

УДК 621.929

## **Взаимосвязь между параметрами дискретного дозирования и динамическими характеристиками смесителя**

*Канд. техн. наук* **Ратников С.А.** tanyrat@mail.ru,  
*канд. техн. наук* **Шушпанников А.Б.** 3089961@mail.ru,

**Шушпанников Е.А.**, *д-р техн. наук* **Иванец Г.Е.**

*Кемеровский технологический институт пищевой промышленности  
650056, г. Кемерово, Строителей б-р., 47*

*При проведении процесса в непрерывном режиме, с уменьшением доли ингредиента в общей массе сыпучей композиции, возникают трудности его непрерывной подачи в смеситель. В этом случае следует перейти на его дискретное дозирование, осуществляемое с помощью стаканчиковых дозаторов. Но здесь существует ограничение на объем мерников, вызванное нестабильностью их наполнения и опорожнения. Поэтому при дальнейшем уменьшении заданного расхода, увеличивают период следования импульсов, что, в свою очередь, ведет к необходимости роста сглаживающей способности смесителя. Последнее достигается либо путем увеличения рабочего объема аппарата, либо приближением, тем или иным способом, его свойств к модели «идеального смешивания».*

*В статье рассмотрена взаимосвязь динамических характеристик смесителя сыпучих материалов непрерывного действия и параметров импульсов, генерируемых дискретным дозатором. Показано, что период их следования должен быть короче среднего времени пребывания частиц в аппарате.*

*Результаты работы могут быть полезны в разных отраслях народного хозяйства при проектировании устройств и технологических процессов получения сыпучих композиций.*

*Ключевые слова:* смеситель непрерывного действия, дискретное дозирование, сыпучий материал, среднее время пребывания.

---

## **The relationship between discrete dosing parameters and dynamic characteristics of the mixer**

*Ph.D.* **Ratnikov S.A.** tanyrat@mail.ru, *Ph.D.* **Shushpannikov A.B.** 3089961@mail.ru,

**Shushpannikov E.A.**, *D.Sc.* **Ivanets G.E.**

*«Kemerovo technological institute of food industry»  
650056, Kemerovo, Builders bv., 47*

*In continuous mode of operation, with a decrease of the ingredient proportion in the total bulk composition weight, some difficulties arise in its continuous feeding to the mixer. In this case, it's advisable to change over to its discrete dosing, carried out with the help of cup dispensers. But there is a limit on the amount of measuring tanks caused by the instability of their filling and emptying. Therefore, with further decrease in predetermined flow rate, the pulse repetition period increases, which in turn leads to the need to increase the smoothing ability of the mixer. The latter is achieved either by increasing the working volume of the machine, or its properties approach, by some means, to the model of the "ideal mix".*

*The relationship between dynamic characteristics of the continuous bulk material mixer and the pulse parameters generated by the discrete dispenser are considered in the article. It is shown that their repetition period should be shorter than the average particle residence time.*

*The results can be useful in various sectors of the economy for the design of devices and processes for production of bulk compositions.*

*Keywords:* continuous mixer, discrete dosing, bulk material, the average residence time.

Получение качественной продукции при наибольшей интенсивности и эффективности процесса, минимуме брака и потерь сырья – основная задача управления, которое начинается уже на стадиях планирования и проектирования устройств и технологических процессов с целью поиска оптимальных решений. В этом смысле, процесс смешивания сыпучих материалов, широко применяемый в технологических цепочках, не является исключением.

