УДК 621.929.2/.9

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ СМЕСИТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ ПУТЕМ НАПРАВЛЕННОГО ФОРМИРОВАНИЯ РЕЖИМОВ ДОЗИРОВАНИЯ

Иванец В.Н., Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В.

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», Кемерово, e-mail: office@kemtipp.ru

Исследованы пути направленного создания режимов дозирования, при которых достигается требуемая степень сглаживания входных воздействий, обусловленная инерционными характеристиками смесителя. Для определения характера протекания процесса изменения концентрации на выходе из аппарата при разных видах входных воздействий были проведены расчеты временных характеристик. Для этого были разработаны математические модели смесительного агрегата. Установлено, что в смесительных аппаратах непрерывного действия возникают так называемые абсолютно-колебательные режимы, которые приводят к периодическому перераспределению материала по концентрации. При изучении реакции аппарата на непрерывно-колебательные сигналы входной концентрации проведен анализ режимов их работы в частотной области. Он дает возможность оценить сглаживающие свойства смесителя при заданных уровнях входной концентрации. Также было прослежено, как меняется степень сглаживания смесителей на разных частотах, и определены значения периодичности работы дозаторов для обеспечения требуемых величин сглаживания.

Ключевые слова: процесс смешивания, режим дозирования, смеситель непрерывного действия, концентрация, непрерывно-колебательные сигналы

IMPROVING PROCESS OF MIXING BY TOWARDS THE FORMATION OF THE DOSING REGIMEN

Ivanets V.N., Borodulin D.M., Sukhorukov D.V.

The Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), Kemerovo, e-mail: office@kemtipp.ru

We explored ways to create directional dosing regimens in which the desired degree of smoothing input actions due to inertia characteristics of the mixer. To determine the nature of the process of change of concentration at the outlet of the device in different types of input actions we calculated the temporal characteristics. To this end, we have developed a mathematical model of the mixing unit. We have found that in a continuous mixing apparatus having so-called absolute-vibrational modes which cause a periodic redistribution of material concentration. In the study of the reaction apparatus for continuously oscillating signal input concentration analysis of their operation modes in the frequency domain. It provides an opportunity to evaluate the smoothing properties of the mixer at a given level input concentration. Also, we determined how the degree of smoothing mixers at different frequencies and the values of the frequency of dosing works to provide the required quantities of smoothing.

Keywords: the process of mixing, dosing regimen, continuous mixer, concentration, absolute-vibrational

В настоящее время резко возросли требования, предъявляемые к качеству смесей, так как последнее во многом определяет физико-механические и вкусовые характеристики конечного продукта. Поэтому в новых и реконструируемых производствах целесообразно использовать смесители непрерывного действия (СНД), оснащенные соответствующими дозирующими устройствами. Однако этому вопросу не уделялось достаточного внимания, в частности не изучено влияние входных сигналов, формируемых дозаторами, и характеристик СНД на качество конечной смеси.

Цель исследования – определить характер протекания процесса изменения концентрации на выходе из аппарата при разных видах входных воздействий.

Материал и методы исследования

Нами исследованы возможности СНД центробежного, вибрационного и барабанного типов по сглаживанию флуктуации сложных входных воздействий, поступающих от дозаторов непрерывно-гармонического, постоянного и дискретного типов. Для определения характера протекания процесса изменения концентрации на выходе СНД при разных видах входных воздействий были проведены расчеты временных характеристик. Для этого были разработаны математические модели смесительного агрегата (СА), информация о которых была помещена в соответствующие файлы машинной памяти. При реализации переходных процессов, протекающих в СНД с разными инерционными свойствами, было выявлено, что в случае непрерывно-переменного дозирования происходит наложение «фона», определяемого уровнем сигналов загрузки и переменной составляющей при частоте дозирования $\omega = 0{,}1\ c^{-1}$; $\omega = 0{,}5\ c^{-1}$ и $\omega = 1\ c^{-1}$.

Результаты исследования и их обсуждение

Абсолютное значение флуктуации концентрации на выходе СНД можно найти по его частотной характеристике. Во время переходного процесса слияние колебательного характера переменной составляющей на форму выходного сигнала с течением

времени увеличивается вследствие уменьшающейся производной постоянной составляющей выходной концентрации. Переменная составляющая становится при времени, сопоставимом с длительностью переходного процесса, примерно равной значению амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) на данной частоте с учетом реальной амплитуды дозирования. При этом производная $C'_{вых}(t)$ меняется так, как показано на рис. 1. На начальном участке переходного процесса абсолютное значение концентрации не уменьшается даже при заметных периодических флуктуациях, так как влияние постоянной составляющей («фона») на выходную концентрацию гораздо сильнее, чем переменной. Это происходит за счет воздействия больших, хотя и снижающихся с течением времени, значений производной постоянной составляющей. На участке установившегося режима концентрация носит колебательный характер. Это объясняется более сильным влиянием переменной составляющей на форму выходной концентрации.

