

Ю.И.ЕРМОЛЬЕВ, Г.И.ЛУКИНОВ

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОПЕРАЦИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ СЕПАРАЦИИ ЗЕРНОВОГО ВОРОХА

Приведен общий подход построения стохастической функциональной многомерной аналитической модели, описывающей системную сепарацию сыпучих материалов на транспортерном скельператоре, выполняющем одну из частных операций в зерноочистительных машинах для предварительной очистки зерна.

Ключевые слова: частные операции, синтез систем, математическая модель, транспортер-скельператор, показатели сепарации.

Введение. Для выделения из зерновых отходов зерна, недомолоченных колосков целесообразно использовать скельператорные сепараторы, обладающие высокой технологической и технической надежностью [1]. Для оценки процесса сепарации зерновых отходов на транспортерном скельператоре (ТС) в данной статье предложен метод моделирования этой частной технологической операции.

Теоретическое обоснование. Сыпучая гетерогенная среда, содержащая α_j -компонентов зернового вороха с подачей Q , перемещается ТС 1, постоянно подбрасываясь на нем с помощью подбивальщика 2 (рис.1), при опускании на ТС компоненты вороха занимают равновероятностные различные положения в пространстве.

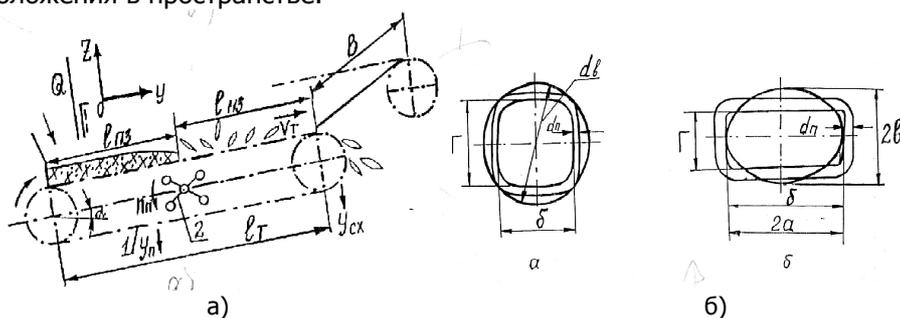


Рис.1. Функциональная схема транспортера – скельператора: а – функциональная схема ТС; б – отверстие сетки ТС; в – плотность вероятности $f_Q(B)$ рас-

пределения в)

зернового вороха по ширине B ТС

Вводим известное [2] допущение, при котором верхняя ветвь транспортера – скельператора приподнимается и опускается под действием встряхивателя, сохраняя параллельность исходному положению. Имеющиеся в зерновом ворохе крупные примеси, размеры которых по ширине

больше чем большая сторона отверстия $b_{III} \cdot \Gamma, b_{III} \cdot b$ (или диаметра $b_{III} \cdot d$

отв.) (рис. 1,2), и часть примесей, способных пройти через отверстия ТС, но не прошедшие, выносятся ТС в сход (Q_{cx}).

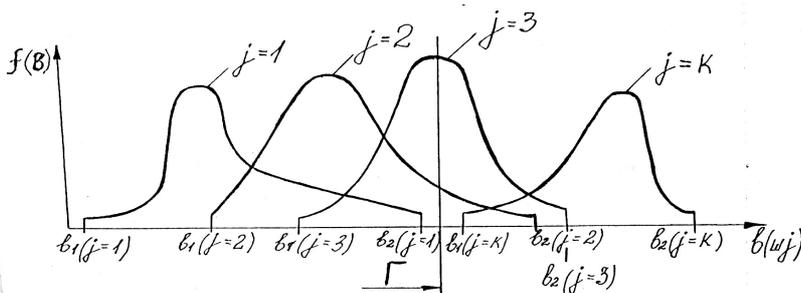


Рис.2. Плотность вероятности распределения по ширине b_{III} j-х компонентов зернового вороха

Мелкие и часть длинных компонентов зернового вороха $b_{III} \cdot \Gamma, b, d$

проходят отверстия ТС и идут в проходную фракцию ($Y_{пр.}$).

