



DOI: 10.26898/0370-8799-2017-5-9

УДК 631.362.33

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОДАЧИ ЗЕРНА ПРИ СЕПАРАЦИИ ПЛАНЕТАРНЫМ ЦИЛИНДРИЧЕСКИМ РЕШЕТОМ С КРУГЛЫМИ ОТВЕРСТИЯМИ

Н.М. ИВАНОВ¹, доктор технических наук, руководитель,
И.Я. ФЕДОРЕНКО², доктор технических наук, заведующий кафедрой,
С.Е. ЗАХАРОВ¹, научный сотрудник,
А.А. СУХОПАРОВ¹, кандидат технических наук, старший научный сотрудник

¹Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации
сельского хозяйства СФНЦА РАН

630501, Россия, Новосибирская область, пос. Краснообск

e-mail: sibime@ngs.ru

²Алтайский государственный аграрный университет

656049, Россия, г. Барнаул, пр-т Красноармский, 98

e-mail: ijfedorenko@mail.ru

Разработана математическая модель движения зерновых частиц по цилиндрическому решету, совершающему планетарное вращение, при просеивании их в отверстие. Получены дифференциальные уравнения движения зерновой частицы в отверстие решета с учетом конструктивно-режимных параметров решета, скорости перемещения частицы по сепарирующей поверхности. Определены условия прохождения зерновой частицы в отверстие решета с учетом ее максимального положения над поверхностью решета. Выявлены основные зависимости прохождения длинных частиц в круглые отверстия от конструктивных, кинематических и технологических параметров процесса сепарации на цилиндрических планетарных решетах. Максимальная подача зерна при сепарации зерновок сквозь одно отверстие достигается при 450 оборотах решета. Определен характер изменения скорости при перемещении зерновки над отверстием. С увеличением общего давления зерна на поверхность решета (с учетом параметров вращения) до $8 \text{ кг} / (\text{м} \cdot \text{с}^2)$ подача зерна увеличивается от 0,15 до 8,5 кг/ч.

Ключевые слова: зерновая частица, центробежное решето, сепарация, математическая модель, движение по решету, планетарное вращение.

Эффективность послеуборочной обработки зерна в значительной степени определяется показателями машин предварительной очистки. Особенность предварительной очистки – высокая интенсивность технологического процесса и изменчивость технологических свойств обрабатываемого зернового вороха. Один из эффективных способов очистки зернового вороха – применение сложных инерционно-гравитационных силовых полей, реализованных в горизонтальных цилиндрических решетах, совершающих планетарное вращение. Для просеивания мелких частиц при сепарации зерна частица должна контактировать с поверхностью решета, находиться над

отверстием, занять относительно его строго определенное положение, чтобы попасть в данное отверстие. Размер частиц должен быть меньше рабочего размера отверстия, а время нахождения частицы над отверстием – достаточным для выделения в него. Интенсификация выполнения перечисленных условий, необходимых для протекания процесса сепарации, является актуальной задачей [1–3].

Для уменьшения времени прохода зерна сквозь отверстия сепарирующей поверхности и, следовательно, увеличения производительности решета, возникла необходимость получить законы относительного движения зерновых частиц в отверстие решета, совер-

шающего планетарное вращение, в зависимости от его физико-механических свойств и конструктивно-кинематических параметров центробежного сепаратора.

Цель работы – разработать математическую модель движения зерновых частиц в отверстие решета при сепарировании на цилиндрических решетках с горизонтальной осью, совершающих планетарное вращение.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

При разработке математической модели движения зерна по решетку и просеивания проходовых частиц через отверстия решета используем модель движения отдельной частицы сферической формы с постоянной относительной скоростью по поверхности решета.

При разработке модели приняты допущения:

- мелкие фракции вороха – частицы сферической формы с эквивалентным диаметром;
- решето – абсолютно жесткое тело с шероховатой рабочей поверхностью совершает планетарное движение вокруг горизонтальной оси;
- размер и форма отверстий на решетке одинаковые;
- сопротивление среды пропорционально скорости ($f(V) = kV$);
- величина общей центробежной силы $F_{ц}$ принята постоянной – $F_{ц} = \text{const}$ [4–6].

Расчетная схема представлена на рис. 1 [2].