При протекании переходного процесса в смесителе, начиная с некоторого момента времени $t_{кол}$, в выходной концентрации возникают флуктуации, периодически уменьшающие ее абсолютную величину (рис. 2).

Это обстоятельство приводит к возникновению физико-механических явлений распределения материала по концентрации, что в принципе замедляет процесс получения смеси требуемого качества на стабильном уровне. По результатам моделирования найдена зависимость момента времени перехода смесителя в «абсолютно-колебательный» режим от частоты переменного дозирования. Таким образом, для получения хорошего сглаживания входных флуктуаций и ускорения процесса смесеприготовления рекомендуется повышать величину $t_{кол}$, что соответствует увеличению частоты дозирования в непрерывно-переменном режиме. Определение фильтрующих свойств смесителей можно рассматривать в виде квазиоптимизации степени сглаживания путем изменения постоянных времени передаточной функции (ПФ) T_1 и T_2 [1, 2]. С целью исследования фильтрующих свойств смесителей нами рассчитывались их годографы в диапазоне частот $\omega = 0{,}01–10$ с$^{-1}$.

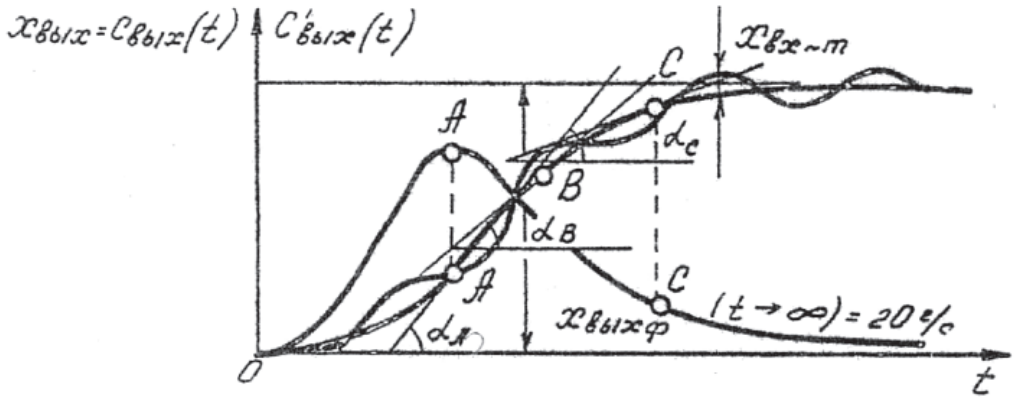

Рис. 1. Графики переходного процесса в СНД и производной выходной концентрации

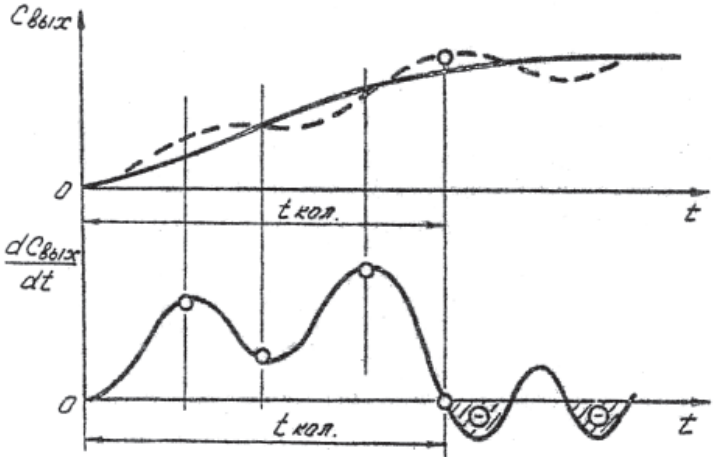

Рис. 2. Схема возникновения колебательного режима в СНД

Соотношение величины T_2^{I} относительно базовой постоянной $T_2^{\text{I}} = 10{,}9$ с при моделировании принимало следующие значения.

$$T_2^{\text{II}} = T_2^{\text{I}} - 42\%\left(T_2^{\text{I}}\right); \quad 1{,}0 < f = T_1/2T_2;$$

$$T_2^{\text{III}} = T_2^{\text{I}} + 62\%\left(T_2^{\text{I}}\right).$$

При этом время моделирования изменялось от 100 до 315 с. При работе вибрационного СНД, коэффициент демпфирования f которого равен 0,92, концентрация смеси на выходе, приближаясь к уровню «насыщения», начинает с течением времени флуктуировать, постепенно стабилизируясь на нем. В этом случае чем меньше значение коэффициента f вибрационного СНД, тем сильнее выражены его колебательные свойства, т.е. тем слабее затухают флуктуации концентрации смеси и тем больше начальные амплитуды колебаний (полуразмахи). Частота работы смесителя, на которой происходят демпфированные колебания концентрации, равна

$$\omega = q\sqrt{1-f^2} = 0{,}04\sqrt{1-0{,}92^2} = \\ = 0{,}016\ \text{с}^{-1} < q = 0{,}04\ \text{с}^{-1}; \qquad (1)$$

$T = T_2 = 22{,}5$ с – основная постоянная времени.