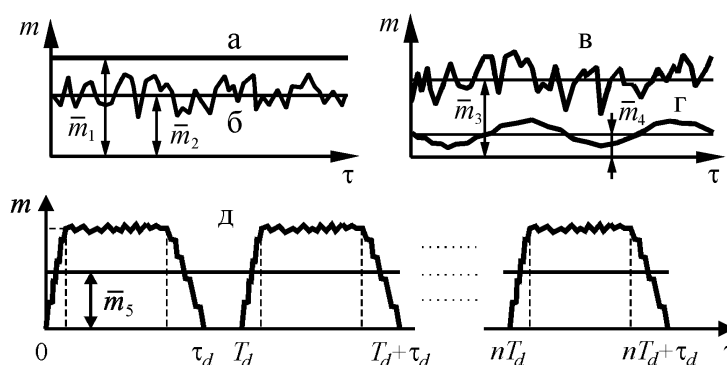
Наибольшее влияние на получение однородных сыпучих композиций оказывают: способ воздействия на массу, физико-механические характеристики ингредиентов, их соотношение и равномерность подачи в смеситель. Последний фактор ярко выражен в непрерывных процессах.

В идеале, массовый расход составляющих  $m_i$  должен быть постоянным  $\bar{m}_i$  (рис. 1, а), но в действительности дозирование является стохастическим процессом (рис. 1, б). Зачастую на высокочастотный сигнал накладывается и низкочастотный (рис. 1, в), который на рис. 1, г представлен в виде, близком к гармоническому.

С уменьшением доли ингредиента в общей массе необходимо уменьшать и его расход  $\bar{m}_i$ , но при достижении некоторого минимума возникают трудности его непрерывной подачи. Тогда следует перейти на дискретное объёмное дозирование, осуществляемое с помощью стаканчиковых дозаторов, которые в целом генерируют цепочку стабильных трапецеидальных импульсов (рис. 1, д) с погрешностью дозирования, обычно не превышающей 2%. Но и здесь существует ограничение на объем мерников, вызванное нестабильностью их наполнения и опорожнения. Поэтому при дальнейшем уменьшении заданного расхода  $\bar{m}_i$  (доли ингредиента в рецептуре), необходимо увеличивать период  $T_d$ , что, в свою очередь, ведет к необходимости роста сглаживающей способности смесителя. Это достигается либо путем увеличения рабочего объема аппарата, либо приближением, тем или иным способом, его свойств к модели «идеального смешивания».

$$\bar{m}_i = M_i / T_d, \text{ кг/с}, \tag{1}$$

где  $M_i$  – масса порции ингредиента, кг.

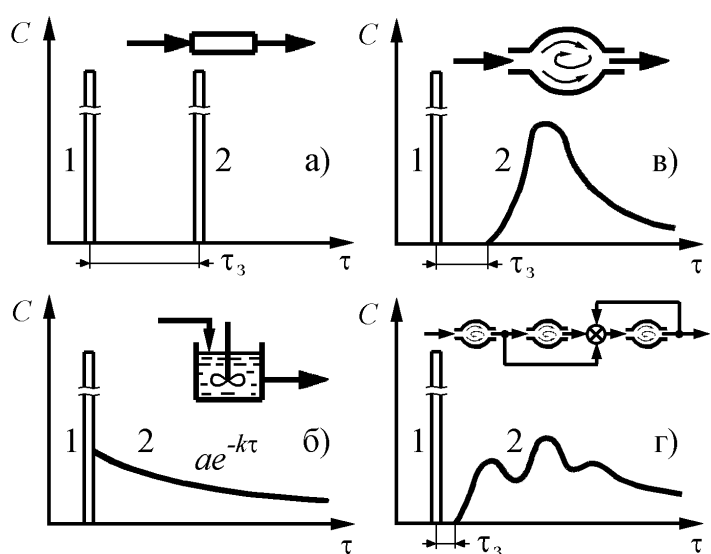


**Рис. 1. Некоторые формы сигналов, генерируемых дозаторами:**  
**а – постоянный сигнал; б, в – случайные сигналы; г – «синусоидальный» сигнал;**  
**д – «трапецеидальный» сигнал;  $\bar{m}_i$  – средний массовый расход материала, выходящего из дозатора;**  
 **$\tau$  – время;  $\tau_d$  и  $T_d$  – продолжительность и период следования импульсов**

Настоящая работа направлена на установление принципиальной взаимосвязи динамических характеристик смесителя и параметров дискретного дозирования в непрерывном режиме на примере идеализированных свойств оборудования. Одним из них является «идеальное смешивание», вторым –  $\delta$ -импульс, который в реальности возникает при его продолжительности  $\tau_i$  более чем в 10 раз (скважность) короче периода дозирования  $T_d$ . Если такой материальный сигнал подать на вход смесителя, то по виду и параметрам «отклика» судят о динамических свойствах аппарата [1].