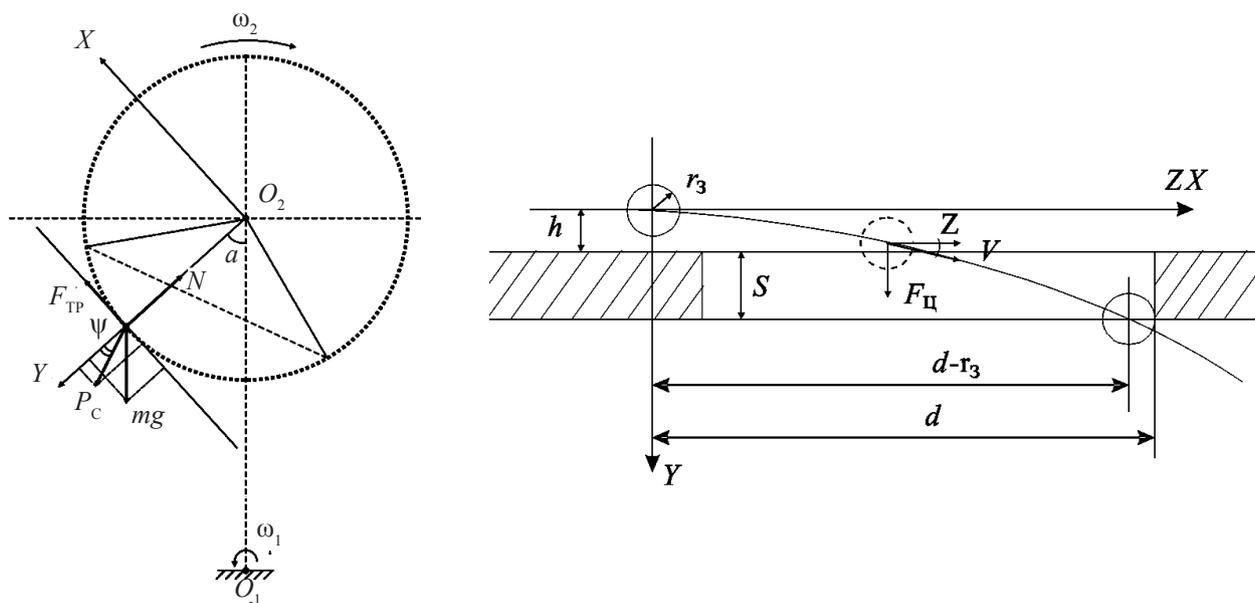


Рис. 1. Расчетная схема движения по решетку и прохождения сферической частицы через отверстие решета

При переходе центра тяжести частицы за край перемычки возможны два варианта движения: безотрывное от перемычки соскальзывание в отверстие и полет частицы над отверстием. При полете всей частицы над отверстием она просеивается или ударяется о противоположный край отверстия. В связи с этим существенное значение имеет скорость прохождения зерновой частицы в отверстие решета [7, 8].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дифференциальные уравнения движения зерновой частицы в пределах отверстия имеют вид

$$\begin{cases} mz'' = -kV \cdot \cos \beta; \\ my'' = F_0 + kV \cdot \sin \beta, \end{cases} \quad (1)$$

где V – скорость частицы, м/с; β – угол, образуемый скоростью V и осью OZ .

Из уравнения (1) получим

$$\begin{cases} V \cdot \cos \beta = Z'; \\ V \cdot \sin \beta = y', \end{cases} \quad (2)$$

перепишем (1) с учетом (2)

$$\begin{cases} mz'' = -kz'; \\ my'' = F_0 + ky', \end{cases}$$

где

$$F_0 = m(\omega_P - \omega_B)^2 (R_B + R_P \cdot \cos \varphi_P) - mg \cdot \cos \varphi_P;$$

$$\frac{d(mz'' + kz')}{dt} = 0; \tag{3}$$

$$\frac{d(my'' + ky')}{dt} = F_0 = m \left[(\omega_P - \omega_B)^2 (R_B + R_P \cdot \cos \varphi_P) - g \cdot \cos \varphi_P \right].$$

Примем $\left[(\omega_P - \omega_B)^2 (R_B + R_P \cdot \cos \varphi_P) - g \cdot \cos \varphi_P \right] = P$.

