

УДК 664:621.6.04:621.929

В.Н. Иванец, И.А. Бакин, О.С. Карнадуд, А.В. Сибиль**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СХЕМ ДВИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛЬНЫХ ПОТОКОВ
В СМЕСЕПРИГОТОВИТЕЛЬНОМ АГРЕГАТЕ**

На основе кибернетических концепций проведено сравнение различных схем движения материальных потоков в новой конструкции центробежного смесителя. Опытным путем найдены значения параметров передаточных функций исследуемой конструкции смесителя и смесеприготовительного агрегата в целом. Изучены и выявлены рациональные параметры процесса смешивания, обеспечивающие максимальное сглаживание флуктуаций питающих потоков.

Смешивание, кибернетический подход, центробежный смеситель, дозирование.

Введение

Во многих отраслях агропромышленного комплекса процесс смешивания сыпучих дисперсных материалов является основой технологии приготовления комбинированных продуктов, а также целого ряда полуфабрикатов. Аппараты для дозирования и смешивания ингредиентов различаются по конструктивному исполнению и способу организации процесса. Исходя из требуемого качества получаемых смесей при минимальных энергозатратах, процессы дозирования и смешивания сыпучих материалов могут быть достаточно просто конструктивно реализованы в непрерывнодействующих смесеприготовительных агрегатах (НСА) с использованием аппаратов центробежного типа. Однако применение НСА в промышленных масштабах сдерживается экономическими факторами, обусловленными необходимостью комплектации оборудования дорогостоящими автоматическими весовыми дозирующими устройствами. Комплектация же агрегатов объемными дозаторами позволит значительно уменьшить стоимость оборудования.

Трудности, возникающие при приготовлении смесей заданного качества в НСА с дозирующими устройствами объемного типа, связаны с необходимостью сглаживания флуктуаций материальных потоков, входящих в смеситель. Поэтому нужно знать вид и структуру движения материальных потоков, как формируемых дозирующими устройствами, так и на выходе из смесителя.

Объекты и методы исследования. Для изучения и анализа структуры материальных потоков в НСА используются аналитические и экспериментальные методы. Аналитические методы заключаются в теоретических исследованиях характеристик объекта и построении математической модели на основе законов сохранения массы и энергии системы. Однако на практике это длительный, трудоемкий и требующий применения численного анализа и сложной компьютерной обработки процесс [1]. Экспериментальные методы базируются на проведении ряда опытов на реальном объекте, что требует временные и материальные затраты. После обработки экспериментальных данных определяется структура модели, рассчитываются ее оптимальные параметры. Используя этот метод, можно получить довольно точное математическое описание процесса, при этом значения

входных параметров объекта ограничены рамками диапазона, в котором проводится эксперимент.

В настоящее время наиболее часто используются комбинированные методы исследования, в их числе исследование статических и динамических (частотных и временных) характеристик объектов. При этом подходе анализируются различные реальные ситуации на созданной модели, в результате получают сравнительные оценки нескольких вариантов структурных схем, зависимость показателя эффективности процесса от начальных условий и изменений параметров системы. Неизвестные параметры анализируемой структуры объекта уточняются экспериментальным путем. Динамические свойства изучаемых объектов наиболее точно отражают частотные характеристики [2].

Выявить влияние флуктуаций материальных потоков при дозировании исходных компонентов на качество смесеобразования позволяют кибернетические методы [3], основанные на определении функции распределения времени пребывания (ФРВП) частиц в аппарате. В работах [2, 4] для исследования динамических характеристик непрерывнодействующих смесителей использован подход, при котором НСА описан как управляемая динамическая система. Смеситель в этом случае представлялся как динамическая структура, преобразующая случайную функцию $x(t)$ на входе в случайную функцию $y(t)$ на выходе: $y(t) = A[x(t)]$, где A – оператор, под которым понимают процедуру преобразования случайной функции или моделей, описываемых системами дифференциальных и алгебраических уравнений [2]. Для смесителя непрерывного действия с передаточной функцией (ПФ) $W(S)$ связь входного и выходного сигналов при нулевых начальных условиях определяется выражением [4]:

$$y(s) = W(S)x(s), \quad (1)$$

где $x(s)$ и $y(s)$ – изображения, по Лапласу, входного и выходного сигналов.

Передаточная функция смесителя в эксперименте определяется по кривой отклика аппарата, отражающей реакцию на возмущающий сигнал заданной формы.