Длинные компоненты зернового вороха, длина которых $l_j \cdot \Gamma(b, d)$, опускаясь на рабочую поверхность ТС, могут занимать такие положения в пространстве, которые способствуют проходу и проходят в проходную фракцию ($Y_{пр.}$). Часть из них не способны пройти эти отверстия и выводятся в сход (фракция Y_{cx}).

Основными геометрическими параметрами транспортной сетки скельператора являются размеры ее отверстия $b \times \Gamma$, толщина d_n проволоки сетки, длина l_T и ширина B транспортера, угол α наклона его к горизонту. Отверстия сетки (допущение) с учетом значительных радиусов внутреннего изгиба проволоки можно представить в виде окружности (для $b = \Gamma$) или эллипса ($b > \Gamma, \Gamma > b$) (см.рис.1).

Построение математической модели. Математическую модель процесса функционирования ТС (см.рис.1) в зерноочистительной машине как замкнутой квазистатической системы с заданной $K_{ТС}$ -й функциональной схемой в общем виде можно записать [3,4]:

$$E_{\Phi} = \{ \vec{F}_{ТС}, \vec{A}_{ТС}, G_{\delta} [k_{\delta ТС}(x) T_{\delta ТС}(X)] \} \rightarrow \max (\text{функция цели}), \quad (1)$$

где $G_{\delta} [K_{\delta TC}(x), T_{\delta TC}(x)]$ - математическая модель, определяющая показатели технологического процесса на ТС.

$$\bar{A}_{TC} \subset \bar{A}_{OTC}, \bar{F}_{TC} \subset \bar{F}_{OTC}, x \in G_{TC}(x, u); \quad (2)$$

$$b_j \leq [b_j], \delta_3 \leq [\delta_3]. \quad (3)$$

Здесь \bar{F}_{TC} - вектор подмножества всех \bar{F}_{OTC} входных воздействий на принятую в ТС систему операций (рис.3.)

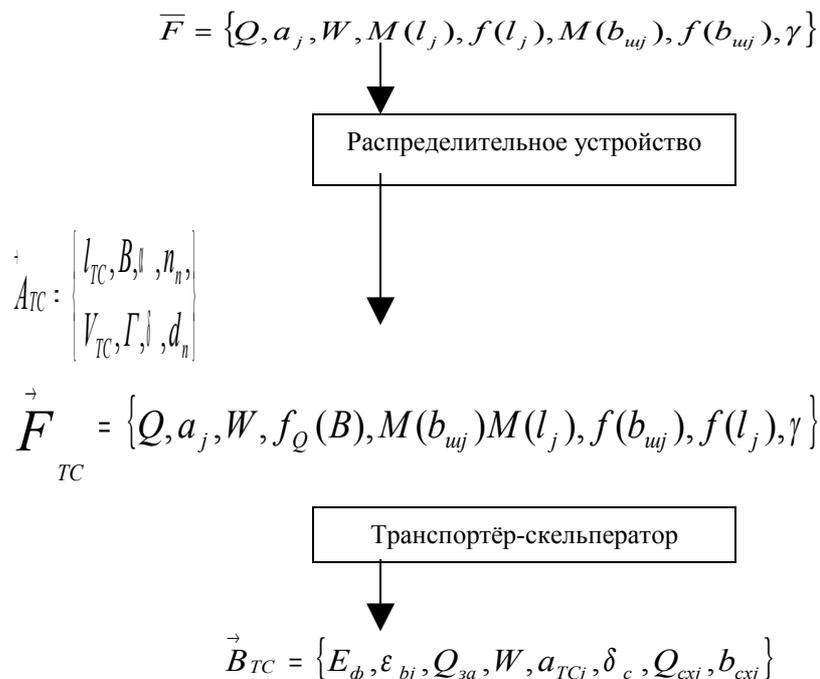


Рис. 3. Структурная схема транспортёра-скельператора

На рис.3: W - влажность зернового вороха; $M(l_j)$ и $M(b_{uj})$ - математическое ожидание размеров длины и ширины, признаков разделения j -х компонентов и плотности $f(l_j), f(b_{uj})$ вероятности распределения этих случайных величин; $f_Q(B)$ - плотность вероятности распределения подачи Q зернового материала по ширине B рабочего органа ТС; \vec{A}_{TC} - вектор управляющих факторов ТС, обеспечивающих её функционирование; n_n - частота ударов подбивальника рабочей ветви ТС; V_{TC} - линейная скорость рабочей ветви ТС; x - набор технологических операций из $G_{TC}(x, u)$ множества, реализуемых в $K_{\delta M}$ функциональной схеме ТС (см.рис.1).