После интегрирования (с условием, что $F_0 = \text{const}$):

$$\begin{aligned} mz' + kz &= c'; \\ my' + ky &= mPt + c'', \end{aligned} \tag{4}$$

где c' и c'' – постоянные интегрирования.

Если в начале движения (в начале отверстия – исходное положение частицы) при $t = 0, z_0 = 0, y_0 = 0, z_0 = V_0 = V_z, y'_0 = 0$, тогда, подставив в (4)

$$\begin{cases} c' = mV_0; \\ c'' = 0, \end{cases} \tag{5}$$

с учетом (5) перепишем уравнение (4)

$$\begin{cases} mz' + kz = mV_0; \\ my' + ky = mPt. \end{cases} \tag{6}$$

Разделяя переменные в уравнении (6) с учетом (3) определим t :

$$dt = \frac{dz}{V_0 - k_0 z},$$

где $k_0 = \frac{k}{m}$. \tag{7}

После интегрирования уравнения (7)

$$t = -\frac{1}{k_0} \ln(V_0 - k_0 z) + c'_2, \tag{8}$$

где c'_2 – постоянная интегрирования.

Поскольку $t = 0, z_0 = 0$, тогда $c'_2 = \frac{1}{k_0} \ln V_0$. Уравнение (8) после преобразования примет вид

$$\begin{aligned} t &= \frac{1}{k_0} \ln \frac{V_0}{V_0 - k_0 z}, \\ \text{или } \frac{V_0}{V_0 - k_0 z} &= e^{k_0 t}, \\ \text{отсюда } z &= \frac{1}{k_0} \frac{V_0 (e^{k_0 t} - 1)}{e^{k_0 t}}. \end{aligned} \tag{9}$$

Запишем второе уравнение (6) $my' + ky = mPt$, поделим на m ($P^1 = mP$):

$$y' + k_0y = Pt$$

Это уравнение решим методом замены $y = uV$:

$$u'V + uV' + k_0uV = Pt \text{ при } P = \text{const};$$

$$V' + k_0V = 0;$$

$$\frac{dV}{dt} = -k_0V; V = e^{-k_0t}; u'e^{-k_0t} = Pt;$$

$$du = Pt \frac{1}{k_0} e^{k_0t} - \frac{P}{k_0} \int e^{k_0t} dt; \tag{10}$$

$$u = \frac{Pt}{k_0} e^{k_0t} - \frac{P}{k_0^2} e^{k_0t} + c_2''.$$

С учетом того, что $y = uV$, общее решение уравнения (10) имеет вид

$$y = \frac{Pt}{k_0} - \frac{P}{k_0^2} + c_2'' \cdot e^{-k_0t}, \tag{11}$$

где c_2'' – постоянная интегрирования при начальных условиях $t = 0, y_0 = 0$, тогда

$$c_2'' = \frac{P}{k_0^2}.$$

Подставим значение c_2'' в (11), получим

$$y = \frac{Pt}{k_0} - \frac{P}{k_0^2} + \frac{P}{k_0^2} e^{-k_0t}, \text{ или } y = \frac{P}{k_0} \left(t + \frac{1}{k_0} e^{-k_0t} \right) - \frac{P}{k_0^2}. \tag{12}$$

Уравнение траектории зерновки в декартовой системе координат OYZ получим, подставив значение t (8) в уравнение (12):

$$y = \frac{P}{k_0} \left[\frac{1}{k_0} \ln \frac{V_0}{V_0 - k_0z} - \frac{1}{k_0} e^{-k_0 \frac{1}{k_0} \ln \frac{V_0}{V_0 - k_0z}} \right] - \frac{P}{k_0^2} = \frac{P}{k_0} \left[\ln \frac{V_0}{V_0 - k_0z} - \frac{V_0 - k_0z V_0}{V_0} \right] - \frac{P}{k_0^2}. \tag{13}$$

Определим из рис. 1 $Z = d - r_3, Y = (h_{\min} = r_3)$ условие прохода зерновой частицы сквозь отверстие решета. Максимальную высоту положения зерновой частицы над поверхностью решета, когда она успеет пройти сквозь отверстие, определим из (13):

$$h_{\max} = \frac{\left[(\omega_P - \omega_B)^2 (R_B + R_P \cdot \cos \varphi_P) - g \cdot \cos \varphi_P \right]}{k_n} \left[\ln \frac{V_0}{V_n - k_n(d - r_2)} - \frac{V_{0Y} - k_0(d - r_3)}{V_{0Y}} \right] - \frac{\left[(\omega_P - \omega_B)^2 (R_B + R_P \cdot \cos \varphi_P) - g \cdot \cos \varphi_P \right]}{k_0^2} - S, \tag{14}$$

где S – толщина полотна решета; k_0 – коэффициент сопротивления среды – $k_0 = \frac{k}{m}$.