Целью работы являлось исследование динамических характеристик непрерывнодействующего сме-

сеприготовительного агрегата, включающего в свой состав дозирующие устройства объемного типа и центробежный смеситель новой конструкции; нахождение рациональных режимных и конструктивных параметров работы агрегата, обеспечивающих максимальное сглаживание флуктуаций питающих потоков при различных схемах организации движения материальных потоков в агрегате.

Для этого решались следующие задачи: проведение структурной идентификации НСА; определение ПФ новой конструкции смесителя непрерывного действия (СНД) и общей ПФ агрегата, включающего смеситель и блок дозирующих устройств объемного типа; анализ совместной работы всех элементов системы на основе теоретических и экспериментальных данных; определение рациональных параметров работы смесителя, обеспечивающих максимально эффективную работу агрегата.

Модель смесеприготовительного агрегата рассматривалась в виде системы, состоящей из ряда динамических звеньев (рис.1): блок дозаторов сыпучих материалов с импульсной переходной характеристикой $X_{di}(t)$, изображение которой, по Лапласу, равно $W_{di}(S)$, $i = 1, 3$; приемная емкость – суммирующий элемент (СЭ) с ПФ $W_{cs}(S) = 1$ и центробежный СНД с ПФ $W_{sm}(S)$. Дозирующие устройства, работающие согласно-параллельно в составе блока дозаторов, воздействуют на СНД, создавая при этом входные (относительно СНД) воздействия в виде сигналов весовых расходов питающих потоков $X_{di}(t)$.

На основании законов преобразования структурных схем изображение импульсной переходной характеристики $X_{d\Sigma}(t)$ блока дозаторов имеет вид:

$$W_d(S) = W_{d1}(S) + W_{d2}(S) + W_{d3}(S) = \sum_{i=1}^3 W_{di}(S), \quad (2)$$

а изображение импульсной переходной характеристики $X_{вых}(t)$ всей системы определяется формулой:

$$W(S) = (W_{d1}(S) + W_{d2}(S) + W_{d3}(S)) \cdot W_{sm}(S) = \sum_{i=1}^3 W_{di}(S) \cdot W_{sm}(S). \quad (3)$$

В дальнейшем вместо выражения «изображение импульсной переходной характеристики» будем использовать понятие передаточной функции определенного устройства/агрегата.

Для параметрической идентификации математической модели необходимо определить ПФ всех элементов системы. Дозирование основных компонентов в исследуемом НСА осуществлялось спиральным и шнековым дозаторами, формирующими выходные материалопотоки волнообразной формы. Ключевой компонент подавался в смеситель порционным дозатором.

Идентификация сигналов, формируемых блоком дозаторов объемного типа, проводилась на основании экспериментальных данных [5, 6]. Сигналы в виде расхода материалопотоков для шнекового $X_{d1}(t)$ и спирального $X_{d2}(t)$ дозаторов аппроксимировались следующим образом:

$$X_{d1}(t) = 7,72 + 0,51 \cdot \sin(2,10 \cdot t); \quad (4)$$

$$X_{d2}(t) = 18,51 + 0,82 \cdot \sin(2,02 \cdot t). \quad (5)$$

Соответствующие изображения имеют вид:

$$W_{d1}(S) = \frac{7,72}{S} + \frac{1,07}{S^2 + 4,41}; \quad (6)$$

$$W_{d2}(S) = \frac{18,51}{S} + \frac{1,65}{S^2 + 4,08}. \quad (7)$$

Индикатор (ключевой компонент) подавался в аппарат потоком с формой сигнала расхода в виде меандра. Процесс дозирования характеризуется следующими режимными параметрами: весовой расход материала $X_{md} = 2,66$ г/с, период дозирования $T_d = 2$ с, скважность [2] $\lambda = 2$.