На рис. 2 представлены кривые «отклика» 2 ( $C(\tau)$  - кривые) смесителей различных типов на импульсное возмущение 1. При этом площади под кривыми 2, эквивалентные массе введенного «ключевого» компонента, равны площадям соответствующих входных  $\delta$ -импульсов 1.

Реальные смесители непрерывного действия с более пологой  $C(\tau)$ -кривой менее чувствительны к погрешностям питания, т.е. их способность сглаживать флуктуации выше. Чем больше емкость аппарата, тем менее он чувствителен к погрешностям питания, но с увеличением количества материала в нем, значительно растут его металло- и энергоемкость. Поэтому следует увеличивать инерционность смесителей не за счет увеличения их габаритов, а за счет организации в нем директивного перемещения материала (рис. 2, г), т. е. наряду с прямоочным его перемещением формировать потоки рециркуляции и опережения (байпасирования) [2, 3, 4]. Байпасы позволяют сократить интервал запаздывания  $\tau_3$ . Рециркуляция делает возможным варьировать в широком диапазоне продолжительность нахождения материала в устройстве. Вместе они приближают реальное распределение времени пребывания частиц в смесителе к показательному закону, которым характеризуется аппарат «идеального смешивания». Это позитивно влияет на однородность получаемой композиции, а также в меньшей степени увеличивают энергоемкость процесса и размеры устройства.



**Рис. 2. Формы кривых «отклика» аппарата на импульсное возмущение.**  
**а – аппарат «идеального вытеснения»; б – аппарат «идеального смешения»;**  
**в, г – реальные аппараты;**  
**1 – входной  $\delta$ -импульс; 2 – концентрационные  $C(\tau)$ -кривые;**  
**а, к – коэффициенты интенсивности, учитывающие «обновление» материала в аппарате;**  
 **$\tau$  – время;  $\tau_3$  – интервал запаздывания**

В этой связи нами разработаны 16 оригинальных конструкций центробежных и вибрационных смесителей, защищенные авторскими свидетельствами и патентами на изобретение [5, 6]. В большинстве из них воплощен принцип направленного движения материальных потоков внутри аппарата, сочетающий основное движение частиц материала с их перемещением по каналам рециркуляции и опережения. Кроме того, в этих смесителях удалось реализовать перспективное направление переработки сыпучих материалов – смешивание в тонких слоях. Также нами накоплен большой опыт теоретического и экспериментального изучения процесса смешивания сыпучих материалов в непрерывном режиме. Математической базой исследований являются элементы кибернетического подхода и корреляционного анализа.

Итак, предположим, что мы используем устройство близкое к модели «идеального смешения». Для последнего характерны экспоненциальные формы  $C(\tau)$ -кривых и кривых распределения плотности вероятности  $f(\tau)$  времени пребывания частиц материала в аппарате:

$$C(\tau) = ae^{-k\tau}, \text{ кг/кг}, \tag{2}$$

$$f(\tau) = ke^{-k\tau}, \text{ с}^{-1}, \tag{3}$$

где  $\tau$  – время, с; а и к – коэффициенты интенсивности.

Коэффициент интенсивности к, с размерностью обратной времени, можно определить как:

$$k = n / M, \text{ с}^{-1}, \tag{4}$$

где  $m$  – производительность смесителя, кг/с;  $M$  – масса, находящегося в нем материала, кг.