Выходные показатели функционирования ТС определяются вектором \vec{B}_{TC} , независимые аргументы которого случайные в вероятностно-статистическом смысле величины (см.рис.3), где E_{ϕ} - критерий эффектив-

ности реализации технологического процесса ТС; ε_{bj} - полнота выделения из зернового вороха j -х компонентов; α_{TCj} - содержание в очищенной фракции Q_{30} j -х компонентов; δ_C - потери семян в сход ТС; Q_{CXj} - массы выхода в сход j -х компонентов; b_{CXj} - содержание j -х компонентов в сходовой фракции.

Обоснуем математическую модель $G_\delta [K_{\delta TC}(x), T_{\delta TC}(x)]$ ТС.

При функционировании рабочую поверхность транспортера-скельператора можно по длине l_T разделить на два участка: первый – с полной загрузкой зернового вороха, l_{nz} , второй с неполной загрузкой, l_{nz} (см.рис.1,а).

В общем виде на ТС поступает $q_{1j}, q_{2j}, \dots, q_{lj}$ количество j -го компонента зернового вороха с его торцов, определяемое плотностью вероятности распределения $f_Q(B)$ случайной величины Q по ширине B ТС, $f_Q(B)$ (см.рис.1,в).

Приняв известную гипотезу об аддитивности процесса сепарации зернового вороха на P -х участках (см.рис.1,в) ширины ТС, полноту просеивания j -го компонента на ТС определим известным выражением [2]

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_{p=1}^l q_p a_{jp} \varepsilon_{jp}(q_p)}{Q a_j l}, \quad (4)$$

где

$$q_p = \frac{BQ}{\kappa} P_{Qp}$$

(5)

q_p - приведенная подача зернового вороха на P -й участок (по ширине B) ($p = 1, 2, \dots, l$) ТС; $\kappa = \frac{B}{l}$; κ - ширина P -го участка ТС; P_{Qp} - вероятность попадания случайной величины Q на P -й участок по ширине B рабочей части ТС.

Очевидно, что величина P_{Qp} при известных $f_Q(B)$ определяется из выражения (см.рис.1,в)

$$P_{Qp} = \frac{\int_0^p f_Q(B) dB}{\int_{p=1}^l f_Q(B) dB}. \quad (6)$$

С учетом выражений (4) и (6) получена [4] общая зависимость полноты просеивания j -го компонента ε_j на ТС

$$\varepsilon_j = \frac{\sum_{p=1}^l Q \cdot \frac{\int_0^p f_Q(B) dB}{\int_0^l f_Q(B) dB} \cdot a_{jp} \cdot \varepsilon_{jp}(q_p)}{\sum_j Q \cdot a_j} \quad (7)$$

Общая полнота просеивания j-го компонента на всей длине l_{TC} ТС на p-х участках его ширины В определяется из выражения

$$\varepsilon_{jp} = \varepsilon_{1jp} + (1 - \varepsilon_{1jp}) \varepsilon_{2jp}, \quad (8)$$

где ε_{1jp} и ε_{2jp} - полнота просеивания j-го компонента зернового вороха на p-м участке ширины ТС соответственно на первой и второй частях ТС по его длине.

На p-м участке по длине первой части ТС можно представить в виде двух расположенных друг над другом и неоднородных по высоте условных решет равной длины l_{nz} , обладающих каждое отличным от другого, но постоянным для отдельного условного решета коэффициентом сепарации μ_{ijp} . Для первого верхнего решета, образованного слоем зернового вороха с равномерным распределением в нем j-х компонентов (зерно, дробленые колоски, минеральные примеси, дробленая соломка, дробленые стебли растений...) получено [4]

$$\mu_{1jp} = \frac{V_{zjp} \int_0^{l_{nz}} \frac{dY}{z(Y)_P}}{l_{nz} \cdot V_{TC}} \quad (9)$$

где $f=z(Y)_P$ - уравнение линии, ограничивающей сверху слой зернового вороха на p-м участке ширины ТС по длине l_{nz} (рис.4); V_{zjp} - составляющая средней скорости относительного перемещения (опускание к поверхности транспортера) j-го компонента на p-м участке ширины ТС в слое вороха; V_{TC} - относительная скорость рабочей ветви ТС.