Скорость движения зерновой частицы при проходе сквозь отверстие решета запишем в виде

$$V = \sqrt{V_{ZX}^2 + V_Y^2} \text{ из (5) и (7) } V_Z = z' = \left(\frac{V_0}{k_0} - \frac{V_0}{k_0} e^{-k_0 t} \right)' = V_0 e^{-k_0 t},$$

где $V_Y = \omega_p R_p$, так как зерно перемещается по поверхности по спирали под углом α .
Тогда скорость в плоскости ZX

$$V_{XZ} = \sqrt{V_X^2 + V_Y^2} = \sqrt{V_0^2 e^{-2k_0 t} + (R_p \omega_p)^2};$$

$$V_Y = y' = \frac{P}{k_0} (1 - e^{-k_0 t}) = \frac{[(\omega_p - \omega_B)^2 (R_B + R_p \cdot \cos \varphi_p) - g \cdot \cos \varphi_p] (1 - e^{-k_0 t})}{k_0};$$

$$V = \sqrt{V_0^2 e^{-2k_0 t} + (R_p \omega_p)^2 + \frac{P^2}{k_0^2} (1 - e^{-k_0 t})^2} = \tag{15}$$

$$\sqrt{V_0^2 e^{-2k_0 t} + (R_p \omega_p)^2 + \frac{[(\omega_p - \omega_B)^2 (R_B + R_p \cdot \cos \varphi_p) - g \cdot \cos \varphi_p]^2 (1 - e^{-k_0 t})^2}{k_0^2}}.$$

Для определения характера изменения скорости при перемещении зерновки используем уравнение окружности $x^2 + y^2 = R^2$.

