

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ДИАПАЗОНОВ ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ БАРАБАННО-ЛЕНТОЧНОГО СМЕСИТЕЛЯ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

**А. Б. Капранова, И. И. Верлока,
М. Н. Бакин, М. Ю. Таршис**

*Кафедра «Теоретическая механика и сопротивление материалов»,
ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет»;
г. Ярославль, Россия; kapranova_anna@mail.ru*

Ключевые слова: барабанно-ленточный смеситель; влажность; конструктивно-режимные параметры; сыпучие компоненты; щеточные элементы (била).

Аннотация: Предложена методика определения рациональных диапазонов изменения конструктивно-режимных параметров барабанно-ленточного смесителя твердых дисперсных материалов на основе расчета основных энергетических показателей соответствующей технологической операции с учетом физико-механических характеристик смешиваемых компонентов и упругих свойств щеточных элементов, а также требуемых регламентных параметров качества получаемой сыпучей смеси. Представлено проектирование нового смесительного оборудования для переработки сыпучих компонентов с объемно-весовым соотношением 1:10 и более, в том числе увлажненных или склонных к агломерации.

Введение

Формирование инженерной методики расчета новых аппаратов химической технологии связано с решением ряда задач, в том числе согласно системно-структурному анализу изучаемого технологического процесса [1] на основе его сравнительного теоретико-экспериментального исследования [2 – 5] требуется выполнить:

- а) расчет основных энергетических показателей соответствующих технологических операций [6, 7];
- б) оценку интервалов изменения основных параметров (режимных и конструктивных) нового аппарата, в пределах которых его работа характеризуется как наиболее эффективная;
- в) пример расчета нового устройства специального назначения.

В рамках указанных основных этапов разработки инженерной методики расчета барабанно-ленточного смесителя сыпучих материалов [8] (рис. 1), предназначенного для получения смесей с соотношением твердых дисперсных компонентов 1:10 и более, в настоящей работе предложен способ оценки рациональных диапазонов изменения параметров для данного аппарата. Отличительной особенностью проектируемого устройства является применение смесительных барабанов со щеточными элементами, позволяющими смешивать влажные или склонные к агломерации сыпучие материалы в образующихся разреженных потоках.

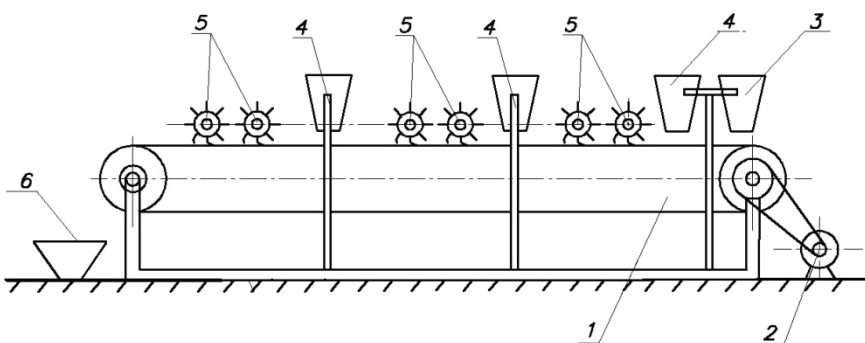


Рис. 1. Принципиальная схема нового барабанно-ленточного смесителя сыпучих материалов:

1 – ленточный транспортер; 2 – электродвигатель; 3, 4 – бункеры; 5 – барабаны с эластичными рабочими элементами; 6 – приемное устройство

Выбор наборов параметров проектируемого смесителя

Параметры проектируемого барабанно-ленточного смесителя (см. рис. 1), расчетные схемы для которого показаны на рис. 2 делятся на конструктивные $a = \{a_{s_1} = \text{const}\}$, $s_1 = 1, \dots, u_1$ и режимные $b = \{b_{s_2}\}$, $s_2 = 1, \dots, u_2$, при обозначении соответствующих наборов

$$a = \{L_{cb}, L_b, r_b, l_b, r_{sb}, N_b, h_s, \varphi_H, h_{pb}\}, \quad u_1 = 9, \quad (1)$$

$$b = \{\omega, h_0, h_L, n_{mb}\}, \quad u_2 = 4, \quad (2)$$

где L_{cb} – ширина ленты транспортного конвейера; L_b, r_{cb} – ширина и радиус барабана соответственно; l_b, r_{sb} – длина и радиус цилиндрического била соответственно; N_b – число щеточных элементов в проекции на поперечную плоскость относительно оси вращения барабана; h_s – шаг винтовой линии расположения бил; φ_H – угол винтовой линии, вдоль которой закреплены била на цилиндрической поверхности смесительного барабана; h_{pb} – расстояние между билами в указанной навивке; ω – угловая скорость вращения барабана; h_0 – высота барабанно-ленточного зазора; h_L – высота слоев сыпучих материалов; n_{mb} – общее число барабанов, равное удвоенному значению числа смесительных узлов n_{mU} .