Приняв (допущение) зависимость $f=z(Y)_P$ в виде линейной

$$z(Y)_P = h_{OP} \left(1 - \frac{Y}{l_{nz}} \right), \quad (10)$$

получим
$$\mu_{1jp} = \frac{0,693 V_{zjp}}{V_{TC} \cdot h_{OP}}, \quad (11)$$

где
$$h_{OP} = \frac{q_P}{\rho \cdot B \cdot V_{TC}}, \text{ м.} \quad (12)$$

Длину первого участка l_{nz} найдем из выражений [1], определяющих «незатрудненное» просеивание основного компонента зернового вороха, для полной загрузки транспортера-скельператора

$$\varepsilon_{j(1)P} = 1 - \left(\frac{8}{\pi^2} \right) \exp \left[- \frac{\pi^2}{16} [H(1)_j]^2 \right], \quad (13)$$

где
$$H(1)_j = \frac{q_p}{\rho \cdot B \sqrt{2 \cdot b_j \cdot l_{нзр} \cdot V_j}}; \quad (14)$$

$$b_j = \frac{q_p^2}{2\rho^2 \cdot B^2 \cdot l_{нзр} \cdot V_j \cdot H_j^2}; \quad (15)$$

$$H_j = \sqrt{\frac{\pi^2}{16 \left[\ln \left(\frac{8}{\pi^2} \right) - \ln(1 - \varepsilon_{jp}) \right]}}. \quad (16)$$

Приняв для основного зерна $\varepsilon_{jp} \approx 0,98$ и варьируя параметром $l_{нзр}$, находим $l_{нзр}$, при котором расчетная величина $\varepsilon_{j(1)P}$, определяемая из выражения (13), составит $\varepsilon_{j(1)P} = 0,98 \pm \Delta \varepsilon_j$ ($\Delta \varepsilon_j \approx 0,02$).

Для определения средней скорости V_{zjp} рассмотрена схема перемещения центров инерции тел j -х компонентов в слое зернового материала на ТС (рис.4) и получено выражение [4]

$$V_{zjp} = \frac{q_p \cdot a_j \int_0^{h_{op}} zy(z)_{jp} dz}{\int_0^{h_{op}} y(z)_{jp} dz \cdot \frac{l_{нзр}}{4V_m} \cdot q_p a_j \left[1 + 3 \left(1 - \int_0^{l_{нзр}} z(y)_{jp} dy \right) \right]} \cdot \Delta t, \quad (17)$$

где $z(y)_{jp}$ - дифференциальный закон просеиваемости j -го компонента на длине $l_{нзр}$ p -го участка ширины ТС.

Для условий равномерного распределения j -го компонента по высоте в начале слоя (см. рис.4)

$$V_{zjp} = \frac{h_{op}}{\frac{l_{нзр}}{2V_{ТС}} \left[1 + 3 \left(1 - \int_0^{l_{нзр}} z(y)_{jp} dy \right) \right]} \cdot \Delta t \quad (18)$$

или, подставив сюда h_{op} из (12), получим

$$V_{zjp} = \frac{q_p}{\rho \cdot B \cdot V_{ТС} \cdot \frac{l_{нзр}}{2V_{ТС}} \cdot q_p a_j \left[1 + 3 \left(1 - \int_0^{l_{нзр}} z(y)_{jp} dy \right) \right]} \cdot \Delta t \quad (19)$$

Найденные величины $l_{нзр}$ и V_{zjp} определяют величину μ_{1jp} (9).

Величина коэффициента сепарации второго «условного» решета будет

$$\mu_{2jP} = \frac{P_{2/1j}}{\Delta Y_{2j}}, \quad (20)$$

принимая, что

$$\Delta Y_{2j} = \frac{V_T}{n}.$$

(21)

$P_{2/1j}$ - вероятность прохода j -го компонента зернового вороха через второе «условное» решето - транспортер-скельператор представим в виде произведения вероятностей несовместных событий

$$P_{2/1j} = P_{3/1j} \cdot P_{6/5j}, \quad (22)$$

где $P_{3/1j}$ - вероятность j -му компоненту (вш \langle Г) попасть своим центром масс в отверстие транспортера; $P_{6/5j}$ - вероятность j -му компоненту длиной l_j , центр масс которого попал в зону отверстия, перемещаясь под углом δ к транспортеру ($0 \leq \delta \leq \pi/2$), пройти через круглое или эллиптическое отверстие за период одного встряхивания ветви транспортера.

