\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \left(1 - \frac{d_{реб}}{l_{реб}} \right) f_{ск} \alpha \psi \left(\frac{\partial v_1}{\partial y} \right)^2 + \frac{d_{реб}}{l_{реб}} \frac{C_d \gamma_1 v_1}{2h^2} \left(\int_0^h v dy \right)^2 = 0, \quad (4)$$

на поверхности рифленого решета

$$\mu \frac{\partial v}{\partial y} + \left(1 - \frac{8h_{риф}^2}{l_{риф} \cdot l^*} \right) f_{ск} \alpha \psi \left(\frac{\partial v_1}{\partial y} \right)^2 + \frac{\pi h_{риф}^2}{l_{риф} \cdot l^*} \frac{C_d \gamma_1 v_1}{2h^2} \left(\int_0^h v dy \right)^2 = 0, \quad (5)$$

где: \vec{n} – нормаль к поверхности решета, $\mathbf{F}^{(1)}$ – тензор

напряжений, $f_{ск} = f_{0ск} \left(1 + e^{-(B+\zeta G)} \right) / 2$ – коэффициент внешнего трения скольжения зерна по решету, $f_{0ск}$ – коэффициент внешнего

$$\frac{d}{dy} \left[\alpha \psi \left(\frac{dv_1}{dy} \right)^2 \right] - \gamma_1 g \cos \theta v_1 = 0, \quad (1)$$

$$\frac{d}{dy} \left[\mu \left(\frac{dv}{dy} \right) \right] + \gamma_1 g \sin \theta v_1 = 0, \quad (2)$$

где: y – нормальная координата, направленная от свободной поверхности слоя к решету, α – феноменологический коэффициент,

$$\psi = \Phi + 2; \quad \Phi = \left[\left(1 + f^2 \right)^{1/2} / f - 1 \right];$$

$f = f_0 \left(1 + e^{-B} \right) / 2$, f – динамический коэффициент внутреннего трения, f_0 – коэффициент внутреннего трения при

отсутствии вибрации, $B = r_{колB} \omega_{кол}^2 / g$,

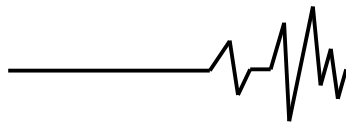
$r_{колB} = r_{кол} \sin(\beta + \theta)$, $\omega_{кол}$ – частота колебаний решета, g – ускорение свободного падения, $r_{кол}$ – радиус кривошипа вибровозбудителя (амплитуда колебаний), β – угол направления колебаний, θ – угол наклона решета к горизонту, v_1 – объемная плотность ЗС, $v_1 = 1 - \varepsilon$, ε – пористость ЗС, μ – динамический коэффициент вязкости, v – скорость ЗС, γ_1 – плотность частиц несущего потока.

Уравнения (1), (2) дополняются граничными условиями:

трения скольжения в отсутствии вибрации, ζ – эмпирический коэффициент,

$$G = r_{колG} \omega_{кол}^2 / g, \quad r_{колG} = r_{кол} \cos(\beta + \theta),$$

C_d – безразмерный коэффициент сопротивления ребер и рифлей движению смеси, h – толщина слоя смеси.



При решетном сепарировании интенсивность сегрегации оценивают скоростью продвижения мелких частиц из слоя к решетку. Уравнения, определяющие

нормальную u и продольную w составляющие относительной скорости мелкой частицы в слое ЗС, имеют вид:

$$u(t, x, y) = \frac{Cg \cos \theta}{A} \left[1 - e^{-Ax/v} - Hev(x - vt) \left(e^{-At} - e^{-Ax/v} \right) \right], \quad (6)$$

$$w(t, x, y) = \frac{Cg \sin \theta}{A} \left(1 - e^{-\frac{Ax}{v}} \right) - \frac{Cg \cos \theta}{A} \frac{dv}{dy} \times \left[\left(\frac{x}{v} + \frac{1}{A} \right) e^{-\frac{Ax}{v}} - \frac{1}{A} \right] - Hev(x - vt) \times \left\{ \begin{aligned} & \left[\frac{Cg \sin \theta}{A} \left(e^{-At} - e^{-\frac{Ax}{v}} \right) + \frac{Cg \cos \theta}{A} \frac{dv}{dy} \right] \times \\ & \left[te^{-\frac{Ax}{v}} + \frac{e^{-At} - e^{-\frac{Ax}{v}}}{A} - \frac{x}{v} e^{-\frac{Ax}{v}} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где: t -время, x – продольная координата, направленная вдоль решета в сторону движения материала, $C = 1 - \gamma_1 v_1 / \gamma_2$,

$$A = \frac{3K_\mu \mu v_1}{4\pi a_{\text{част}}^2 \gamma_2}, \quad K_\mu - \text{эмпирический}$$