Рассматривая указанный смеситель как «преобразователь» материальных потоков в ходе реализации процесса смешивания сыпучих компонентов общим числом n_k , обозначим его параметры следующим образом: входные или $x = \{Q_i, n_{V_i}\}$, $i = 1, \dots, n_k$; $r_1 = 2n_k$; $y = \{y_v\}$, $v = 1, \dots, r_2$ или $y = \{Q_i, n_{V_i}, V_{C(\tau)}^{dy}\}$, $i = 1, \dots, n_k$; $\tau = 1, \dots, n_\tau$, $r_2 = 2n_k + n_\tau + 1$, где Q_i – объемные расходы и n_{m_i} – объемные доли сыпучих материалов в готовой смеси с требуемым значением коэффициента неоднородности $V_{C(\tau)}^{dy}$ для каждого τ -этапа смешивания при абсолютной погрешности ΔV_C . Для двухкомпонентной смеси ($i = 1, 2$), которая должна получиться в проектируемом аппарате (см. рис. 1)

$$x = \{Q_1, Q_2, n_{V_1} = 1, n_{V_2} = n_V\}, \quad r_1 = 4, \quad (3)$$

$$y = \{Q_1, Q_2, n_{m_1} = 1, n_{m_2} = n_m, V_{C(\tau)}^{dy}, \Delta V_C\}, \quad \tau = 1, \dots, n_\tau, \quad r_2 = 5 + n_\tau, \quad (4)$$

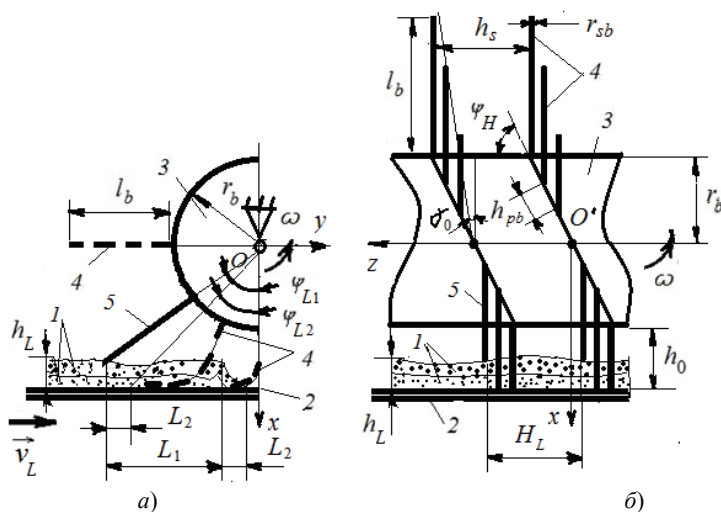


Рис. 2. Условная схема входа слоев сыпучих материалов в рабочий объем смесительного барабана в поперечном (а) и продольном (б) сечениях:
 1 – слои сыпучих компонентов; 2 – ленточный транспортер; 3 – барабан;
 4 – проекции щеточных элементов (бил) на плоскость движения одного била;
 5 – щеточные элементы (бил)

Кроме того, при проектировании смесителя должны учитываться физико-механические особенности зернистых материалов и щеточных элементов барабанов (см. рис. 2), тогда к дополнительному набору входных параметров можно отнести $P_d = \{P_{dl}\}$, $l = 1, \dots, r_3$:

$$P_d = \left\{ \rho_{T_i}, \rho_{H_i}, d_{s_i}, k_{W_i}, f_L, f_b, k_u \right\}, \quad i = 1, \dots, n_k; \quad r_3 = 4n_k + 3, \quad (5)$$

где $\rho_{T_i}, d_{s_i}, k_{W_i}$ – истинная плотность, средний диаметр частиц, влажности для i -го сыпучего компонента соответственно; ρ_{H_i} – их насыпная плотность; f_L, f_b – коэффициенты трения со стороны поверхности ленты и со стороны поверхности била соответственно на била и частицы образующейся смеси; k_u – угловой параметр жесткости била.

Описание работы блок-схемы расчета проектируемых параметров смесителя

Как показали экспериментальные исследования процесса смешивания сыпучих сред в рабочем объеме указанного устройства [7], наибольшее влияние на показатель качества смеси оказывают параметры: режимные – расход материалов Q_{bL} и угловая скорость вращения барабана ω ; конструктивный – шаг винтовой линии расположения бил h_s ; конструктивно-режимный, характеризующий относительные деформации бил $\Delta = l_b/h_0$, как отношение длины бил к высоте барабанно-ленточного зазора. Заметим, что условием минимизации времени смешивания сыпучих компонентов τ_m может служить уравнение экстремума относительно шага винтовой линии, вдоль которой закреплены щеточные элементы смесительного барабана:

$$\frac{\partial \tau_m}{\partial h_s} = 0; \quad \tau_m = r \left[s(\theta_{n_b}) - r_s(\theta_1) \right] / \left[\max \left(v_{r\theta ij} \Big|_{i=1,2; j=n_b} \right) - \min \left(v_{r\theta ij} \Big|_{i=1,2; j=1} \right) \right], \quad (6)$$

где согласно [4] спиральная кривая задается уравнением $r_s(\theta) = r_b + l_b - (l_b - h_0) \times \times [1 - 2h_s \theta L_b^{-1}]$; $v_{r\theta ij}$ – скорость частицы i -го компонента ($i = 1, \dots, n_k$) при срыве с j -го била ($j = 1, \dots, n_b$) равна $v_{r\theta ij} = \omega r_{ij}(\theta_{ij}) / \cos \beta_j$ при

$$\beta_j = \arctg \left\{ 2h_s L_b^{-1} (l_b - h_0) \left[r_b + h_0 + (l_b - h_0) (1 - 2h_s L_b^{-1} \theta_j) \right]^{-1} \right\}.$$