Параметр затухания флуктуации концентрации $\alpha = f{\cdot}q = 0{,}037$ с$^{-1}$ отражает скорость уменьшения полуразмахов колебаний с учетом собственных частотных (колебательных) свойств смесителя. Частота демпфированных колебаний характеризует снижение скорости флуктуационного процесса изменения концентрации смеси.

Для барабанного СНД значение коэффициента $f = 0{,}83$. Отсюда следует, что он является аппаратом типа низкочастотного фильтра с относительно высокими, в отношении динамики, колебательными свойствами. Это определяется относительно малыми значениями постоянной времени T_2, которая характеризует рост величины концентрации (в случае ступенчатого ввода материала из дозатора) на начальном участке переходной функции смесителя и постоянной времени T_1, определяющей увеличение концентрации после точки перегиба, на подходе к зоне «флуктуационного насыщения». Характер кривой переходного процесса у него тот же, что и для вибросмесителя. Разница заключается в том, что время выхода смесителя на требуемый уровень концентрации для аппарата барабанного типа существенно меньше.

С целью комплексного изучения фильтрующих свойств смесителей нами было проведено цифровое моделирование процессов в них на базе прикладного пакета программ MathCAD.

При изучении реакции СНД на непрерывно-колебательные сигналы входной концентрации проведен анализ режимов их работы в частотной области. Он дает возможность оценить сглаживающие свойства СНД при заданных уровнях входной концентрации. По результатам моделирования работы смесителей, обладающих разными инерционными параметрами, построены годографы частотных ПФ. На основании их анализа было прослежено, как меняется степень сглаживания смесителей на разных частотах (таблица) и определены значения периодичности работы дозаторов для обеспечения требуемых величин сглаживания.

Рассмотрим процессы смесеприготовления при непрерывно-переменной загрузке смесителей. Для надежного определения зависимостей начала входа СНД в абсолютно-колебательный режим от периода переменной составляющей дозирования следует брать моменты времени t_K, принимаемые в качестве искомой величины $t_{\text{кол}}$, удовлетворяющей условию

$$(2\text{–}3)T \le t_{\text{пп}} \le t_{\text{к}}$$

или

$$\frac{6\prod}{\omega} \le t_{\text{пп}} \le t_{\text{к}}, \qquad (2)$$

где $t_{\text{к}}$ – текущие моменты временя на временной характеристике СНД; $t_{\text{пп}}$ – время переходного процесса.

Если период T переменной составляющей слишком велик и не удовлетворяет условию (1), то момент $t_{\text{кол}}$ полностью определяется временем достижения максимальной концентрации с учетом чистого запаздывания СНД. Параметры T_1 и T_2 в этом случае не играют решающего значения, так как входные флуктуации на такой малой частоте дозирования сглаживаются слабо, что и порождает моменты $t_{\text{кол}}$ относительно большие, чем можно было бы ожидать при выполнении условия (1). Если $(2\text{–}3)\text{T} > t_{\text{пп}}$, то это значит, что инерционность смесителя соизмерима с инерцией фронтов в переменной составляющей и кривая $x_{\text{вых}}(t)$ полностью определяется формой последней. Графики $t_{\text{кол}} = f_1(\omega)$ и $f_{\text{кол}} = f_2(\omega)$ позволяют выявить зависимость момента «входа» СНД в абсолютно-колебательный режим при изменении частоты непрерывно-гармонического дозирования.

Сравнительная оценка величины сглаживания (S^{-1}) пульсаций входного потока смесителя с различными инерционными параметрами. Максимальная фаза (при ω = 10 с$^{-1}$), град.