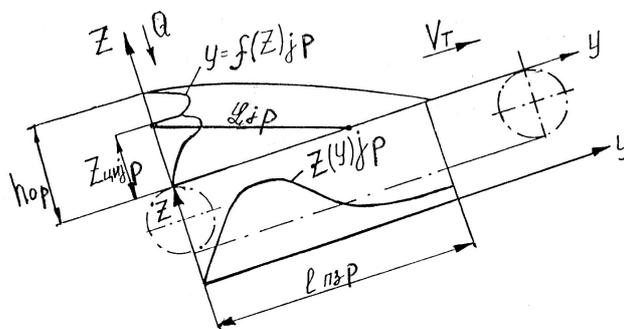


Рис.4. Схема для определения средней относительной скорости перемещения j -го компонента в слое зернового вороха на транспортере-скельператоре: h_{op} - толщина слоя зернового вороха на p -м участке в начале ТС

$P_{3/1j} = \mu$ - условное «живое» сечение рабочей ветви транспортера-скельператора в плоскости, перпендикулярной вектору скорости V_j опускания j -го компонента на транспортер [4].

$$P_{3/1j} = \mu = \frac{\delta \cdot \Gamma \cdot \cos \alpha}{(\delta \cdot \cos \alpha + d_n)(\Gamma + d_n)}. \quad (23)$$

Для оценки величин вероятностей $P_{6/5j}$ используем известные закономерности [1,4].

При условии содержания K компонентов ($j=1,2,\dots, K$) в исходном зерновом ворохе с известными плотностями вероятности $f(b_{uj})$ распределения по ширине (см.рис.2) и задаваемой шириной \bar{b} ($\bar{b} < \Gamma$) (или

при $\Gamma < \delta$) (см.рис.1,б) отверстий ТС вероятностная доля γ_j j-х компонентов, способных пройти отверстия (шириной Γ) ТС, будет

$$\gamma_j = \frac{\int_{b_{1(j)}}^{\Gamma} f(b_{uj}) db}{\int_{b_{1(j)}}^{b_{2(j)}} f(b_{uj}) db}, \quad b_{2(j)} < \Gamma \rightarrow \gamma_j = 1. \quad (24)$$

Тогда часть j-х компонентов в зерновом ворохе, неспособных пройти отверстия ТС и выносимые в сход Q_{cxj} , определяется из выражения

$$Q_{cxj} = Q \cdot a_j (1 - \gamma_j). \quad (25)$$

Для этих условий полноту просеивания ε_{1jp} j-го компонента зернового вороха на p-м участке ширины ТС длиной l_{nz} определим выражением [1]

$$\varepsilon_{1jp} = \frac{\mu_{2jp} \exp(-\mu_{1jp} l_{nz}) - \mu_{1jp} \exp(-\mu_{2jp} l_{nz})}{\mu_{2jp} - \mu_{1jp}}. \quad (26)$$

Полнота просеивания j-го компонента зернового вороха на втором участке ε_{2j} длиной l_{nz} (см.рис.1,а) определяется из выражения (4), где ε_{jp}

находим из выражения (26) при $\mu_{1jp}(l) = 1$; $\mu_{2jp}(l)$ определим из выражения (20), а l_{nz} заменим на l_{nzp} ($l_{nzp} = l_T - l_{nz}$).