При этом среднее время пребывания  $\tau$  материала (математическое ожидание) связано с коэффициентом интенсивности  $k$  следующим образом:

$$\tau = k^{-1}, \text{ с}, \tag{5}$$

Однако, даже «идеальный» аппарат не может обеспечить высокую однородность состава готовой композиции при нарушении согласованности и бесперебойности подачи исходных компонентов в условиях непрерывного смесеприготовления. Например, если на его вход поступает пульсирующий поток материала 1 (рис. 3), то в стационарном режиме на выходе будет фиксироваться изменение концентрации трассера, подобное экспоненциальным кривым 2. Чем больше период следования  $T_d$ , короче импульс и меньше сглаживающая способность смесителя, тем больше концентрационный перепад  $\Delta C$ , а, значит, и коэффициент вариации  $V_c$ , которым оценивают однородность композиции.

Коэффициент вариации  $V_c$  безразмерная величина и не зависит от коэффициентов интенсивности  $a$  и  $k$ . Его расчет произведем численным методом в среде Mathcad, воспользовавшись выражениями (3) и (5) относительно безразмерного времени  $\theta = t/\tau$ . Зависимость  $V_c(\theta)$  представлена на рис. 4.

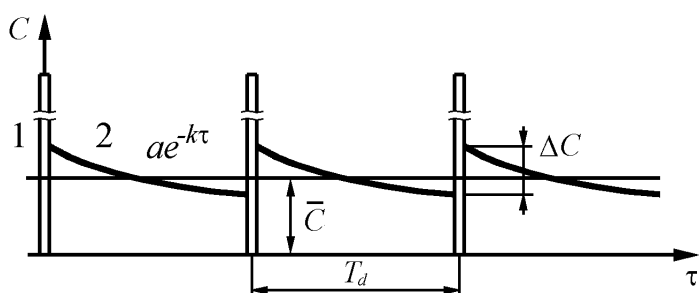


Рис. 3. Кривые отклика аппарата «идеального смешения» на цепочку входных  $\delta$ -импульсов:

- 1 – входной сигнал типа  $\delta$ -функции;
- 2 – кривая «отклика смесителя»;
- $\bar{C}$  – средняя концентрация трассера;
- $a, k$  – коэффициенты интенсивности

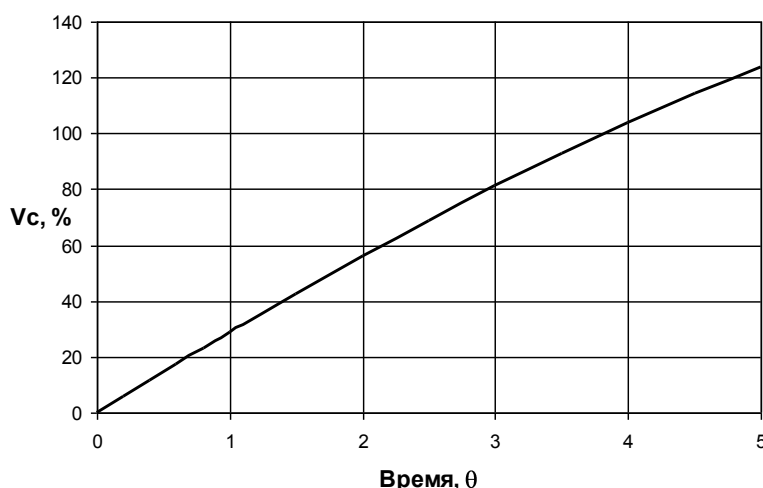


Рис. 4. Значения коэффициента вариации  $V_c(\theta)$

$\theta = t/\tau$ ;  $\tau$  – время, с;  $\tau$  – среднее время пребывания, с

Традиционно считается, что смесь становится неудовлетворительного качества, если значение коэффициента вариации превышает 30 %. На графике этому значению соответствует  $\theta = 1$ . Поэтому можно утверждать: для того, чтобы «идеальный смеситель» эффективно сглаживал скачки концентрации «ключевого» компонента, период следования узких импульсов ( $T_d/\tau_l \geq 10$ ) не должен превышать  $\theta = [V_c(1) = 30]$ , т.е.