Сигнал порционного дозатора аппроксимирован так:

$$X_{d3}(t) = 1,33 + 1,694 \cdot \sin(3,14 \cdot t) + 0,565 \cdot \sin(9,42 \cdot t) + 0,339 \times \sin(15,7 \cdot t) + 0,242 \cdot \sin(21,98 \cdot t) + 0,188 \cdot \sin(28,26 \cdot t). \quad (8)$$

Передаточная функция порционного дозатора имеет вид:

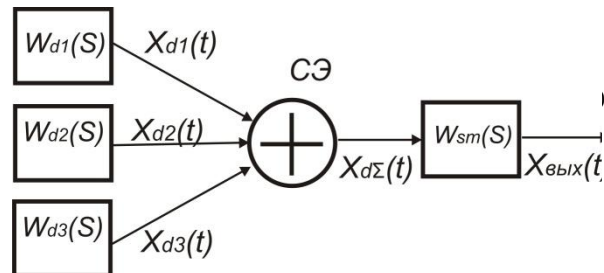


Рис.1. Функционально-структурная схема модели НСА

$$W_{d3}(S) = \frac{1,33}{S} + 1,694 \cdot \frac{3,14}{S^2 + 9,86} + 0,565 \cdot \frac{9,42}{S^2 + 88,74} + 0,339 \cdot \frac{15,7}{S^2 + 246,49} + 0,242 \cdot \frac{21,98}{S^2 + 483,12} + 0,188 \cdot \frac{28,26}{S^2 + 798,63}.$$

Для оценки динамических характеристик смесителя с целью выбора рациональных режимов его совместной работы с дозаторами использовался импульсный метод ввода трассера в аппарат [7]. Первичные экспериментальные данные представлялись в виде кривой изменения концентрации C во времени t . Площадь под кривой определяет количество вытесненного из аппарата индикатора. Импульсную характеристику перед аппроксимацией переводили в

разгонную, дифференциальную кривую вымывания трассера – в интегральную.

В ходе экспериментальных работ исследовались различные схемы организации движения материальных потоков в рабочем объеме смесительного аппарата, определяемые конструктивными вариантами исполнения ротора, представленными на рис.2. Рассматривались схемы: прямоочная с опережающими потоками (конструкция с гладким конусом с окнами у основания, рис. 2а); прямоочная с опережающими и накладывающимися потоками (полый конус, обращенный вершиной вверх, и с окнами у основания, рис.2б); с опережающими и распределяющими потоками (полый конус, обращенный вершиной вверх, окнами у основания и рассеивателем, выполненным в виде четырех лопаток, рис.2в). Возвратные материальные потоки, возникающие при вращении лопастей, расположенных в нижней части аппарата, создают определенное запаздывание в процессе массопереноса. В дальнейшем для его моделирования использовалось звено чистого запаздывания. В качестве режимного параметра выбрана частота вращения ротора СНД, варьируемые значения – $10,83 \text{ с}^{-1}$, $18,33 \text{ с}^{-1}$, 25 с^{-1} .

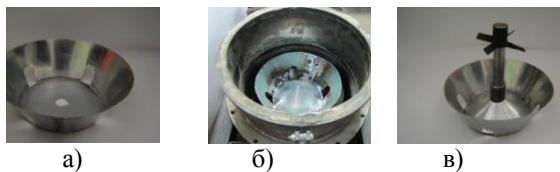


Рис. 2. Варианты исполнения конструкции ротора СНД

Проведено сравнение новой конструкции СНД, в которой реализовано движение потоков согласно схеме, представленной на рис. 2в, с уже известными конструкциями [4, 6]. На рис. 3 изображена оригинальная конструкция центробежного смесителя [8], состоящего из вертикального цилиндрического корпуса 1, эллиптической крышки 2, на которой имеется загрузочный патрубок 3, эллиптического днища 4, с подшипниковым узлом 5, в котором закреплен вал 6. В нижней части вала 6 установлен ворошитель 7, выполненный в виде двух направляющих лопастей. Над ротором на валу концентрично установлен осевой рассеиватель 12, выполненный в виде четырех лопаток, расположенных под углом 60° к горизонтальной плоскости.

Основание ротора выполнено в виде диска 8, на котором концентрично установлен полый конус 9, обращенный вершиной вверх. На основании ротора установлен полый тонкостенный усеченный конус 10 с перепускными окнами 11, соединенный с диском снизу меньшим основанием. В эллиптическом днище установлен разгрузочный патрубок 13.

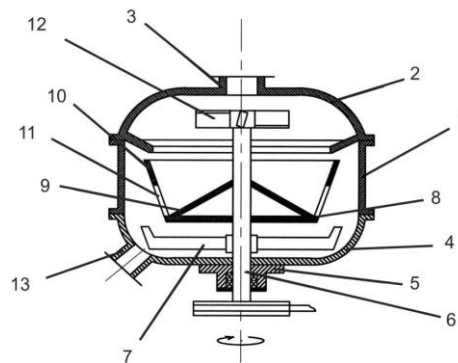


Рис. 3. Центробежный СНД

В ходе исследований смеситель выводился на стационарный режим работы, затем в поток основного компонента (дисперсные сыпучие материалы – мука, сухое молоко, сахар) порционным дозатором вводился индикатор (высокодисперсный ферромагнитный порошок). Массы индикатора, вводимого в аппарат, и основного компонента задавались с учетом их соотношения 1:200. Сразу после момента ввода производился отбор проб на выходе из смесителя с последующим определением концентрации индикатора в каждой из них.