коэффициент сопротивления движению частицы, $a_{\text{част}}$ - эквивалентный радиус мелкой частицы, γ_2 -плотность мелких частиц,

$$Hev(\xi) = \begin{cases} 0, npi & (\xi < 0) \\ 1, npi & (\xi > 0) \end{cases} - \text{функция Хевисайда.}$$

Исследуем нормальную u и продольную w составляющие скорости мелкой частицы относительно слоя ЗС. Для проведения численных расчетов примем следующие значения кинематических параметров, рекомендуемых в работе [7]: амплитуда колебаний решета $r_{\text{кол}}=0,0075$ м; круговая частота колебаний решета $\omega_{\text{кол}}=52,33$ рад/с; угол наклона решета к горизонту $\theta=8^\circ$; угол направленности колебаний $\beta=-8^\circ$; длина решета $L=0,79$ м; удельная загрузка решета $q=60...90$ кг/час·дм². Для ЗС взяты следующие значения физико-механических свойств пшеницы: коэффициент внешнего трения скольжения по решету $f_{\text{ск}}=0,43$; коэффициент внутреннего трения $f_0=0,47$; плотность частиц ЗС $\gamma_1=1350$ кг/м³. Численные значения эмпирических коэффициентов приняты: $\alpha=3,38$ кг·м/с²; $C_\sigma=1,29$; $\mu=0,033...0,122$ Па·с. Значения физико-механических свойств проходовых частиц варьировались в пределах: плотность

$\gamma_2=900...1100$ кг/м³; эквивалентный радиус частицы $a_{\text{част}}=0,5...0,75$ мм; коэффициент сопротивления движению частицы $K_\mu=390...520$. Конструктивные параметры ребер и рифлей оцениваются соотношением $d_{\text{реб}}/l_{\text{реб}}$, $h_{\text{риф}}/l_{\text{риф}}$. С увеличением данных соотношений диаметр ребер $d_{\text{реб}}$ и высота рифлей $h_{\text{риф}}$ возрастают, а расстояния между ними $l_{\text{реб}}$, $l_{\text{риф}}$ уменьшаются.

На рис. 1-4 представлены зависимости нормальной u и продольной w составляющих относительной скорости мелкой частицы в слое ЗС от глубины, кинематических параметров решета, его удельной загрузки, конструктивных параметров ребер и рифлей. Глубина слоя определяется безразмерной величиной y^* , равной отношению расстояния между свободной поверхностью слоя и рассматриваемым элементарным слоем к общей толщине слоя. Так, свободной поверхности слоя соответствует $y^*=0$, а поверхности решета $y^*=1$.

Нормальная составляющая u скорости определяет быстроту продвижения мелкой частицы к решету и характеризует интенсивность сегрегации. На рис. 1,2 видно, что составляющая u снижается незначительно с глубиной, что объясняется уменьшением пористости смеси. Продольная составляющая w – мало изменяется с глубиной и ее численные значения значительно меньше. При увеличении круговой частоты колебаний $\omega_{\text{кол}}$ и угла наклона решета θ в диапазоне оптимальных для просеивания значений составляющие скорости незначительно возрастают (рис. 1).