быть короче среднего времени пребывания  $\tau$  материала в аппарате ( $T_d \leq \tau$ ). Этому правилу следует придерживаться и при проектировании реальных смесеприготовительных агрегатов.

Таким образом, зная рецептуру композиции и динамические характеристики смесителя (среднее время нахождения материала и накопительную способность), можно оценить параметры дискретного дозирования (величину порций и период их следования) для гарантированного получения смеси с требуемой однородностью. Допустимо и решение обратной задачи, когда известны динамические характеристики смесителя и параметры дискретного дозирования. В этом случае можно прогнозировать предельное содержание компонентов в смеси соответствующие требуемому качеству готовой композиции.

### Список литературы

1. Шушпанников А.Б., Федосенков Б.А., Дороганов В.П., Рынза О.П. Основные направления при разработке непрерывно действующих смесеприготовительных агрегатов // *Техника и технология пищевых производств*. 2010. № 3. С. 136-143.
2. Ратников С.А., Бородулин Д.М., Аверкин С.В., Маньянов В.И. Прогнозирование качества смешивания компонентов при получении сыпучих комбинированных продуктов // *Хранение и переработка сельхозсырья*. 2005. № 9. С. 61–62.
3. Ратников С.А., Бородулин Д.М. Анализ работы смесителя центробежного типа для получения многокомпонентных сыпучих композиций методом последовательного разбавления // *Химическая промышленность сегодня*. 2007. № 1. С. 33–34.
4. Бородулин Д.М. Прогнозирование сглаживающей способности центробежного смесителя на основе корреляционного анализа // *Техника и технология пищевых производств*. 2009. № 4. С. 39–42.
5. Бородулин Д.М., Иванец В.Н., Андриюшков А.А. Тенденции развития смесительного оборудования непрерывного действия центробежного типа // *Техника и технология пищевых производств*. 2011. № 1. С. 67-71.
6. Шушпанников А.Б., Бородулин Д.М., Злобин С.В., Рокосов С.Ю. Особенности конструкций подъемных винтовых вибрационных смесителей непрерывного действия // *Техника и технология пищевых производств*. 2013. № 2. С. 102-106.

### References

1. Shushpannikov A.B., Fedosenkov B.A., Doroganov V.P., Rynza O.P. Osnovnye napravleniya pri razrabotke nepreryvno deistvuyushchikh smesepriготовitel'nykh agregatov. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2010. № 3. p. 136-143.
2. Ratnikov S.A., Borodulin D.M., Averkin S.V., Man'yanov V.I. Prognozirovanie kachestva smeshivaniya komponentov pri poluchenii sypuchikh kombinirovannykh produktov. *Khranenie i pererabotka sel'khozsyrya*. 2005. № 9. p. 61–62.
3. Ratnikov S.A., Borodulin D.M. Analiz raboty smesitelya tsentrobezhnogo tipa dlya polucheniya mnogokomponentnykh sypuchikh kompozitsii metodom posledovatel'nogo razbavleniya. *Khimicheskaya promyshlennost' segodnya*. 2007. № 1. p. 33–34.
4. Borodulin D.M. Prognozirovanie sglazhivayushchei sposobnosti tsentrobezhnogo smesitelya na osnove korrelyatsionnogo analiza. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2009. № 4. p. 39–42.
5. Borodulin D.M., Ivanets V.N., Andryushkov A.A. Tendentsii razvitiya smesitel'nogo oborudovaniya nepreryvnogo deistviya tsentrobezhnogo tipa. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2011. № 1. p. 67-71.
6. Shushpannikov A.B., Borodulin D.M., Zlobin S.V., Rokosov S.Yu. Osobennosti konstruktсии pod"emnykh vintovykh vibratsionnykh smesitelei nepreryvnogo deistviya. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv*. 2013. № 2. p. 102-106.