Модель смесительного аппарата с экспериментально определенной ФРВП, соответствующей схеме, представленной на рис. 2в, с опережающими и распределяющими потоками, аппроксимирована аperiодическим звеном второго порядка с запаздыванием [2]. При этом ПФ модели в параметрической форме записывается в виде:

$$W_{sm}(S) = \frac{K_c \cdot e^{-\tau S}}{T_2^2 \cdot S^2 + T_1 \cdot S + 1}, \quad (10)$$

где K_c – коэффициент усиления, характеризующий отношение выходной переменной к входной при установившемся режиме работы смесителя ($K_c = 1$);

T_1, T_2 – постоянные времени;

τ – время запаздывания. С учетом времени запаздывания и соотношений [9]

$$T_1 = T_3 + T_4; T_2^2 = T_3 \cdot T_4. \quad (11)$$

ПФ смесителя записывается как

$$W_{sm}(S) = \frac{K_c \cdot e^{-\tau S}}{(T_3 \cdot S + 1)(T_4 \cdot S + 1)}. \quad (12)$$

Для аппроксимации звена чистого запаздывания применялась модель Паде [2] второго порядка:

$$e^{-\tau S} = \frac{1 - 0,5 \cdot \tau \cdot S + 0,086 \cdot \tau^2 \cdot S^2}{1 + 0,5 \cdot \tau \cdot S + 0,086 \cdot \tau^2 \cdot S^2}. \quad (13)$$

В результате обработки экспериментальных данных для смесителя со схемой движения материальных потоков (см. рис.2в) с опережающими и распределяющими потоками при частоте вращения ротора $n = 18,33 \text{ с}^{-1}$ его ПФ имеет вид:

$$W_{sm}(S) = \frac{1 \cdot e^{-6 \cdot S}}{(10,83 \cdot S + 1)(38,42 \cdot S + 1)} = \frac{1}{416 \cdot S^2 + 49,25 \cdot S + 1} \cdot e^{-6 \cdot S} \quad (14)$$

Аппроксимация звена чистого запаздывания с учетом (13) и (14):

$$e^{-\tau S} = \frac{1 - 0,5 \cdot 6 \cdot S + 0,086 \cdot 36 \cdot S^2}{1 + 0,5 \cdot 6 \cdot S + 0,086 \cdot 36 \cdot S^2} \approx \frac{3 \cdot S^2 - 3 \cdot S + 1}{3 \cdot S^2 + 3 \cdot S + 1} \quad (15)$$

Тогда
$$W_{sm}(S) = \frac{1}{416 \cdot S^2 + 49,25 \cdot S + 1} \cdot \frac{3 \cdot S^2 - 3 \cdot S + 1}{3 \cdot S^2 + 3 \cdot S + 1} \quad (16)$$

Тогда ПФ агрегата (3) в числовой форме записывается в виде:

$$W(S) = \left(\frac{1,33}{S} + \frac{1,694 \cdot 3,14}{S^2 + 9,86} + \frac{0,565 \cdot 9,42}{S^2 + 88,74} + \frac{0,339 \cdot 15,7}{S^2 + 246,49} + \frac{0,242 \cdot 21,98}{S^2 + 483,12} + \frac{0,188 \cdot 28,26}{S^2 + 798,63} + \left(\frac{18,51}{S} + \frac{1,65}{S^2 + 4,08} \right) + \left(\frac{7,72}{S} + \frac{1,07}{S^2 + 4,41} \right) \right) \times \left(\frac{1}{416 \cdot S^2 + 49,25 \cdot S + 1} \times \frac{3 \cdot S^2 - 3 \cdot S + 1}{3 \cdot S^2 + 3 \cdot S + 1} \right) \quad (17)$$

Для проведения анализа в частотном пространстве ПФ смесителя представлялась в виде:

$W(j\omega) = Re(\omega) + jIm(\omega)$, где $Re(\omega)$ и $Im(\omega)$ – соответственно вещественная и мнимая частотные передаточные функции.