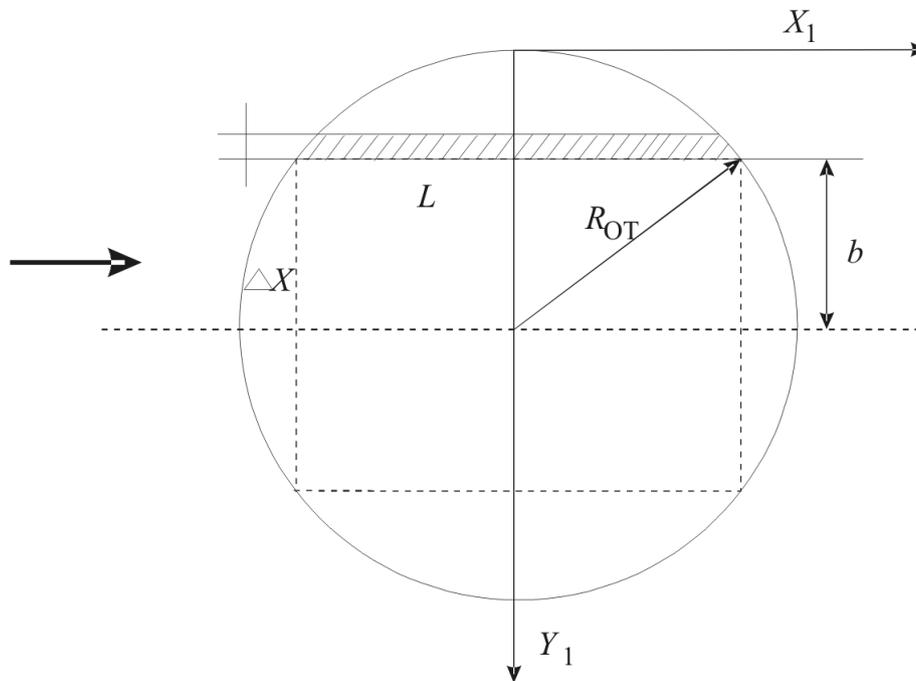


Рис. 2. Отверстие решета

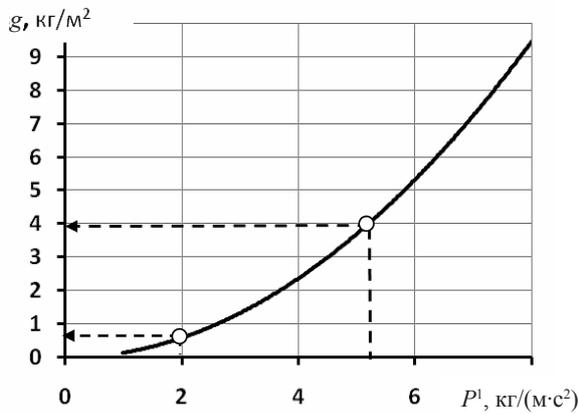


Рис. 3. Влияние давления зернового слоя на удельную просеваемость отверстия решета

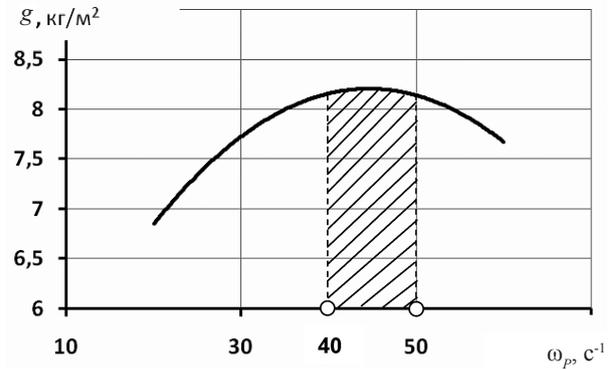


Рис. 4. Влияние частоты вращения решета на удельную просеваемость отверстия решета

Для прохождения зерновки в круглое отверстие при выделении крупных примесей необходимо учитывать ее положение над отверстием, длина которого (L) при различном положении поперечного сечения различна, т.е. переменна [9, 10]).

С учетом размеров зерновой частицы (r_3) начало и конец ее движения в отверстие будет происходить со смещением относительно границ отверстия.

Условный радиус отверстия запишем

$$R_Y = (R_{OT} - r_3) = \frac{d_{OTB} - d_3}{2},$$

где d_{OTB} – диаметр отверстия решета, м; d_3 – диаметр зерновой частицы, м.

Выделим малый участок отверстия решета $\Delta y = d$ и рассмотрим его движение вдоль оси OY_1 . Длину участка L получим

$$L = 2(R_{OT} - \Delta x),$$

где Δx – путь, пройденный частицей от начала отверстия до выбранного сечения. Выразим Δx через время t . С учетом того, что перемещение поверхности решета (его вращение) определяется выражением $\omega_p R_0 t$,

$$L = 2(R_{OT} - \Delta x) = 2(R_{OT} - \omega_p R_0 \frac{t}{2}). \tag{16}$$

Ширина сечения определится из выражения

$$b = \sqrt{R_Y^2 - L^2};$$

$$2b = \sqrt{4R_Y^2 - L^2} = \sqrt{4R_Y^2 - 4(R_Y - R_0 \frac{\omega_p t}{2})^2} = 2\sqrt{R_Y R_0 \omega_p t - R_0^2 \frac{\omega_p^2 t^2}{4}}.$$

Максимальное время (c) контакта частицы с отверстием

$$t = \frac{L}{V} = \frac{(d_{OTB} - d_3)}{R_0 t}$$

с учетом R_Y запишем

$$t = \frac{2(R_Y - R_0 \frac{\omega_p t}{2})}{R_0 \omega_p} = \frac{2R_Y}{R_0 \omega_p} - \frac{1}{2} = \frac{4R_Y}{3R_0 \omega_p}. \tag{17}$$

Подачу зерна при сепарации зерновок сквозь одно отверстие за время t получим из выражения

$$g_{OT} = \int_{t_0}^{t_1} h \cdot b \cdot \rho \cdot k_{II}, \tag{18}$$

где h – максимальная высота перемещения зерновой частицы по оси OY ; b – ширина сечения отверстия решета, м; ρ – удельная плотность (масса) зерна, кг/м³; k_{II} – коэффициент подачи (подпора) зерновых частиц на отверстие.