Кроме того, в качестве экстремального условия для поиска указанного отношения характеристических параметров аппарата можно выбрать следующее

$$\partial V_{L\tau} / \partial \Delta = 0, \quad (7)$$

где правая часть данного уравнения представляет собой частную производную по параметру Δ от объема слоя двух компонентов $V_{L\tau}$ [6], захватываемого барабаном с транспортной ленты за один оборот (см. рис. 2, а), согласно следующему выражению с учетом номера этапа смешивания $\tau = 1, \dots, n_\tau$; размеров бил и их числа n_b

$$V_{L\tau} = L_b h_s^{-1} \left\{ \left(2\pi \mu_0 (r_b + h_0) - \left\{ 4l_b^2 [1 - \cos(\varphi_{L1\tau} - \varphi_{L2})] - h_{L\tau}^2 \right\}^{1/2} \right) \times \times h_{L\tau} H_L - 4\pi (n_b - 1) r_{sb}^2 l_b \right\}. \quad (8)$$

В выражении (8) обозначено:

$$H_L = h_s - (n_b - 1) h_{pb} \cos \varphi_H + 2N_b r_{sb}; \quad \mu_0 = v_L / \omega = f_{Lb} / (r_b + h_0);$$

$$\varphi_{L1\tau} = \arccos[(r_b + h_0 - h_{L\tau}) / l_b]; \quad \varphi_{L2} = \arccos[(r_b + h_0) / l_b],$$

где L_b и r_b – ширина и радиус барабана 3 соответственно; l_b и r_{sb} – длина и радиус цилиндрического била 4 соответственно; h_0 – высота барабанно-ленточного зазора; $h_{L\tau}$ – высота слоев сыпучих материалов 1 на τ -стадии, перемещающихся вместе с транспортной лентой 2; h_{pb} – расстояние между билами в винтовой навивке с углом наклона φ_H .

Рассмотрим работу блок-схемы (рис. 3) расчета проектируемых параметров барабанно-ленточного смесителя (см. рис.1) двух сыпучих компонентов ($i = 1, 2$). Блок 1 задает входные данные для указанного расчета: физико-механические характеристики для сыпучих материалов и гибкого элемента $P_d = \{P_{dl}\}$, $l = 1, \dots, r_3$ из (5), а также требуемые параметры устройства $y = \{y_v\}$, $v = 1, \dots, r_2$ из (4) (см. рис. 2). В соответствии с ГОСТ 22644–77 выбираем фиксированное значение ширины ленты транспортного конвейера L_{cb}^* (блок 2), с помощью которого определяются пределы изменения ширины барабана L_b (блок 3): $L_{b \min} \leq L_b \leq L_{b \max}$, $L_{b \min} = 0,60L_{cb}^*$, $L_{b \max} = 0,75L_{cb}^*$. Выбирая число ходов (шагов) при переборе указанного интервала по параметру L_b равным $n_{Lb} = 4$ (блок 4), можно вычислить соответствующий шаг (блок 5): $\Delta L_b = (L_{b \max} - L_{b \min}) / n_{Lb}$, $j_1 = 0, 1, \dots, n_{Lb}$. Тогда при $j_1 = 0$ (блок 6) выполняется пошаговый расчет ширины барабана $L_{bj_1}^*$ по рекуррентной формуле (блок 7) $L_{bj_1}^* = L_{b \min} + \Delta L_b j_1$. Определение интервалов изменения радиуса барабана r_b (блок 8) $r_{b \max} \leq r_b \leq r_{b \min}$ производится в зависи-

мости от значения n_{rb} . При числе шагов $n_{rb} = 14$ (блок 9) предельные значения для радиуса смесителя (блок 10) зависят от $L_{bj_1}^*$ и равны $r_{b \min} = L_{bj_1}^* / n_{rb}$, $r_{b \max} = 2L_{bj_1}^* / n_{rb}$, следовательно, усредненное значение по указанному отрезку $[r_{b \max}; r_{b \min}]$ соответствует $r_b^* = (r_{b \max} + r_{b \min}) / 2$ (блок 11). С помощью условного блока 12 проверяется выполнение неравенства $r_b^* / L_{bj_1}^* \ll 1$, в противном случае производится новый выбор $n_{rb} = n_{rb} + 1$ (блок 13) с увеличением на единицу количества шагов по интервалу $[r_{b \max}; r_{b \min}]$ с возвратом на блок 10, когда идет поиск новых значений $r_{b \min}$ и $r_{b \max}$. Основываясь на опытных результатах, для оценки высоты барабанно-ленточного зазора h_0 первоначально выберем 0-приближение для длины гибких элементов, закрепленных на барабане (блок 14) $l_{b0}^* = 1,5r_b^*$, позволяющее рассчитать предельные значения для параметра h_0 (блоки 15 и 16): $1,48 \leq l_b / h_0 \leq 1,52$; $h_{0 \min} = l_b / 1,52$; $h_{0 \max} = l_b / 1,48$.