$$Re(\omega) = \frac{k(1 - T_2^2 \omega^2)}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2};$$

$$Im(\omega) = \frac{kT_1 \omega}{(1 - T_2^2 \omega^2)^2 + (T_1 \omega)^2} \quad (18)$$

Эффективность совместной работы блока дозаторов и смесителя оценивалась функцией сглаживающей способности $S(\omega)$ [2], рассчитываемой по формуле:

$$S(\omega) = R^{-1}(\omega),$$

где $R(\omega) = \sqrt{Re^2(\omega) + Im^2(\omega)}$. (19)

В ходе экспериментальных исследований работы смесительного агрегата при варьировании конструктивных и режимных параметров получены результаты, приведенные в табл. 1.

Зависимость сглаживающей способности смесителя для различных схем движения материальных потоков в его рабочем объеме при различных частотах вращения ротора представлена на рис. 5а, б.

Из приведенных данных следует, что наилучшая сглаживающая способность СНД соответствует схеме движения потоков для конструкции на рис.2в (частота вращения ротора $n = 25$ об/с). В этом случае показатель $S(\omega)$ в среднем в 1,35 и 1,2 раза больше, чем при частоте вращения ротора $n = 10,83$ об/с и $n = 18,33$ об/с соответственно.

Таблица 1

Расчет параметров ПФ и сглаживающей способности смесителя

Схема движения материалопотоков	а	б	в	а	б	в	а	б	в	
Частота вращения ротора, об/с	10,83			18,33			25,00			
τ	11	10	7	9	7	6	8	8	6	
T_1	32,65	36,90	37,80	33,00	38,50	49,25	34,45	37,60	44,70	
T_2	16,29	17,96	17,97	16,10	17,53	18,04	16,86	17,63	18,07	
T_3	22,00	15,80	11,40	16,70	11,00	10,83	13,71	12,05	9,20	
T_4	10,65	21,10	26,40	16,30	27,50	38,42	20,74	25,55	35,50	
$S(\omega)$	$\omega = 0,1$	7,18	8,17	9,12	8,20	8,97	10,83	8,28	9,88	11,08
	$\omega = 0,2$	13,66	15,75	16,22	14,95	16,31	18,69	17,59	18,00	21,85
	$\omega = 0,3$	26,16	29,23	31,02	28,93	31,47	34,73	35,20	35,33	42,44
	$\omega = 0,4$	46,92	49,50	52,00	48,76	52,95	57,49	60,05	64,80	71,49
	$\omega = 0,5$	66,82	76,48	79,05	74,32	80,62	86,84	82,03	91,33	98,91

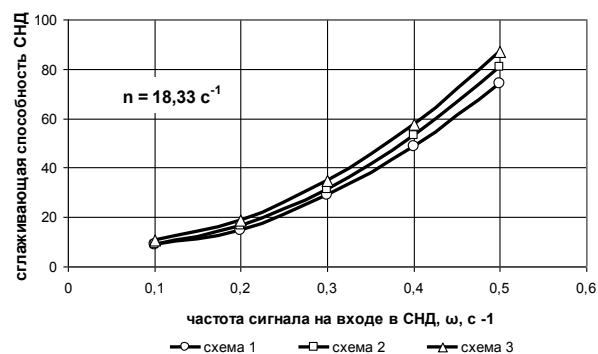
Конструктивные решения, направленные на создание распределяющих материалопотоков в рабочем объеме смесителя, позволяют значительно уменьшить влияние флуктуаций питающих потоков, поступающих от дозаторов объемного типа. Так, организация работы СНД по схеме, соответствующей конструкции ротора на рис.2в, позволяет увеличить сглаживающую способность аппарата на $(11 \div 13) \%$.

