

Breki Alexander Dzhalyulevich, candidate of technical sciences, docent, deputy head of chair, albreki@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great,

Fadin Yuri Alexandrovich, doctor of technical sciences, professor, head of the laboratory, fadinspb@yandex.ru, Russia, St. Petersburg, Institute of problems of mechanical engineering RAS,

Didenko Andrey Leonidovich, candidate of chemical sciences, senior researcher of the laboratory, vanilin72@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Institute of macromolecular compounds RAS,

Kudryavtsev Vladislav Vladimirovich, doctor of chemical sciences, professor, head of the laboratory, vanilin72@yandex.ru, Russia, Saint-Petersburg, Institute of Macromolecular Compounds RAS,

Tolochko Oleg Viktorovich, doctor of technical sciences, professor, director of scientific-technological complex, plast-ftim@mail.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Polytechnic University of Peter the Great,

Vasil'eva Ekaterina Sergeevna, candidate of technical sciences, docent, katrinfr@inbox.ru, Russia, Saint-Petersburg, Saint-Petersburg Polytechnic University of Peter the Great,

Gvozdyev Alexander Evgenevich, doctor of technical sciences, professor, technology@tspu.tula.ru, Russia, Tula, Tula State Leo Tolstoy Pedagogical University,

Starikov Nikolay Evgenevich, doctor of technical sciences, professor, deputy head of chair, starikov_taii@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Provotorov Dmitriy Alekseevich, candidate of technical sciences, leading design engineer, prodmyt@rambler.ru, Russia, Tula, SME «Vulkan-TM»

УДК 621.922: 621.921.34

НОВЫЙ КРИТЕРИЙ ОЦЕНКИ КАЧЕСТВА СМЕСЕЙ СЫПУЧИХ МАТЕРИАЛОВ

А.В. Евсеев

Предложен новый критерий оценки качества смесей сыпучих материалов, получаемых по технологии детерминированного формирования их однородности.

Ключевые слова: качество, сыпучий материал, смесевой продукт.

Номенклатура смесевых продуктов постоянно расширяется и требования к ним становятся все более жесткими. Это обстоятельство подталкивает инженеров и ученых создавать новые более современные и совершенные

шенные технологии смешения. Одним из таких направлений является нонмиксинг [1-4]. Данный подход при разработке технологий смешения позволяет получать смеси заданного качества при известных параметрах дозирующих устройств. Его использование позволяет применить новый критерий оценки качества смесей, основанный на учете как входящих параметров – величины дозы и её отклонение, так и выходящих – точности содержания ключевых компонентов и объёма смеси, в котором эта точность выполняется.

Существуют критерии оценки качества смешения сыпучих компонентов [5].

Сводная таблица величин, предложенных различными авторами в качестве критерия оценки качества смеси сыпучих материалов

№ п/п	Название критерия	Формула для расчёта
1	Мера рассеяния M	$M = \frac{1}{\bar{C}} \sum_{i=1}^n \frac{C_i}{n}$
2	Коэффициент неоднородности V_C	$V_C = \frac{100}{\bar{C}} \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$
3	Степень смешивания M	$M = 1 - \frac{S^2 - S_R^2}{S_0^2 - S_R^2}; S_0^2 = p(1-p);$ $S_R^2 = \frac{p(1-p)}{m}$
4	Степень смешения M	$M = \frac{S}{S_0}; S_0 = C_0(1 - C_0)$
5	Стандартное отклонение S	$S = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (C_i - \bar{C})^2}$
6	Степень смешения M	$M = 1 - \frac{S}{S_0}; M = 1 - \left(\frac{S}{S_0}\right)^2$
7	Критерий однородности A	$A = \left(\frac{\log \frac{S_0}{S}}{\log \frac{S_0}{S_R}}\right)^{0,5}; S_R^2 = \frac{pq p(d_3)_p + q(d_3)_q }{g}$
8	Приведённое стандартное отклонение S_{II}	$S_{II} = \frac{S}{S_0}; S_0 = \sqrt{p(p-1)}$