При числе шагов $n_{h_0} = 5$ (блок 17) в интервале от $h_{0 \min}$ до $h_{0 \max}$ включительно (блок 18) длина шага определяется выражением $\Delta h_0 = (h_{0 \max} - h_{0 \min}) / n_{h_0}$, $j_2 = 0, 1, \dots, n_{h_0}$. Блок 19 обеспечивает $j_2 = 0$ и начало счета по рекуррентной формуле (блок 20) для высоты барабанно-ленточного зазора $h_{0j_2}^* = h_{0 \min} + \Delta h_{0j_2}$. С помощью блока 21 производится оценка 0-приближения для радиуса цилиндрического била $r_{sb_0}^*$ по известному его максимальному напряжению σ_{\max} , вычисляемому через максимальный изгибающий момент M_{\max} для статически определимого случая. В предположении $\sigma_{\max} = \sigma_{st}$, то есть равенства указанного напряжения била пределу прочности $\sigma_{st} = 20,0$ МПа, справедливо $r_{sb_0}^* = \left[3M_{\max} \left(2l_{b_0}^* \sigma_{st} \right)^{-1} \right]^{1/2}$. Пользуясь условием максимальной производительности проектируемого смесителя $\left(\partial V_{L\tau} / \partial h_{L\tau} \right) \Big|_{(r_b^*, l_{b_0}^*, h_{0j_2}^*, r_{sb_0}^*)} = 0$ для τ -стадии смешивания с учетом (8), блок 22 рассчитывает $h_{L\tau}^*$ – высоту слоя сыпучих компонентов на транспортной ленте при $(r_b^*, l_{b_0}^*, h_{0j_2}^*, r_{sb_0}^*)$. Условный блок 23, если $j_2 > n_{h_0}$, возвращает задачу к блоку 7, присваивая новое значение величине j_1 посредством рекуррентной формулы $j_1 = j_1 + 1$ (блок 24), то есть изменяет ширину барабана $L_{bj_1}^*$ из допустимого интервала $[L_{b \min}; L_{b \max}]$. Условный блок 25 осуществляет проверку двойного неравенства $0,30 \leq h_L^* / h_{0j_2}^* \leq 0,35$, при невыполнении которого индекс j_2 также увеличивается на единицу (блок 26) $j_2 = j_2 + 1$ и расчет переходит на блок 20 с выбором нового $h_{0j_2}^*$ из отрезка $[h_{0 \min}; h_{0 \max}]$. Применяя соотношение для объемов компонентов $V_{L_1} : V_{L_2} = 1 : n_V$, где объемная доля n_V сыпучего материала «2» равна 10 единицам и более ($n_V \gg 1$) и учитывая выражение $Q_{b_2} = h_0 \alpha_0 k_b \omega \mu_0 \left[r_b + l_b - 2^{-1} \alpha_0 \omega^2 (r_b + h_0) \right]$

для производительности барабана за один его оборот (при $\omega_{0n} = \pi/30$ рад/с и начальном числе гибких элементов в проекции на поперечную его оси плоскость $N_{b0}^* = 3$), блок 27 устанавливает $V_{L1}^{(1)}$ – объемное значение порции компонента «1» на первом этапе, соответствующее всему его объему V_{L1}

$$V_{L1}^{(1)} = \left[2Q_1 \left(1 + k_{L2}^{(1)} \right) \right]^{-1} \left(V_L Q_{b2} \right) \left(L_{bj1}^*, r_b^*, l_{b0}^*, r_{sb0}^*, N_{b0}^*, h_{0j2}^*, h_L^* \right). \quad (9)$$