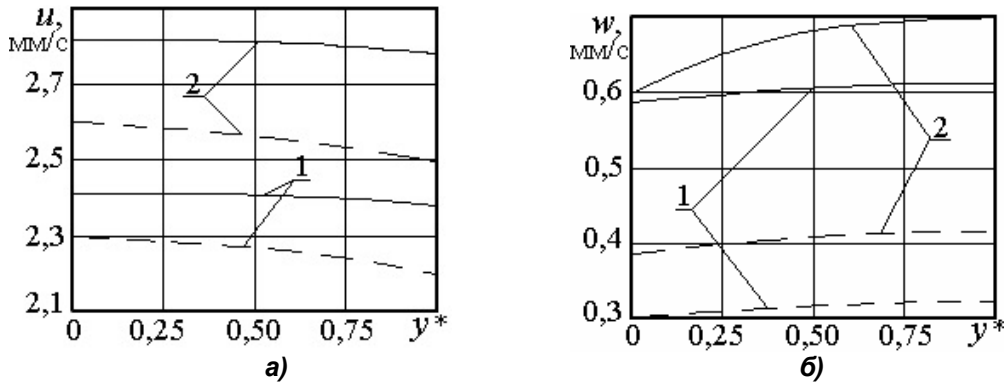


Рис. 1. Зависимости скорости частицы от глубины слоя y^* , круговой частоты колебаний $\omega_{кол}$ и угла наклона решета к горизонту θ :
**а) – зависимость $u(y^*)$; б) – $w(y^*)$; $q=60$ кг/час·дм²; - - - - - $\theta=8^\circ$, $\beta=-8^\circ$;
 ————— $\theta=14^\circ$, $\beta=-14^\circ$; 1 – $\omega_{кол}=41,86$ рад/с; 2 – $\omega_{кол}=52,33$ рад/с**

При увеличении угла направленности колебаний решета β (рис. 2), конструктивных параметров ребер и рифлей (рис. 3, 4) составляющие u и w скорости частицы увеличиваются, что объясняется интенсивным

разрыхлением ЗС, приводящем к уменьшению сил сопротивления относительно движению и быстрому заполнению пор мелкими частицами.

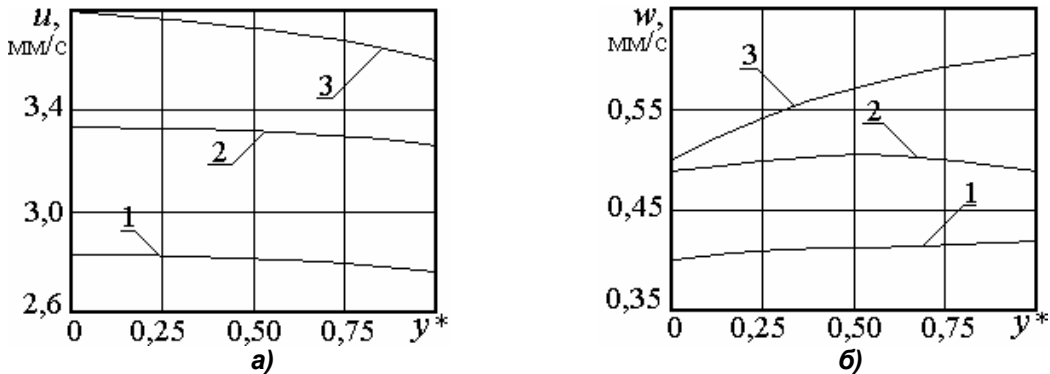
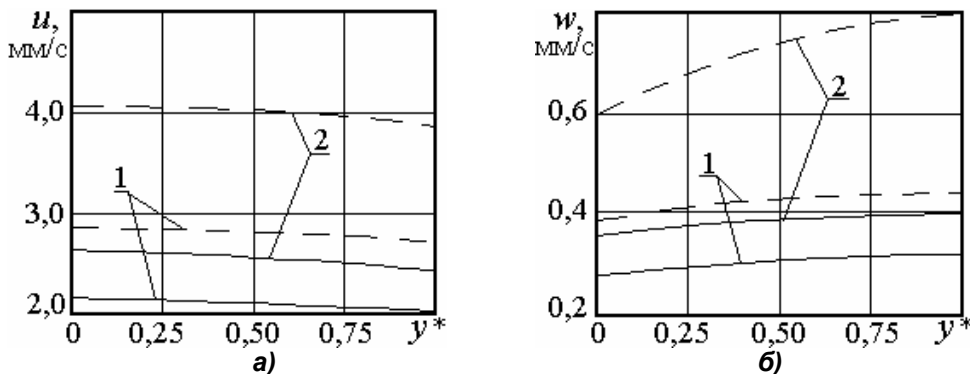
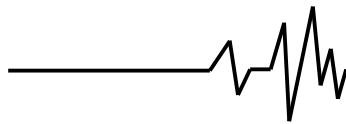


Рис. 2. Зависимости составляющих скорости частицы от глубины слоя y^* и угла направленности колебаний β плоского решета: а) – зависимость $u(y^*)$; б) – $w(y^*)$; 1 – $\beta=-8^\circ$; 2 – $\beta=0^\circ$; 3 – $\beta=+10^\circ$; $\omega_{кол}=52,33$ рад/с; $\theta=8^\circ$; $q=60$ кг/час·дм²