Просеивание в единицу времени j-го компонента Y_{nj} и всего Q_{zo} зернового вороха по всей длине ТС и содержание a_{TCj} в очищенной фракции j-го компонента находим из выражений:

$$Y_{nj} = Q a_j \gamma_j \varepsilon_j; \quad (27)$$

$$Q_{zo} = \sum_j Y_{nj}; \quad (28)$$

$$a_{TCj} = \frac{Y_{nj}}{Q_{zo}}. \quad (29)$$

Полнота схода ε_{cxj} j-го компонента с ТС с учетом известной вероятностной доли γ_j j-х компонентов, способных пройти его отверстия, будет

$$\varepsilon_{cxj} = \gamma_j (1 - \varepsilon_j) + (1 - \gamma_j), \quad (30)$$

а сход с ТС в единицу времени j-го компонента Q_{cxj} и сходовой части Q_{cx} зернового вороха:

$$Q_{cxj} = Q a_j \varepsilon_{cxj}; \quad (31)$$

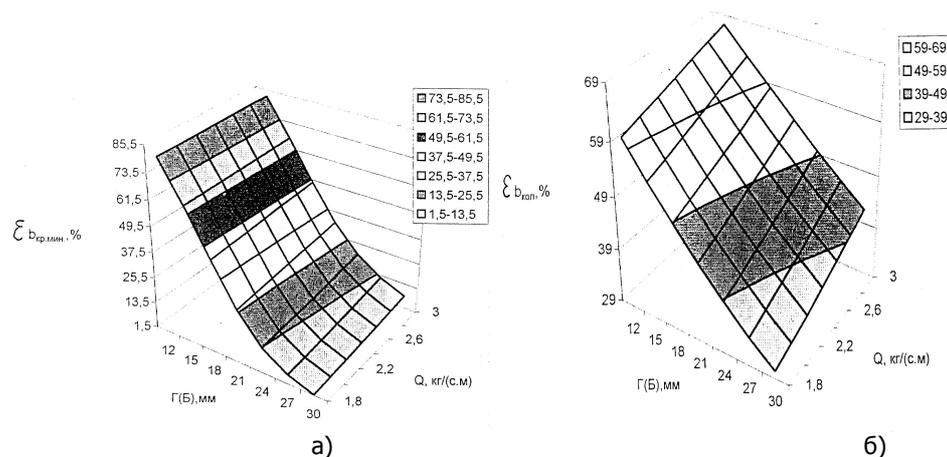
$$Q_{cx} = \sum_j Q_{cxj}. \quad (32)$$

Методы реализации исследований. Используя детерминированную вероятностную математическую модель процесса сепарации зернового вороха на транспортерном скельператоре, принятый критерий $E\phi$ [3] эффективности сепарации, ограничения на аргументы векторов \vec{F}_{TC} , \vec{A}_{TC} , \vec{B}_{TC} и метод нелинейного программирования, разработаны алгоритм и программа многомерного анализа показателей функционирования ТС и синтеза его рациональных параметров для заданных условий функционирования.

На первом этапе проведен многомерный анализ влияния размеров $\Gamma(\delta)$ квадратных отверстий транспортерного скельператора на показатели процесса сепарации зернового вороха, полученного сходом с верхних сортировальных решет воздушно-решетных зерноочистительных машин при вариации подачи $1,8 \leq Q \leq 3,0$ кг/(м·с), заданных величин аргументов вектора \vec{A}_{TC} (см.рис.3) управляющих факторов и условий перемещения j-x компонентов зернового вороха по сетке ТС с подбрасыванием.

Полученные показатели функционирования (рис.5) указывают на существенное влияние размеров отверстий сетки ТС на показатели очистки зернового вороха.

Например (см.рис.5), при $\Gamma(\delta)=12 \times 12$ мм и вариации $Q=1,8-3,0$ кг/(м·с) полнота выделения из зернового вороха сходом крупных минеральных примесей $\varepsilon_{\text{вкр.мин.}}=82,2-82,6$ %, солоmistых примесей $\varepsilon_{\text{всол.}}=63,0-68,9$ %, колосков- $\varepsilon_{\text{вкол.}}=60,6-67,2$ %, корзинок осота $\varepsilon_{\text{вкор.}}=49,7-59,4$ %. При $\Gamma(\delta)=30 \times 30$ мм- $\varepsilon_{\text{вкр.мин.}}=1,8-7,4$ %, $\varepsilon_{\text{всол.}}=33,9-44,8$ %, $\varepsilon_{\text{вкол.}}=30,5-41,7$ %, $\varepsilon_{\text{вкор.}}=17,7-28,9$ %.