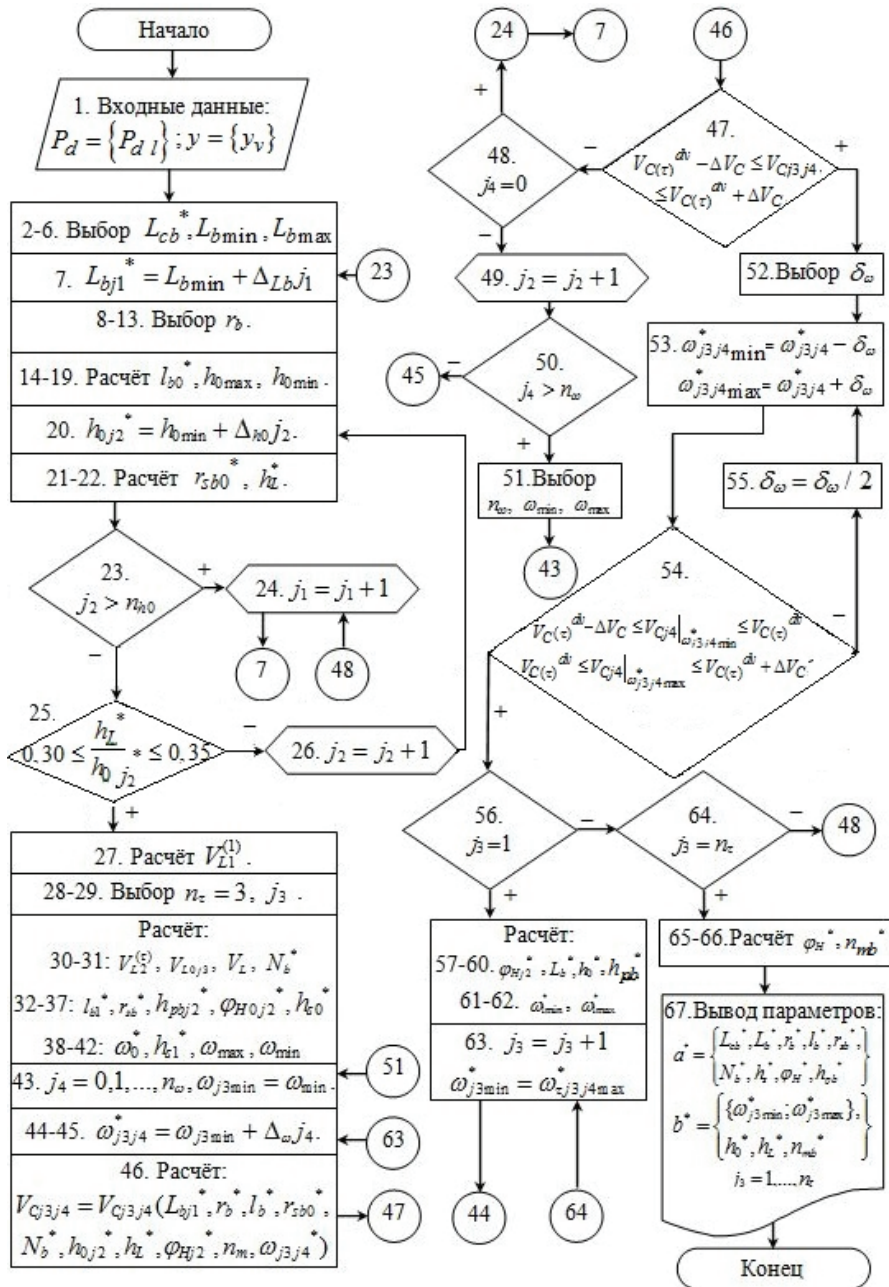


Рис. 3. Блок-схема расчета проектируемых параметров смесителя

Блок 28 инициирует выбор числа стадий обработки сыпучих компонентов $n_\tau = 3$ при нумерации стадии технологической операции с помощью индекса $j_3 = 1, \dots, n_\tau$ согласно предложенному способу смешивания с неравномерным шагом дозирования компонента «2». Блок 29 открывает цикл по индексу j_3 , то есть переход к расчету необходимых параметров для первой засыпки обеих порций смешиваемых компонентов, когда $j_3 = 1$. В блоке 30 производится вычисление $V_{L_2}^{(\tau)}$ – объема порции сыпучего материала «2» с помощью соотношения $V_{L_1} : V_{L_2} = 1 : n_V$. Значение $V_{L_2}^{(\tau)}$ равно произведению объема сыпучей среды «1» из (9) и объемной доли второго материала $k_{L_2}^{(\tau)} = \left[\left[2^{-1} (n_V - 1) + 1 \right] (\tau - 1) - 1 \right] k_{L_1}^{(1)}$, $\tau = 2, \dots, n_\tau$, при задании исходного значения $k_{L_1}^{(1)}$ для объемной доли материала «1». Принимается: $V_{L_0 j_3} = \sum_{i=1}^2 V_{L_i}^{(1)}$; $V_L = V_L(L_b, r_b, l_b, r_{sb}, N_b, h_0, h_L)$ рассчитывается при значениях $(L_{bj_1}^*, r_b^*, l_{b_0}^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*)$; фрикционный параметр равен $f_{Lb} = 9,75$ в соответствии с данными [4]. Значение параметра μ_0 задается формулой $\mu_0 = f_{Lb} / (r_b^* + h_{0j_2}^*)$ с последующим расчетом числа бил в проекции на плоскость относительно оси вращения барабана N_b^* (блок 31) из уравнения

$$V_{L_0 j_3} - V_L(L_{bj_1}^*, r_b^*, l_{b_0}^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*) = 0. \quad (10)$$

Для поиска уточненного значения длины гибкого элемента в виде первого приближения $l_{b_1}^*$ решается уравнение экстремума (блок 32) для функции $V_L = V_L(L_b, r_b, l_b, r_{sb}, N_b, h_0, h_L)$ относительно $(l_{b_1}^* / r_b^*)$

$$\left[\partial V_{L\tau} / \partial (l_b / r_b) \right] (L_{bj_1}^*, r_b^*, l_{b_0}^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*) = 0, \quad (11)$$

Таким образом, в блоке 33 значение $l_{b_1}^*$ становится искомым $l_b^* = l_{b_1}^*$, тогда блок 34 позволяет уточнить значение параметра $r_{sb}^* = \left[3M_{\max} (2l_b^* \sigma_{st})^{-1} \right]^{1/2}$. Расчет $h_{pbj_2}^*$ – расстояния между билами в винтовой навивке производится с помощью формулы (блок 35) $h_{pbj_2}^* = r_b^* \arctg \left[2^{-1} (r_b^* + h_{0j_2}^*)^{-1} (l_b^* - h_{0j_2}^*) \right]$, полученной из выражения $\varphi_{pb} = h_{pb} / r_b$ для угла между проекциями двух последовательных гибких элементов на плоскость, поперечную оси вращения смесительного барабана. Оценка следующего параметра – угла винтовой линии, вдоль которой закреплены била на цилиндрической поверхности смесительного барабана, выполняется последовательно, начиная с нулевого приближения (блок 36)

$$\Phi_{H_0 j_2}^* = \gamma_{0j_2}^* + P_2, \quad \Phi_{Hj_2}^* = \Phi_{H_0 j_2}^*,$$

где

$$\gamma_{0j_2}^* = \arctg \left\{ \left(2p_{1j_2}^* \right)^{-1} \left(p_2 \left(1 + p_{1j_2}^* \right) + \left[p_2^2 \left(1 + p_{1j_2}^* \right)^2 + 4p_{1j_2}^* \right] \right) \right\};$$

$p_{1j_2}^* = 1 + h_{0j_2}^* / r_b^*$. Блок 37 осуществляет выбор $h_{s_0}^*$ – шага винтовой линии расположения бил на смесительном барабане в качестве нулевого приближения согласно данным опытных испытаний смесительной установки $h_{s_0}^* = r_b^* \left[L_{bj_1}^* / (L_{b \max} - L_{b \min}) - 1 \right]$. Критерий Фруда в модифицированном представлении (блок 38)

$$Fr = 6\omega_0^* \left(h_L^* \right)^2 h_{s_0}^* / \left[gh_{0j_2}^* \left(r_b^* + l_b^* \right) \right] = (1 \pm 0,25), \quad (12)$$