№ п/п	Название критерия	Формула для расчёта
9	Коэффициент изменчивости V	$V = \frac{S}{\bar{C}}$
10	Коэффициент качества J	$J = \frac{\bar{C}}{p}$
11	Относительная дисперсия $\frac{S_p}{P}$	$\frac{S_p}{P} = \frac{1}{g} \left[\left(\frac{1-p}{p} \right)^2 p\gamma_p (1+C_p^2) + q\gamma_q (1+C_p^2) \right]$
12	Дисперсия S_{II}^2	$S_{II}^2 = S^2 - S_R^2; S_R = \frac{pq}{m}$
13	Степень перемешивания M	$M = \ln \frac{100}{x}; \frac{x}{100} = \frac{F_0 - F}{F}$
14	Полнота перемешивания U	$U = \alpha \Delta F = \frac{F}{F_0}$
15	Степень перемешивания M	$M = \log \left[\frac{1}{1 - \left(\frac{S_0}{S} \right)} \right]$
16	Интенсивность сегрегации J_C	$J_C = \frac{S_a^2}{C_a \times C_b} \equiv \frac{S_b^2}{C_a \times C_b}$
17	Степень смешивания M	$M = \frac{S - S_R}{S_0 - S}; S_0^2 = p(1-p); S_R^2 = \frac{p(1-p)}{m}$
18	Мера неупорядоченности η	$\eta = \frac{2\pi\mu \sum_{i=1}^{K_1} r_i^2}{\chi^2}; \chi^2 = \sum_{i=1}^{K_1} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i}$
19	Параметр нецентральности λ^2	$\lambda^2 = n \sum_{i=1}^{K_2} \frac{(v_i - p_i)^2}{p_i}$
20	Степень смещения Φ	$\Phi = v \sum_{i=1}^{K_3} (Z_i - \xi_0)^2; z_i = 2 \arcsin \sqrt{v_i};$ $\xi_0 = 2 \arcsin \sqrt{p_i}$

Примечание. Для удобства в таблице принято единое обозначение одинаковых величин, а не так, как они даются авторами.

Здесь: S_0 – среднее квадратическое отклонение концентрации ключевого компонента в пробах (СКВО) для совершенно несмешанной смеси; S_R – СКВО при рандомальном состоянии смеси, т.е. при максимально возможном в статистическом смысле смешении; S_{II} – истинное значение СКВО смеси; S – измеренное значение СКВО; g – вес пробы; p, g – фактическое весовое относительное содержание компонентов в смеси; $(d_3)_p$; $(d_3)_q$ – эффективный средний размер частиц в пробах соответственно для компонентов p и q ; C_p ; C_q – коэффициенты отклонения веса частиц для компонентов p и q $\left(C_p = \frac{S_p}{\gamma_p}; C_q = \frac{S_q}{\gamma_q} \right)$; γ_p, γ_q – средние значения веса частиц, отнесённые к числу частиц компонентов p и q ; F – поверхность раздела между компонентами к моменту их анализа; F_0 – максимально возможная поверхность раздела между компонентами; x – доля неперемешанной смеси; α – коэффициент пропорциональности; U – вероятность того, что хотя бы один из элементов данной поверхности раздела попадёт в выделенный элементарный объём; ΔF – элемент поверхности раздела между компонентами; m – число частиц в пробе; r_i – кратчайшее расстояние между частицами компонентов; μ – среднее число произвольных точек в единице рассматриваемой площади среза пробы; K_1 – число клеток, на которое разбивается рассматриваемая площадь; χ^2 – величина критерия Пирсона со степенью свободы K_1 , которая превышает с вероятностью α ; ν_i – наблюдаемая частота появления i -го компонента; p_i – заданная частота появления i -го компонента; ν – среднее значение частоты появления величины ν_i для данной серии опытов; K_2 – число смешиваемых компонентов; K_3 – число степеней свободы, равное количеству отбора проб минус число наложенных связей при обработке опыта; S_a, S_b – СКВО концентрации компонентов соответственно по a и b ; \bar{C}_a, \bar{C}_b – среднее значение концентраций компонентов a и b в пробах.