**Рис. 3. Зависимости составляющих скорости частицы от глубины слоя y^* , удельной загрузки и конструктивных параметров ребер: а) – $u(y^*)$; б) – $w(y^*)$; 1 – серийное решето; 2 – $d_{реб}/l_{реб}=0,06$; $\omega_{кол}=52,33$ рад/с; $\theta=8^\circ$; $\beta=-8^\circ$
 - - - - - $q=60$ кг/час·дм²; ————— $q=90$ кг/час·дм²**



При сепарировании на решетках с продолговатыми отверстиями угол направленности колебаний совпадает с

наклоном решета, поэтому интенсифицировать сегрегацию возможно только с помощью разрыхлителей.

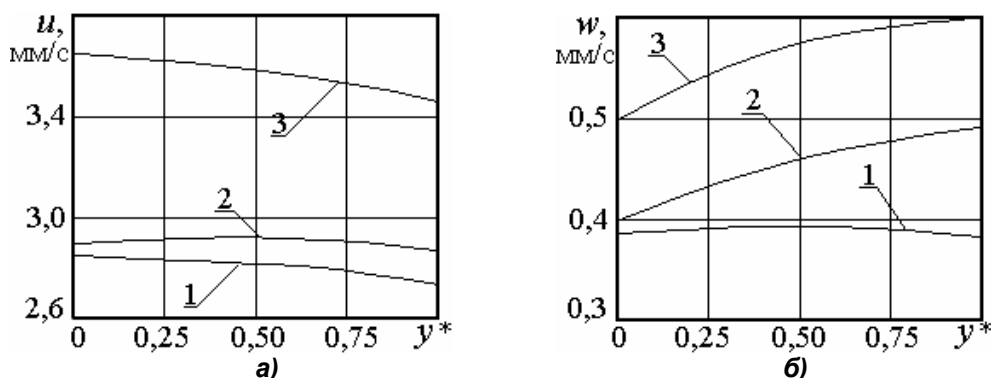


Рис. 4. Зависимости составляющих скорости частицы от глубины слоя y^* и конструктивных параметров рифлей: а) – $u(y^*)$; б) – $w(y^*)$; 1 - серийное решето; 2 - $h_{риф}/l_{риф}=0,03$, $l^*=30$ мм; 3 - $h_{риф}/l_{риф}=0,06$, $l^*=16$ мм; $\omega_{коп}=52,33$ рад/с; $\theta=8^\circ$; $\beta=-8^\circ$; $q=60$ кг/час·дм²

Увеличение удельной загрузки решета q приводит к уменьшению составляющих u и w скорости частицы, вследствие уплотнения смеси вышележащими слоями, что создает стесненные условия для продвижения частиц (рис. 3).

При оптимальном для просеивания семян кинематическом режиме значения нормальной u составляющей скорости относительного движения частицы в слое ЗС составляют $u=2,3...2,8$ мм/с. При наличии разрыхлителей в виде ребер и рифлей нормальная составляющей скорости возрастает до $u=3,6...4,0$ мм/с, что подтверждает возможность интенсификации сегрегации с помощью разрыхлителей ЗС.

Вывод

Установлена возможность интенсификации сегрегации, при оптимальном для просеивания кинематическом режиме работы, путем размещения на рабочей поверхности решета разрыхлителей ЗС в виде ребер и рифлей. Нормальная составляющая скорости относительного движения частицы в слое ЗС возросла с $2,3...2,8$ мм/с до $3,6...4,0$ мм/с.

Список использованных источников

1. Заика П.М. Вибрационное перемещение твердых и сыпучих тел в сельскохозяйственных машинах [Текст] / П.М.Заика. – К.: УСХА, 1998. – 625 с.
2. Блехман И.И. Что может вибрация [Текст] / И.И.Блехман. – М.: Наука, 1988. – 208 с.

3. Юшкова О.Б. Влияние свойств частиц зернистой среды на эффекты их взаимодействия при быстром сдвиговом течении [Текст] / О.Б.Юшкова, А.Н.Куди // Технологические процессы и оборудование. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2001. – №8. – С. 39–45.

4. Гортинский В.В. Процессы сепарирования на зерноперерабатывающих предприятиях [Текст] / В.В.Гортинский, А.Б.Демский, М.А.Борискин. – М.: Колос, 1981. – 260 с.