где g – ускорение свободного падения, определяет начальные приближения; ω_0^* – для угловой скорости вращения барабана и $v_{L_0}^* = \omega_0^* \left(r_b^* + h_{0j_2}^* \right) / f_{Lb}$ при $f_{Lb} = 9,75$. Применение формулы (6) для минимизации времени смешивания сыпучих компонентов (блок 39) при значениях $\left(L_{bj_1}^*, r_b^*, l_b^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*, \omega_0^* \right)$ приводит к оценке первого приближения для шага винтовой линии $h_{s_1}^*$

$$\left(\partial \tau_m / \partial h_s \right) \Big|_{\left(L_{bj_1}^*, r_b^*, l_b^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*, \omega_0^* \right)} = 0, \quad (13)$$

которое в блоке 40 принимаем равным искомому значению $h_s^* = h_{s_1}^*$. С учетом последнего равенства, модифицированного критерия Фруда (12) и данных для граничных высот барабанно-ленточного зазора $h_{0 \min}$ и $h_{0 \max}$ (блоки 15 и 16) рассчитываем пределы изменения угловой скорости вращения барабана при смешивании первых порций сыпучих материалов «1» и «2» (блок 41)

$$\begin{aligned} \omega_{\max} &= \left(gh_{0 \max} \left(r_b^* + l_b^* \right) / \left[6h_{s_0}^* \right] \right)^{1/2} / h_L^*; \\ \omega_{\min} &= \left(gh_{0 \min} \left(r_b^* + l_b^* \right) / \left[6h_{s_0}^* \right] \right)^{1/2} / h_L^*. \end{aligned} \quad (14)$$

Выбирая число шагов по отрезку $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ равным $n_\omega = 5$ (блок 42), определяется длина шага $\Delta_\omega = (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / n_\omega$ (блок 43) при $j_4 = 0, 1, \dots, n_\omega$, $\omega_{j_3 \min} = \omega_{\min}$. Следующий блок 44 открывает цикл по j_4 . Первоначально $j_4 = 0$ при расчете текущего значения $\omega_{j_3 j_4}^* = \omega_{j_3 \min} + \Delta_\omega j_4$ (блок 45). Блок 46 производит оценку коэффициента неоднородности $V_{Cj_3 j_4} = V_{Cj_3 j_4} \left(L_{bj_1}^*, r_b^*, l_b^*, r_{sb_0}^*, N_b^*, h_{0j_2}^*, h_L^*, \Phi_{Hj_2}, n_m, \omega_{j_3 j_4}^* \right)$ согласно полученным в работе [7] выражениям для коэффициента неоднородности при выбранных значениях: параметров проектируемого смесителя и физико-механических характеристик сыпучих материалов из набора (5). Набор условных блоков 47 и 48 осуществляет следующие действия:

– сравнение (блок 47) значений – расчетного $V_{Cj_3 j_4}$ и требуемого $V_{C(\tau)}^{dv}$ с заданной абсолютной погрешностью ΔV_C согласно неравенству

$$V_{C(\tau)}^{dv} - \Delta V_C \leq V_{Cj_3 j_4} \leq V_{C(\tau)}^{dv} + \Delta V_C; \quad (15)$$

– проверку в блоке 48 условия $j_4 = 0$, когда при несправедливости неравенства (15) происходит переход или на блок 24 (циклический расчет ширины барабана $L_{bj_1}^*$ по j_1) при выполнении $\omega_{j_3 j_4}^* = \omega_{j_3 \min} + \Delta_{\omega j_4}$, или в противном случае – на блок 49 с движением по циклу для $j_4 = j_4 + 1$.

На данном этапе предложенный в блок-схеме алгоритм дополнительно выясняет, не является ли данный шаг по циклу j_4 последним (блок 50), то есть $j_4 > n_{\omega}$, с возвратом на блок 45 – задание нового значения $\omega_{j_4}^*$ из интервала $[\omega_{\min}; \omega_{\max}]$ при $j_4 \leq n_{\omega}$ или выбором новых значений для n_{ω} , ω_{\min} , ω_{\max} в блоке 51 с переходом на блок 43 для вычисления новых – длины шага Δ_{ω} и угловой скорости $\omega_{j_3 j_4}^*$. Блок 47 при справедливости неравенства (15) с помощью задания абсолютной ошибки $\delta_{\omega} = 0,1\omega_{j_3 j_4}^*$ для угловой скорости барабана (блок 52) производит выбор доверительного интервала (блок 53) для искомого $\omega_{j_3 j_4}^*$, то есть $\omega_{j_3 j_4 \min}^* = \omega_{j_3 j_4}^* - \delta_{\omega}$, $\omega_{j_3 j_4 \max}^* = \omega_{j_3 j_4}^* + \delta_{\omega}$. Следующий условный блок 54 осуществляет проверку двойных неравенств

$$V_{C(\tau)}^{dy} - \Delta V_C \leq V_{Cj_4} \Big|_{\omega_{j_3 j_4 \min}^*} \leq V_{C(\tau)}^{dy}, \quad V_{C(\tau)}^{dy} \leq V_{Cj_4} \Big|_{\omega_{j_3 j_4 \max}^*} \leq V_{C(\tau)}^{dy} + \Delta V_C, \quad (16)$$

а их невыполнение приводит к уменьшению абсолютной ошибки для $\omega_{j_4}^*$ (блок 55) при использовании рекуррентной формулы $\delta_{\omega} = \delta_{\omega}/2$ с последующим возвратом на блок 53, соответствующим поиску доверительного интервала изменения угловой скорости смесительного барабана.