Все эти зависимости подразумевают опосредованное, уже полученное качество, смеси без какой-либо обратной связи. Тем более ни в одной из них нет тех или иных характеристик дозирующих или смесительных устройств. Таким образом, общий подход к формированию однородности смеси носит сугубо вероятностный характер, с возможностью анализа, построения выводов и последовательного изменения технологии смешения для достижения нужных результатов.

Этот подход почти исчерпал себя и не имеет практического совершенствования на рубеже XX – XXI веков.

Предлагаемый подход синтеза смесительной технологии из способа и устройства [1,6,7] детерминированного (гарантированного) формирования однородности, базируется на использовании нового критерия оценки качества смеси, представленного ниже.

Условия, определяющие закладываемый (потребительский) уровень качества продукта. Методика оценки качества. Из поставленных условий [4] предлагается рассматривать следующую зависимость как основу предлагаемого критерия оценки качества двухкомпонентной смеси

$$N = \frac{\pi(1-\alpha)^2 \sigma_0^2}{2m_0^2 \delta^2} \approx \frac{\pi \sigma_0^2}{2m_0^2 \delta^2}.$$

Принимаем

$$N = \frac{\pi(1-\alpha)^2 \sigma_0^2}{2m_0^2 \delta^2},$$

где N – число точек идеального смешения в единичной эффективной выборке со свойствами, определёнными зависимостью; α – вероятность отказа (превышение погрешности содержания ключевого компонента в выборке использования свыше закладываемой δ); m_0, σ_0 – математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение случайной величины – микрообъёма ключевого компонента, δ – погрешность содержания ключевого компонента, которую необходимо обеспечить в выборке использования.

Рассматриваем N и δ как выходные параметры готовой смеси, а m_0 и σ_0 – как параметры смесительного устройства.

Очень часто на практике оказывается, что потребителя смеси интересует наличие определённого компонента в строго ограниченном объёме смеси (часто по ГОСТ), так, например, для медицинских препаратов таким объёмом может стать объём (масса) одной или более таблеток, драже и т.п., в которых содержание конкретного вещества определяет его единичное потребление, дозу, жёстко ограниченную лекарственным воздействием и необходимую в получении. Также в качестве примера могут служить премиксы к комбикормам животных, состоящие из микроэлементов, витаминов, терапевтических препаратов и других биологически активных веществ, необходимых для нормализации роста и развития различных животных начиная от аквариумных рыбок, домашних животных и заканчивая крупным рогатым скотом. Совершенно очевидно, что премиксы для кур и коров должны обеспечивать различное содержание перечисленных веществ в единице объёма (массы) смеси. Можно привести множество примеров [8-10], когда потребители, заказчики смесей производимых однотипными технологическими процессами, накладывают различные требования по содержанию ключевых компонентов в единице объёма смеси.

Таким образом, очевидно, что во многих частных случаях на различных типах производства сыпучих смесей потребительский уровень качества, а именно определённое содержание ключевого компонента в определённом объёме смеси необходимое для удовлетворительного использования или функционирования данного объёма смеси в реальной практике должен определять подход к качественному анализу производимых сыпучих продуктов.

Одним из таких анализов может служить методика, построенная на зависимостях предлагаемой математической модели. В данном случае число элементарных точек идеального смешения N , представляющих собой выборку эффективного (потребительского) использования и обладающих свойствами системы с заранее определёнными показателями δ, m_0, σ_0 и α , может стать критерием оценки качества смеси сыпучих компонентов.

Критерий оценки качества смеси. Можно считать смесь качественной, если

$$V_u \geq V_0,$$

где V_u – объём элементарной выборки эффективного использования определяемой потребителями; $V_0 = N \left(\frac{m_k}{\rho_k} + \frac{M_B}{\rho_H} \right)$ – объём выборки, состоящей из N точек идеального смешения, где m_k, M_B – массы микрообъёмов ключевого компонента и наполнителя в точке идеального смешения; ρ_k, ρ_H – насыпные плотности ключевого (полезного, определяющего) компонента и наполнителя; N – число точек идеального смешения, из которых состоит выборка.