Результаты и их обсуждение

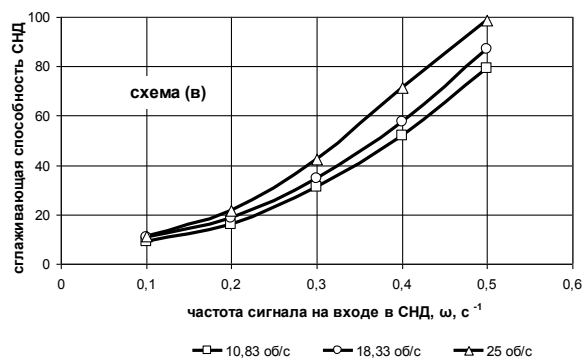
Использование кибернетического подхода позволило провести сравнение различных схем движения материалопотоков в смесеприготовительном агрегате непрерывного действия, включающего новую конструкцию центробежного смесителя и дозирующие устройства объемного типа. Опытным путем определены значения параметров передаточной функции исследуемой конструкции СНД и всего НСА. В результате опытным путем получены значения параметров передаточных функций исследуемой конструкции смесителя и смесеприготовительного агрегата в целом. Сравнительный анализ различных схем системы «дозаторы объемного типа – смеситель» показал, что при увеличении частоты входных сигналов сглаживающая способность смесителя возрастает. Так, при изменении частоты дозирования с 0,1 до 0,5 с^{-1} сглаживающая способность аппарата новой конструкции (с полым конусом, обращенным вершиной вверх, с окнами у основания и рассеивателем) при частоте вращения ротора, равной 10,83 и 18,33, увеличилась в 3 раза, а при значении 25 об/с – в 4 раза.

Схема движения потоков для конструкции ротора, изображенной на рис.2в, реализована в конструкции смесителя, техническая новизна которого защи-

щена патентом РФ №104867. При данной схеме организации движения материальных потоков сглаживающая способность аппарата в среднем в 1,27 раз больше, чем при прямоточной схеме.



а



б

Рис. 5. Зависимость сглаживающей способности смесителя от конструктивных (а) и режимных (б) параметров работы агрегата

Список литературы

1. Ахмадиев, Ф.Г. Моделирование и реализация способов приготовления смесей / Ф.Г. Ахмадиев, А.А. Александровский // Журнал Всес. хим. общества им. Д.И. Менделеева. – 1988. – №4.
2. Федосенков, Б.А. Процессы дозирования сыпучих материалов в смесительном агрегате непрерывного действия – обобщенная теория и анализ (кибернетический подход) / Б.А. Федосенков, В.Н. Иванец. – Кемерово: КемТИПП, 2002. – 211 с.
3. Кафаров, В.В. Системный анализ процессов химической технологии: учебник / В.В. Кафаров, И.Н. Дорохов, С.Ю. Арутюнов – М.: Наука, 1985. – 440с.
4. Макаров, Ю.И. Аппараты для смешения сыпучих материалов / Ю.И. Макаров. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
5. Виниченко, М.М. Разработка и исследование центробежного смесителя непрерывного действия для получения дисперсных комбинированных продуктов: дис. ... канд. техн. наук: 05.18.12: защищена: 19.12.2006 / М. М.Виниченко. – Кемерово, 2006. – 142 с.
6. Волков, А.С. Разработка и исследование непрерывнодействующего смесительного агрегата с направленной организацией движения материальных и воздушных потоков для получения сухих комбинированных продуктов: дис. ... канд. техн. наук : 05.18.12 : защищена 11.11.2005 / А.С.Волков. – Кемерово, 2005. – 174 с.
7. Кафаров, В.В. Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – 4-е изд., перераб., доп. – М., 1985. – 448 с.
8. Патент № 104867 Россия, МПК В01 F5/22 (2006.01). – 2010146619/15 Смеситель-диспергатор / Бакин И.А., Карнадуд О.С., Сухоруков Д.В. - Заявлено 16.11.2010, опубл. 05.06.11 (Россия).
9. Борисов, В.В. Практикум по ТАУ химико-технологическими процессами. Аналоговые системы: учебник для вузов/ В.В. Борисов, В.П. Плюто. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Химия, 1987. – 152с.

ФГБОУ ВПО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47.
Тел./факс: (3842)73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

SUMMARY

V.N. Ivanets, I.A. Bakin, O.S. Karnadud, A.V. Sibil

**COMPARATIVE ANALYSIS OF MOVEMENT PATTERNS OF MATERIAL STREAMS
IN THE MIXTURE-PRODUCING AGGREGATE**

A comparison of various schemes for the material stream movement in a new design of centrifugal mixer has been done on the basis of the cybernetic approach concepts. The parameters for the transfer functions of the mixer construction and the whole mixture-producing aggregate have been found empirically. The rational parameters of the mixing process to ensure the maximum fluctuations smoothing in supplying flows have been identified and investigated.

Mixing, the cybernetic approach, the centrifugal mixer, dosing.

Kemerovo Institute of Food Science and Technology
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia
Phone/Fax: +7(3842) 73-40-40
e-mail: office@kemtipp.ru