Если справедлива формула $j_3 = 1$, то условный блок 56 переводит расчет на поиск первого приближения $\varphi_{H_1 j_2}^*$ для угла винтовой линии, вдоль которой закреплены била на цилиндрической поверхности смесительного барабана (блок 57) с помощью уравнения экстремума для мощности его привода N_{mb} и значениями $(r_b^*, l_{b_0}^*, h_{0 j_2}^*, h_L^*, \omega_{j_3 j_4}^*, j_4 = 1)$

$$\partial N_{mb} / \partial \varphi_H \Big|_{(r_b^*, l_{b_0}^*, h_{0 j_2}^*, h_L^*, \varphi_{H_1 j_2}^*, \omega_{j_3 j_4}^*, j_3=1)} = 0. \quad (17)$$

Последующие блоки 58 – 62 присваивают искомым параметрам следующие значения: $\varphi_{H j_2}^* = \varphi_{H_1 j_2}^*$, $L_b^* = L_{bj_1}^*$, $h_0^* = h_{0 j_2}^*$, $h_{pb}^* = h_{pb j_2}^*$, $\omega_{1 \min}^* = \omega_{j_3 j_4 \min}^* \Big|_{j_3=1}$, $\omega_{1 \max}^* = \omega_{j_3 j_4 \max}^* \Big|_{j_3=1}$. Таким образом, для первого смесительного узла (при $j_3 = 1$) получен интервал изменения угловой скорости первой пары барабанов с одинаковыми порциями смешиваемых компонентов $[\omega_{1 \min}^*; \omega_{1 \max}^*]$. Блок 63 обращается к циклу по j_3 с помощью рекуррентной формулы и выбором $\omega_{j_3 \min}^*$ при различных этапах $j_3 = j_3 + 1$, $\omega_{j_3 \min}^* = \omega_{\tau j_3 j_4 \max}^*$, $\tau = 1, 2$, и с возвратом на блок 44 для возобновления цикла

по j_4 . Кроме того, условный блок 5б при $j_3 \neq 1$ переходит на другой условный блок 64 с проверкой: является ли номер смесительного узла последним $j_3 = n_\tau$, тогда при $j_3 \neq n_\tau$ происходит возврат к блоку 63. В противном случае – следующее присваивание значений для угла винтовой линии (блок 65) $\varphi_H^* = \varphi_{Hj_2}^*$ и расчет в блоке 66 числа смесительных узлов согласно формуле $n_{mb}^* = 2n_\nu$. Последний блок 67 – вывод всех искомым параметров в соответствии с выражениями (1) и (2): конструктивных $a^* = \{a_{s_1}^* = \text{const}\}$, $s_1 = 1, \dots, u_1$, и режимных $b^* = \{b_{s_2}^*\}$, $s_2 = 1, \dots, u_2$, для барабанно-ленточного смесителя:

$$a^* = \{L_{cb}^*, L_b^*, r_b^*, l_b^*, r_{sb}^*, N_b^*, h_s^*, \varphi_H^*, h_{pb}^*\}, \quad u_1 = 9; \quad (18)$$

$$b^* = \{\omega_{j_3 \min}^*, \omega_{j_3 \max}^*, h_0^*, h_L^*, n_{mb}^*\}, \quad j_3 = 1, \dots, n_\tau, \quad u_2 = 3 + 2n_\tau, \quad (19)$$

в том числе, вывод предельных значений угловых скоростей барабанов для j_3 -го узла проектируемого аппарата.

Заключение

Построенная блок-схема расчета параметров проектируемого смесителя сыпучих материалов с подвижной лентой может быть применена для расчета конкретного аппарата специального назначения с учетом физико-механических характеристик смешиваемых компонентов согласно полученным результатам теоретико-экспериментальных исследований [2 – 7] процесса получения сыпучей смеси из твердых дисперсных компонентов в соотношении 1:10 и более, в том числе увлажненных или склонных к агломерации.

Список литературы

1. Кафаров, В. В. Системный анализ процессов химической технологии. Процессы измельчения и смешения сыпучих материалов / В. В. Кафаров, И. Н. Дорохов, С. Ю. Арутюнов. – М.: Наука, 1985. – 440 с.
2. Влияние влажности сыпучих сред на их распределение в рабочем объеме смесителя с подвижной лентой / А. Б. Капанова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 1. – С. 97 – 104.
3. Способы описания движения твердых дисперсных сред в различных плоскостях для сечений смесительного барабана / А. Б. Капанова [и др.] // Вестн. Тамб. гос. техн. ун-та. – 2015. – Т. 21, № 2. – С. 296 – 304.
4. Бакин, М. Н. Исследование распределения сыпучих компонентов в рабочем объеме барабанно-ленточного смесителя [Электронный ресурс] / М. Н. Бакин, А. Б. Капанова, И. И. Верлока // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (ч. 5). – С. 928 – 933. Режим доступа: www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003288 (дата обращения: 02.10.2017).
5. Исследование ударного смешивания твердых дисперсных сред при вторичных столкновениях частиц / А. Б. Капанова [и др.] // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2013. – Т. 56, вып. 6. – С. 83 – 86.
6. Капанова, А. Б. О способах оценки производительности смесительного барабана со щеточными элементами / А. Б. Капанова, И. И. Верлока, М. Н. Бакин // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2015. – Т. 58, вып. 11. – С. 80 – 82.

7. Оценка коэффициента неоднородности зернистой смеси в объеме барабанно-ленточного устройства / А. Б. Капранова [и др.] // Изв. вузов. Химия и химическая технология. – 2014. – Т. 57, вып. 9. – С. 104 – 106.