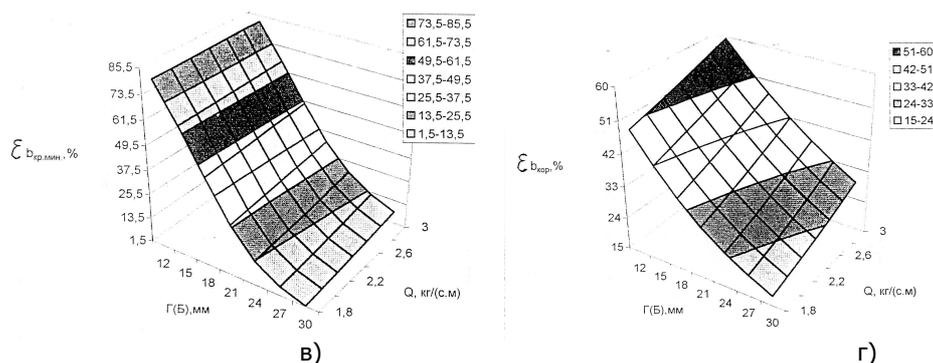


Рис.5. Зависимость полноты выделения ε_{bj} крупных примесей из зерновых отходов транспортерным скельператором от размеров: а – крупных примесей; б – колосков; в – крупных минеральных примесей; г – корзи́н осота

Выводы. Построена функциональная математическая модель процесса сепарации зернового вороха на транспортере-скельператоре. Установлено, что при заданных аргументах входных и управляющих воздействий можно проводить многомерный анализ и параметрическую оптимизацию транспортера-скельператора с рассмотренной структурой элементов.

Высокий уровень полноты выделения сходом с сетки скельператора колосков (30,5...41,7%) и оценка размерных характеристик крупных примесей и колосков выявили возможность выделения крупных компонентов на сетке с минимизацией схода колосков при использовании продолговатых отверстий.

Библиографический список

1. Ермо́льев Ю.И. Интенсификация технологических операций в воздушно-решетных зерноочистительных машинах. / Ю.И. Ермо́льев. – Ростов н/Д: Издательский центр ДГТУ, 1989. – 494 с.
2. Петро́в Г.Д. Картофелеуборочные машины. / Г.Д. Петро́в. – М.: Машиностроение, 1972. – 400 с.
3. Ермо́льев Ю.И. Систематизация функциональных схем и параметрическая оптимизация агрегатов очистки зерновых отходов. / Ю.И. Ермо́льев, Г.И.Лукинов, М.В.Шелков, И.Ю.Ермо́льева. – Деп. в ВИНТИ №3827-899, 1999.
4. Ермо́льев Ю.И. Моделирование процесса сепарации сыпучих материалов на транспортерном сепараторе. / Ю.И. Ермо́льев, Г.И. Лукинов, М.В.Шелков. // Вестник ДГТУ. – 2001. – №3 (9). – С.31-41.

Материал поступил в редакцию 20.03.09.

U.I.ERMOLJEV, Y.I.LUKINOV

THE MODELING OF PROCESSES OIF DRY MATERIALS SEPARATION FOR DIFFERENT LOTS OF SPECIAL OPERATIONS IN SYNTHESIZED SEPARATORS

A general approach of the constructing of a functioning stochastic multimeasured analytic model, describing dry materials system separation on different combinations of special technological operations forming cleaning aggregate

structure is given here. This article considers dry materials separation process on a conveyor. Scelperator fulfilling one of special operations.

ЕРМОЛЬЕВ Юрий Иванович (р. 1943), заведующий кафедрой «Сельскохозяйственные машины» ДГТУ, доктор технических наук, профессор. Окончил РИСХМ (1969).

Научные интересы: создание систем зерноочистительных машин и агрегатов поточной очистки зерновых и других культур, интенсификация процессов сепарации, построение многомерных математических моделей, адекватно описывающих процессы сепарации.

Имеет более 230 научных публикаций, в т.ч. 3 - монографии.

ЛУКИНОВ Георгий Ильич (р. 1937), директор Ростовской государственной МИС. Окончил Московский институт пищевой промышленности (1965). Специалист в области очистки, хранения, оценки качества зерновых и продуктов их переработки, испытаний оборудования для очистки и переработки зерновых культур.

Имеет 30 научных публикаций, в т.ч. 1 монографию.

Domik20061@yandex.ru