	–354,2	–353,7	–352,3	–353,3	–351,8	–349,6	–354,7	–354,4	–353,6
	Мин. фаза, град.					Параметры смесителей			
	–17,62	–22,73	–35,88	–11,15	–17,06	–24,94	–24,21	–34,58	–50,09
	T_2 = 10,9 с			T_2 = 6,3 с			T_2 = 17,98 с		
	T_1, с			T_1, с			T_1, с		
ω	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,01	0,9787	0,9518	0,8466	0,9935	0,9733	0,9304	0,9625	0,8791	0,7018
0,05	0,7653	0,5203	0,3077	0,8643	0,6447	0,4513	0,525	0,333	0,1906
0,1	0,3833	0,2797	0,1557	0,6368	0,3859	0,2448	0,2277	0,1567	0,0935
0,25	0,1085	0,0903	0,0575	0,2538	0,1537	0,0974	0,0469	0,0407	0,0306
1	0,0082	0,0812	0,00745	0,0242	0,0216	0,0178	0,00308	0,00305	0,00295
10	$0,84\cdot10^4$	$0,84\cdot10^4$	$0,84\cdot10^3$	$0,25\cdot10^3$	$0,25\cdot10^3$	$0,25\cdot10^3$	$0,3\cdot10^4$	$3,09\cdot10^5$	$3,09\cdot10^5$

Выводы

Установлено, что в СНД возникают так называемые абсолютно-колебательные режимы, которые приводят к периодическому перераспределению материала по концентрации. Определены зависимости момента входа в них от частоты дозирования, что позволяет выбрать его рациональный режим и тем самым уменьшить время процесса смесеприготовления.

Список литературы

1. Бородулин Д.М. Разработка и математическое моделирование непрерывнодействующих смесительных агрегатов центробежного типа для переработки сыпучих материалов. Обобщенная теория и анализ (кибернетический подход) // Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – Кемерово, 2013. – 207 с.

2. Иванец В.Н. Анализ частотно-временных характеристик смесителя непрерывного действия центробежного типа / Иванец В.Н., Бородулин Д.М., Жуков А.Н. // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2004. – № 2. – С. 52–54.

3. Пат. 2508937 РФ, Барабанный смеситель / Бородулин Д.М. Иванец В. Н.; заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 2012120803/05; заявл. 03.07.12; опубл 10.03.2014, Бюл. № 7.

4. Пат. 2455058 РФ, Центробежный смеситель / Бородулин Д.М. Иванец В.Н., Андрюшков А.А. заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 2010150753/05; заявл. 10.12.10; опубл 10.07.2012, Бюл. № 19.

5. Пат. 2488435 РФ, Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., Потапов А.Н., Злобин С.В., Рынза О.П. заявитель и патентообладатель Кемеровский технологический институт пищевой промышленности. – № 2012105486/05; заявл. 16.02.12; опубл 27.07.2013, Бюл. № 16.

6. Харитонов, В.Д. Моделирование смесительного агрегата центробежного типа на основе кибернетического подхода / Харитонов В.Д., Бородулин Д.М., Сухоруков Д.В., Комаров С.С. // Молочная промышленность. – 2013. – № 7. – С 77–79.

References

1. Borodulin D.M. Razrabotka i matematicheskoe modelirovanie nepreryvnodejstvujushhih smesitelnyh agregatov centrobezhnogo tipa dlja pererabotki sypuchih materialov. Obobshhennaja teorija i analiz (kiberneticheskij podhod) // Kemerovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti. Kemerovo, 2013. 207 p.

2. Ivanec V.N. Analiz chastotno-vremennyh harakteristik smesitelja nepreryvnogo dejstvija centrobezhnogo tipa / Ivanec V.N., Borodulin D.M., Zhukov A.N. // Hranenie i pererabotka selhozsyrja. 2004. no. 2. pp. 52–54.

3. Pat. 2508937 RF, Barabannyj smesitel / Borodulin D.M. Ivanec V.N.; zajavitel i patentoobladatel Kemerovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti. no. 2012120803/05; zajavl. 03.07.12; opubl 10.03.2014, Bjul. no. 7.

4. Pat. 2455058 RF, Centrobezhnyj smesitel / Borodulin D.M. Ivanec V.N., Andrjushkov A.A. zajavitel i patentoobladatel Kemerovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti. no. 2010150753/05; zajavl. 10.12.10; opubl 10.07.2012, Bjul. no. 19.

5. Pat. 2488435 RF, Vibracionnyj smesitel / Shushpannikov A.B., Potapov A.N., Zlobin S.V., Rynza O.P. zajavitel i patentoobladatel Kemerovskij tehnologicheskij institut pishhevoj promyshlennosti. no. 2012105486/05; zajavl. 16.02.12; opubl 27.07.2013, Bjul. no. 16.

6. Haritonov, V.D. Modelirovanie smesitelnogo agregata centrobezhnogo tipa na osnove kiberneticheskogo podhoda / Haritonov V.D., Borodulin D.M., Suhorukov D.V., Komarov S.S. // Molochnaja promyshlennost. 2013. no. 7. pp. 77–79.

Рецензенты:

Зайцев А.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая механика», ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет», г. Ярославль;

Попов А.М., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Прикладная механика», ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», г. Кемерово.

Работа поступила в редакцию 10.04.2015.