8. Бакин, М. Н. Современные аппараты с подвижной лентой для смешивания сыпучих материалов [Электронный ресурс] / М. Н. Бакин, А. Б. Капранова, И. И. Верлока // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 5 (ч. 4). – С. 687 – 691. Режим доступа : www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003246 (дата обращения: 02.10.2017).

Method of Determination of Rational Variation Ranges of Parameters of Drum-Ribbon Mixer for Loose Materials

A. B. Kapranova, I. I. Verloka, M. N. Bakin, M. Yu. Tarshis

*Department of Theoretical Mechanics and Strength of Materials,
Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia;
kapranova_anna@mail.ru*

Keywords: loose components; humidity; drum-ribbon mixer; brush elements (beats); structural operating parameters.

Abstract: Given the physical-mechanical characteristics of mixing components and the elastic properties of brush elements, as well as the required procedural quality parameters of resulting loose mixture, a method for determining rational variation ranges of structural operating parameters for a drum-ribbon mixer for solid dispersible materials is proposed based on calculation of main energy parameters of corresponding technological operation. The obtained results can be used in the design of new mixing equipment for loose components processing with 1:10 and more volume ratio, including humid or prone to agglomeration components.

References

1. Kafarov V.V., Dorokhov I.N., Arutyunov S.Yu., *Sistemnyi analiz protsessov khimicheskoi tekhnologii. Protsessy izmel'cheniya i smesheniya sypruchikh materialov* [System analysis of the processes of chemical technology. Processes of grinding and mixing of bulk materials], Moscow: Nauka, 1985, 440 p. (In Russ.)

2. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zajcev A.I. [Influence of humidity of granular fluids on their distribution in the working volume of a mixture with a moving belt], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 1, pp. 97-104. (In Russ., abstract in Eng.)

3. Kapranova A.B., Bakin M.N., Verloka I.I., Zajcev A.I. [Methods for describing the motion of solid disperse media in different planes for sections of a mixing drum], *Transactions of the Tambov State Technical University*, 2015, vol. 21, no. 2, pp. 296-304. (In Russ., abstract in Eng.)

4. www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003288 (accessed 29 September 2017).

5. Kapranova A.B., Bakin M.N., Lebedev A.E., Zajcev A.I. [Investigation of impact mixing of solid disperse media in secondary collisions of particles], *Izv. VUZov. Himija i himicheskaja tehnologija* [Izv. universities. Chemistry and Chemical Technology], Ivanovo, 2013, vol. 56, no. 6, pp. 83-86. (In Russ.)

6. Kapranova A.B., Verloka I.I., Bakin M.N. [On the methods of evaluating the performance of a mixing drum with brush elements], *Izv. VUZov. Himija i himicheskaja tehnologija* [Izv. universities. Chemistry and Chemical Technology], Ivanovo, 2015, vol. 58, no. 11, pp. 80-82. (In Russ.)

7. Kapranova A.B., Bakin M.N., Lebedev A.E., Zajcev A.I. [Estimation of the coefficient of heterogeneity of a granular mixture in the volume of a drum-tape device], *Izv. VUZov. Himija i himicheskaia tehnologija* [Izv. universities. Chemistry and Chemical Technology], Ivanovo, 2014, vol. 57, no. 9, pp. 104-106. (In Russ.)

8. www.rae.ru/fs/?section=content&op=show_article&article_id=10003246 (accessed 29 September 2017).

Methodik der Bestimmung der rationalen Bereiche der Variation der Parameter des Trommelbandmischers der Schüttgüter

Zusammenfassung: Im Hinblick auf die physikalisch-mechanischen Eigenschaften der Mischungsbestandteile und die elastischen Eigenschaften der Bürstenelemente, sowie die gewünschten regulatorischen Parameter der Qualität der produzierten Schüttmischung ist die Methodik der Bestimmung der rationalen Bereiche der Veränderung der konstruktiven Regimeparameter des Trommelbandmischers der harten Schüttgüter aufgrund der Berechnung der wichtigsten Energieindikatoren der entsprechenden technologischen Operation vorgeschlagen. Die erhaltenen Ergebnisse können bei der Projektierung der neuen Mischanlagen für Verarbeitung von Schüttkomponenten mit Volumen-Gewichtsverhältnis von 1:10 und mehr, einschließlich für feuchteoderagglomerationsfähige verwendet werden.

Méthode de la détermination des plages rationnelles de la modification des paramètres du mélangeur de bande et de tambour des matériaux en vrac

Résumé: Compte tenu des propriétés physico-mécaniques des composants mélangés et des propriétés élastiques des éléments brosses, ainsi que des paramètres exigés par les réglementations pour une qualité obtenue du mélange en vrac est proposée une méthode de la détermination des plages rationnelles des paramètres de construction et de régime du mélangeur de bande et de tambour des matériaux solides dispersés à la base du calcul des principaux indicateurs énergétiques de l'opération technologique correspondante. Les résultats obtenus peuvent être utilisés lors de la conception d'un nouvel équipement de recyclage des composants en vrac avec un rapport de volume et de poids 1:10 et plus, y compris des composants humides ou sensibles à l'agglomération.

Авторы: *Капанова Анна Борисовна* – доктор физико-математических наук, доцент, заведующая кафедрой «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Верлока Иван Игоревич* – аспирант кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Бакин Михаил Николаевич* – младший научный сотрудник кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов»; *Таршиц Михаил Юрьевич* – доктор технических наук, доцент, профессор кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.

Рецензент: *Петерсон Станислав Антонович* – доктор технических наук, профессор кафедры «Теоретическая механика и сопротивление материалов», ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль, Россия.