Если учесть, что входящие параметры m_0, σ_0 зависят от свойств и возможностей механической системы питателя-дозатора, а α и N (или его объёмный, массовый эквивалент) определяются потребителями, то манипулируя данными величинами по полученным зависимостям для N и V_0 , можно получить оптимальные или просто возможные условия производства смеси с закладываемыми свойствами при условии соблюдения технологического фактора δ , определяемого функционированием всего устройства для реализации детерминированного способа формирования однородности смеси.

Таким образом, качественной следует считать смесь, в которой для данных параметров её использования выполняется условие

$$V_u \geq N \left(\frac{m_k}{\rho_k} + \frac{M_B}{\rho_H} \right),$$

т.е. размер точки идеального смешения не превышает размера эффективной выборки использования или меньшего в N раз, что является удовлетворительным, причём, чем больше N , тем более качественная смесь получена.

Очевидно, что в случае, когда это условие (равенство) не выполняется на практике следует осуществлять питателями (создающих мелкодисперстные потоки сыпучих компонентов) более мелкую дискретизацию потоков, с целью уменьшения размера точки идеального смешения или группы точек в случаях, когда это требуется.

Вариант оптимизации критерия для многокомпонентной смеси при условии нормальности распределения формирования их доз для смешения.

Рассмотрим случай, когда смесь состоит из $k + 1$ компонент: k компонент – k различных полезных наполнителей, а 1 компонента – балласт.

N -ячейка содержит N масс $m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iN}$ i -ой полезной компоненты смеси ($i = 1, \dots, k$).

Будем считать, что $m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iN}$ при каждой i – случайные величины, распределяемые по нормальному закону с математическим ожиданием m_{i*} и среднеквадратическим отклонением σ_{i*} .

Обозначим A_i событие, состоящее в выполнении неравенства

$$\left| \frac{m_{i1}, m_{i2}, \dots, m_{iN}}{N} - m_{i*} \right| < \delta_i m_{i*},$$

где δ_i – заранее заданная оценка для i -й компоненты.

Ранее было установлено, что вероятность $P(A_i)$ выполнения события A_i оценивается (с точностью до членов порядка δ_i^2) по формуле

$$P(A_i) = \frac{\sqrt{2} \sqrt{N}}{\sqrt{\pi}} \times \frac{m_{i*}}{\sigma_{i*}} \times \delta_i = 1 - \alpha_i \Rightarrow N = \frac{\pi \delta_{i*}^2 (1 - \alpha_i)^2}{2 m_{i*}^2 \delta_i^2} \approx \frac{\pi \delta_{i*}^2}{2 m_{i*}^2 \delta_i^2}. \quad (1)$$

Обозначим найденное значение N через N_i :

$$N = \frac{\pi \delta_{i*}^2}{2 m_{i*}^2 \delta_i^2}; N_i = \left[\frac{\pi \delta_{i*}^2}{2 m_{i*}^2 \delta_i^2} \right] + 1.$$

Из формулы (1) следует, что с ростом N растёт величина $P(A_i)$.

Найдем

$$K = \max(N_1, \dots, N_k).$$

При этом K автоматически будет выполняться оценка (1).

Если процесс смешения полезных веществ и балласта не устроен каким-то специальным образом так, чтобы какие-то из событий A_1, A_2, \dots, A_K зависели друг от друга, то A_1, A_2, \dots, A_K следует считать независимыми и можно оценить вероятность одновременного выполнения этих событий:

$$\begin{aligned}
 P(A_1, A_2, \dots, A_K) &= P(A_1) \times P(A_2) \times \dots \times P(A_k) = \frac{\sqrt{2}\sqrt{N}}{\sqrt{\pi}} \times \frac{m_{1*}}{\sigma_{1*}} \times \delta_1 \times \frac{\sqrt{2}\sqrt{N}}{\sqrt{\pi}} \times \\
 &\times \frac{m_{2*}}{\sigma_{2*}} \times \delta_2 \times \dots \times \frac{\sqrt{2}\sqrt{N}}{\sqrt{\pi}} \times \frac{m_{k*}}{\sigma_{k*}} \times \delta_k = \sqrt{\frac{2N^k}{\pi}} \times \frac{m_{1*}m_{2*} \dots m_{k*}}{\sigma_{1*}\sigma_{2*} \dots \sigma_{k*}} \times \\
 &\times \delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_k = 1 - \alpha \Rightarrow ; \\
 N &= \frac{\pi}{2} \times \sqrt[k]{(1 - \alpha)^2} \times \sqrt[k]{\frac{(\sigma_{1*}\sigma_{2*} \dots \sigma_{k*})^2}{(m_{1*}m_{2*} \dots m_{k*})^2 \times (\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_k)^2}} \approx \\
 &\approx \frac{\pi}{2} \times \sqrt[k]{\frac{(\sigma_{1*}\sigma_{2*} \dots \sigma_{k*})^2}{(m_{1*}m_{2*} \dots m_{k*})^2 \times (\delta_1 \cdot \delta_2 \cdot \dots \cdot \delta_k)^2}}. \quad (2)
 \end{aligned}$$

Если в качестве N взять максимальное из чисел K и N , найденного по формуле (2), то одновременно будут с высокой вероятностью выполнения события

$$P(A_1), \dots, P(A_k) \text{ и } P(A_1 A_2 \dots A_k).$$

Однако следует отметить, что произведение вероятностей событий всегда будет меньше вероятности каждого из них в отдельности. Таким образом диагностировать качество получаемых смесей будет несколько сложнее, так как при учете в методике оценки качества смеси нескольких ключевых компонентов гарантированное качество смеси будет неизменно снижаться. Но при небольшом количестве ключевых компонентов общий порядок показателя качества будет находиться в пределах нормативных документов на соответствующую продукцию [9,10].

Целесообразно проведение соответствующей оптимизации по количеству ключевых компонентов. Возможно объединение нескольких компонентов в один при наличии соответствующих корреляционных связей и зависимостей, основанных на конечном функциональном эффекте их использования. Это хорошо позиционируется в общей теории детерминированного формирования однородности смесей с её точками идеального смешения, а также может быть использовано для введения в смеси трудно-дозированных или трудносмешиваемых компонентов.

Список литературы

1. Евсеев А.В. Классификация нонмиксинговых смесевых продуктов и устройств // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 3. С. 82 – 94.
2. Евсеев А.В, Лобанов А.В. Оценка качества смеси порошковых материалов для изготовления алмазного инструмента на основе физической модели // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2014. Вып. 3. С. 88 – 94.
3. Евсеев А.В., Парамонова М.С. Нонмиксинговые технологии и оборудование для получения многокомпонентных смесей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып.8. Ч.2. С.188 – 194.
4. Евсеев А.В., Парамонова М.С. Постановка задачи математического моделирования процесса детерминированного формирования однородности смеси сыпучих материалов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. Вып. 8. Ч. 2. С. 203 – 208.
5. Макаров Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов. М.: Машиностроение, 1973. 216 с.
6. Патент РФ №2271243. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А.Н. Лукаш, А.В. Евсеев, Т.А. Овчинникова, К.В. Власов, О.В.Карпухина. Опубл. 10.03.06. Бюл. № 7.
7. Патент РФ №2129911. Способ смешения сыпучих компонентов и устройство для его реализации / А.Н. Лукаш, И.А. Клусов, А.В. Евсеев. Опубл. 10.05.99. Бюл. № 13.
8. Александровский А.А., Кафаров В.В., Дорохов И.И. Машины и аппараты химической технологии. Казань, 1975. 382 с.
9. ГОСТ Р 51095 – 97. Премиксы. Технические условия.
10. ГОСТ 30513 – 97. Инструмент абразивный и алмазный.

Евсеев Алексей Владимирович, канд. техн. наук, доц, ews1972@mail.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

A NEW CRITERION OF QUALITY ASSESSMENT OF BULK MATERIALS MIXTURES

A.V. Evseev

A new criterion of assessing the quality of mixtures of bulk materials, obtained by the technology of deterministic forming of their homogeneity, is proposed.

Key words: criteria of quality assessment of mixtures.

Evseev Alexey Vladimirovich, candidate of technical sciences, docent, ews1972@mail.ru, Russia, Tula, Tula State University