$$g_{от} = \int_{t_0}^{t_1} \left[2\sqrt{R_y R_0 \omega_p t - R_0^2 \frac{\omega_p^2 t^2}{4}} \cdot \left(\frac{P}{k_0} \left(\ln \frac{V_0}{V_0 - k_0(d - r_3)} - \frac{V_{0Y} - k_0(d - r_3)}{V_{0Y}} \right) \frac{P}{k_0^2} - S \right) \cdot \rho \cdot k_{II} \right] dt. \quad (19)$$

Определен характер изменения скорости при перемещении зерновки над отверстием. Из рис. 3 вытекает, что с увеличением общего давления зерна на поверхность решета (с учетом параметров вращения) до 8 кг/(м·с²) подача зерна увеличивается от 0,15 до 8,5 кг/ч. Следовательно, интенсивность сепарации по длине решета будет различная, достигая максимальных значений в начале решета, где наибольший зерновой слой.

Таким образом, система уравнений (14) – (19) описывает движение частицы зернового материала в отверстие решета, планетарно вращающейся вокруг горизонтальной оси с постоянной угловой скоростью ω_p . Эта система связывает конструктивные и кинематические параметры решета с физико-механическими свойствами зерна и может служить математической моделью при исследовании процесса центробежного сепарирования зерновых материалов и выборе оптимальных параметров сепараторов. Максимальная подача зерна при сепарации зерновок сквозь одно отверстие достигается при частоте вращения решета $\omega_p = 40\text{--}50 \text{ с}^{-1}$.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Чепурин Г.Е., Иванов Н.М.** Научно-техническое обеспечение аграрного комплекса Сибири // Сиб. вестн. с.-х. науки. – 2014. – № 5. – С. 93–100.
2. **Докин Б.Д., Иванов Н.М., Ёлкин О.В., Блынский Ю.Н., Мартынова В.Л.** Методические подходы к выбору технологий и технических средств при производстве зерна в условиях Сибири // Сиб. вестн. с.-х. науки. – 2016. – № 2. – С. 105–109.
3. **Иванов Н.М., Торопов В.Р., Сухопаров А. А.** Предварительная очистка зерна в цилиндрическом колосовом решете с винтовым распределителем: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Москва, 17–18 сентября 2013 г.). – М., 2013. – Ч. 2. – С. 86–88.

4. **Пат. № 2274500** (Российская Федерация) Центробежный решетный сепаратор / Н.М. Иванов, В.Р. Торопов, С.Е. Захаров; заявл. 04.06.2004; опубл. 20.04.2006.
5. **Дринча В.М.** Исследования вибросепараторов с плоскими цилиндрическими деками // Механизация и электрификация сел. хоз-ва. – 2001. – № 5. – С. 6–10.
6. **Торопов В.Р.** Исследование технологического процесса планетарного решетного сепаратора зерна с целью определения его параметров и режимов работы: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1974. – 157 с.
7. **Фетисов П.А.** Движение материальной частицы в цилиндре центробежной сортировки // Тр. Омского с.-х. ин-та. – 1968. – Т. 78. – С. 26–29.
8. **Черняков В.И.** Обоснование технологической схемы, конструктивных параметров и режимов работы планетарного триера: дис. ... канд. техн. наук. – Омск, 1974. – 212 с.
9. **Иванов Н.М.** Параметры движения зерна по делительному решету // Совершенствование технологии и технических средств послеуборочной обработки зерна: сб. науч. тр. СибИМЭ. – Новосибирск, 1990. – С. 44–48.
10. **Резниченко М.Я** Вопросы теории цилиндрических барабанов зерноочистительных машин // ЦБТИ ВИСХОМ. – 1958. – Вып. 18. – 56 с.