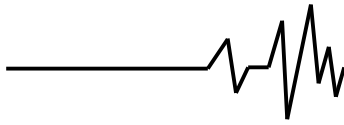
5. Идин М.А. К исследованию движения сыпучего тела на горизонтальной ситовой колеблющейся поверхности с анизотропным трением [Текст] / М.А.Идин, Я.И.Лейкин // Труды ВНИИЗ. – М.: ВНИИЗ, 1973. – Вып.78. – С. 91 – 98.

6. Тищенко Л.Н. Математическая модель процесса сегрегации зерновых смесей при сепарировании плоскими вибрационными решетками [Текст] / Л.Н.Тищенко, М.В.Пивень // Вісник ХНТУСГ.-Харків: ХНТУСГ. – 2010. – Вип.103. – С. 12–19.

7. Кожуховский И.Е. Научные основы и методы расчета и проектирования зерноочистительных машин: Автореф. дис. ...докт. техн. наук: 05.04.10 [Текст] / И.Е. Кожуховский. – М., 1970. – 34 с.

Список источников в транслитерации

1. Zaika P.M. Vibratsionnoe peremeschenie tverdyh i syipuchih tel v selskohozyaystvennyh mashinah [Tekst] /



P.M.Zaika. – K.: USHA, 1998. – 625 s.

2. Blehman I.I. Chto mozhet vibratsiya [Tekst] / I.I.Blehman. – M.: Nauka, 1988. – 208 s.

3. Yushkova O.B. Vliyanie svoystv chastits zernistoy sredy na efekty ih vzaimodeystviya pri bystrom sdvigovom techenii [Tekst] / O.B.Yushkova, A.N.Kudi // Tehnologicheskie protsessy i oborudovanie. – Tambov: Tambovskiy gosudarstvenniy tehnichestkiy universitet, 2001. – №8. – S. 39–45.

4. Gortinskiy V.V. Protsessy separirovaniya na zernopererabatyivayuschih predpriyatiyah [Tekst] / V.V.Gortinskiy, A.B.Demskiy, M.A.Boriskin. – M.: Kolos, 1981. – 260 s.

5. Idin M.A. K issledovaniyu dvizheniya syipuchego tela na gorizontальной sitovoy koleblyuscheysya poverhnosti s anizotropnym treniem [Tekst] / M.A.Idin, Ya.I.Leykin // Trudy VNIIZ. – M.: VNIIZ, 1973. – Vyp.78. – S. 91 – 98.

6. Tischenko L.N. Matematicheskaya model protsessa segregatsii zernovyih smesey pri separirovanii ploskimi vibratsionnyimi reshetami [Tekst] / L.N.Tischenko, M.V.Piven // VIsnik HNTUSG. – Harklv: HNTUSG. – 2010. – Vip.103. – S. 12–19.

7. Kozhuhovskiy I.E. Nauchnyie osnovy i metodyi rascheta i proektirovaniya zernoochistitelnyih mashin: Avtoref. dis. ...dokt. tehn. nauk: 05.04.10 [Tekst] / I.E. Kozhuhovskiy. – M., 1970. – 34 s.

ИССЛЕДОВАНИЯ СКОРОСТЕЙ ВНУТРИСЛОЕВОГО ДВИЖЕНИЯ ЧАСТИЦ ЗЕРНОВОЙ СМЕСИ СЕПАРИРУЕМОЙ ВИБРАЦИОННЫМ РЕШЕТОМ

Анотація. В статті представлені результати досліджень швидкостей внутрислоевого движения частиц зерновой смеси сепарируемой плоским вибрационным решето. Исследовано влияние кинематических параметров решета, удельной загрузки, глубины слоя, конструктивных параметров разрыхлителей на скорость движения частиц внутри слоя зерновой смеси.

Ключевые слова: *вибрация, решето, зерновая смесь, разрыхлители, сепаратор.*

STUDIES OF INTERLAYER MOTION SPEEDS OF THE GRAIN MIXTURE PARTICLES SEPARATED BY VIBRATING SIEVE

Annotation. The article presents the results of research of interlayer motion speeds of the grain mixture particles separated by flat vibrating sieve. The dependencies of the interlayer motion speeds of the grain mixture particles from cinematic parameters of flat vibrating sieves, specific loading, depth of layer, constructional parameters of looseners, have been established.

Key words: *vibration, sieve, grain mixtures, looseners, separator.*