REFERENCES

1. **Chepurin G.E., Ivanov N.M.** Nauchno-tekhnicheskoe obespechenie agrarnogo kompleksa Sibiri // Sib. vestn. s.-kh. nauki. – 2014. – № 5. – S. 93–100.
2. **Dokin B.D., Ivanov N.M., Elkin O.V., Blynskii Yu.N., Martynova V.L.** Metodicheskie podkhody k vyboru tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv, pri proizvodstve zerna v usloviyakh Sibiri // Sib. vestn. s.-kh. nauki. – 2016. – № 2. – S. 105–109.
3. **Ivanov N.M., Toropov V.R., Sukhoparov A. A.** Predvaritel'naya ochestka zerna v tsi-

- lindricheskom kolosovom reshete s vintovym raspredelitelem: materialy mezhdunar. nauch.-tekhnich. konf. (Moskva, 17–18 sentyabrya 2013 g.). – M., 2013. – Ch. 2. – S. 86–88.
4. **Pat.** № 2274500 (Rossiiskaya Federatsiya) Tsentrobezhnyi reshetnyi separator / N.M. Ivanov, V.R. Toropov, S.E. Zakharov; zayavl. 04.06.2004; opubl. 20.04.2006.
 5. **Drincha V.M.** Issledovaniya vibroseparatorov s ploskimi tsilindricheskimi dekami // *Mekhanizatsiya i elektrifikatsiya sel. khoz-va.* – 2001. – № 5. – S. 6–10.
 6. **Toropov V.R.** Issledovanie tekhnologicheskogo protsessa planetarnogo reshetnogo separatora zerna s tsel'yu opredeleniya ego parametrov i rezhimov raboty: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Omsk, 1974. – 157 s.
 7. **Fetisov P.A.** Dvizhenie material'noi chastitsy v tsilindre tsentrobezhnoi sortirovki // *Tr. Omskogo s.-kh. in-ta.* – 1968. – T. 78. – S. 26–29.
 8. **Chernyakov V.I.** Obosnovanie tekhnologicheskoi skhemy, konstruktivnykh parametrov i rezhimov raboty planetarnogo triera: dis. ... kand. tekhn. nauk. – Omsk, 1974. – 212 s.
 9. **Ivanov N.M.** Parametry dvizheniya zerna po delitel'nomu reshetu // *Sovershenstvovanie tekhnologii i tekhnicheskikh sredstv posleurobochnoi obrabotki zerna: sb. nauch. tr. SibIME.* – Novosibirsk, 1990. – S. 44–48.
 10. **Reznichenko M.Ya** Voprosy teorii tsilindricheskikh barabanov zernoochistitel'nykh mashin // *TsBTI VISKhOM.* – 1958. – Vyp. 8. – 56 s.

EVALUATING GRAIN FEED AT SEPARATION BY PLANETARY CYLINDRICAL SIEVE WITH ROUND HOLES

**N.M. IVANOV¹, Doctor of Science in Engineering, Head,
I.YA. FEDORENKO², Doctor of Science in Engineering, Chair Holder,
S.E. ZAKHAROV¹, Researcher,**

A.A. SUKHOPAROV¹, Candidate of Science in Engineering, Senior Researcher
*¹Siberian Research Institute of Mechanization and Electrification of Agriculture, SFSCA RAS
Krasnoobsk, Novosibirsk Region, 630501, Russia*

e-mail: sibime@ngs.ru

²Altai State Agrarian University

98, Krasnoarmeiskiy Ave, Barnaul, Altai Territory, 656049, Russia

e-mail: ijfedorenko@mail.ru

There has been developed a mathematical model of the motion of grain particles, when they are sifted into the holes of the cylindrical sieve, making planetary rotation. The differential equations for the motion of a grain particle into the hole of the sieve have been obtained that take into consideration the design and mode parameters of the sieve, the velocity of a particle moving on the separating surface. The conditions for a grain particle to pass into the sieve hole were determined taking into account its maximum position above the sieve surface. There were identified major dependencies of the passage of long particles into the round holes on design, kinematic and technological parameters of the separation process on the cylindrical planetary sieves. The maximum flow of grains when sifted through one hole is achieved at 450 rpm of the sieve. The pattern of change in the velocity of a particle moving above the hole was determined. As the total pressure of the grains on the sieve surface (including rotation) increases up to 8 kg/(m · c²), grain feed increases from 0.15 to 8.5 kg/h.

Keywords: grain particle, centrifugal sieve, separation, mathematical model, movement along the sieve, planetary rotation.

Поступила в редакцию 13.09.2016