

Автореферат
И 18

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ
им. М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи
Для служебного пользования
Экз. № 000090

ИВАНЕЦ Виталий Николаевич

УДК 539.215:66.06

ИНТЕНСИФИКАЦИЯ ПРОЦЕССА СМЕШИВАНИЯ ВЫСОКОДИСПЕРСНЫХ
МАТЕРИАЛОВ НАПРАВЛЕННОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ ПОТОКОВ

Специальность 05.18.12 - процессы, машины и агрегаты
пищевой промышленности

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Одесса - 1989

ДСП. Исх. №	15
л. Прилож.	
3	июле 1989 г.

Работа выполнена в Кемеровском технологическом институте пищевой промышленности.

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Н.К. Наремский;

доктор технических наук,
профессор В.Н. Блиничев;

доктор технических наук,
профессор А.И. Зайцев.

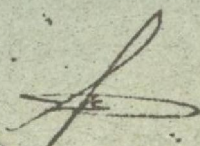
Ведущая организация - Всесоюзное научно-производственное
объединение пищеконцентратной
промышленности и специальной
пищевой технологии, г. Москва.

Защита состоится "27" октября 1989 г. в 10³⁰ час
на заседании специализированного совета Д 068.35.01 при Одесском
технологическом институте пищевой промышленности имени
М.В. Ломоносова, 270039, г. Одесса, ул. Свердлова, 112.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Одесского
технологического института пищевой промышленности им. М.В.
Ломоносова.

Автореферат разослан "13" сентября 1989 г.

Ученый секретарь специализи-
рирующей организации



Е.Г. Кротов

897

ХТ

ТЕКА

ОНАХТ

21.09.10

Интенсификация проце



v017897

Актуальность проблемы. Для первоочередного выполнения продовольственной программы СССР, как было отмечено на мартовском Пленуме ЦК КПСС (1989 г.), необходимо особый упор сделать на развитие перерабатывающих отраслей, связанных с удовлетворением запросов трудящихся в рациональном и сбалансированном питании. Для этого ученые и машиностроители должны значительно увеличить масштабы создания, освоения и внедрения в производство новой высокоэффективной техники, обеспечивающей рост производительности труда, снижение энергопотребления и материалоемкости, коренного улучшения качества выпускаемой продукции. Для ее создания необходимо обеспечить опережающее развитие химической, станкоинструментальной, электротехнической и других отраслей промышленности. Это позволит обеспечить современную технику новыми композиционными материалами, алмазным инструментом, электроникой и т.д.. Во всех перечисленных отраслях многие технологические схемы (особенно в пищевых концентратной, пищевой, комбикормовой) практически всегда содержат стадии смешивания, используемые для приготовления однородных по составу композиций из высокодисперсных материалов. В новых и реконструируемых производствах целесообразно использовать смесители непрерывного действия (СНД), оснащенные соответствующими устройствами, позволяющими получать высококачественные смеси. Переход на аппаратное оформление стадии смешивания материалов по непрерывной схеме дает возможность автоматизировать процесс, заметно уменьшить загрязнение производственных помещений и окружающей среды пылевыми выбросами, улучшить условия труда и культуру производства, а также увеличить производительность смесительного агрегата (СА) при одновременном снижении энергопотребления и металлоемкости, а также себестоимости смеси.

В последние годы советские ученые (Макаров Ю.И., Александровский А.А., Кафаров В.В., Дорохов И.И., Зайцев А.И., Ахмадиев Ф.Г. и др.) опубликовали ряд интересных исследований, связанных с разработкой вопросов теории процесса смешивания в СНД. Зарубежные же исследователи глазное внимание сосредоточили на изучении процесса смешения в аппаратах периодического действия. В то же время разработке теории и инженерных методов расчета непрерывнодействующих СА, включающих в свой состав дозирующие устройства различного типа, посвящено сравнительно небольшое количество работ. В частности, недостаточно изучено влияние входных сигналов, формируемых дозаторами, и характеристик СНД на качество конечной смеси. Поэтому раз-

работка эффективных непрерывнодействующих СА для переработки порошкообразных материалов, создание теории процесса смешения в них является актуальной научной задачей, представляющей большой практический интерес для ряда ведущих отраслей народного хозяйства.

Диссертационная работа выполнена во исполнение целевой общесоюзной научно-технической программы 0.38.06 "Создать и освоить производство продуктов детского питания и витаминизированных пищевых продуктов на основе научных принципов рационального и сбалансированного питания", утвержденной Постановлением ГКНТ СССР № 555 от 30.10.85 г. (тема 01.04.II "Разработать и испытать опытно-промышленный комплект оборудования для дозирования и смешения микродобавок витаминов"); комплексной научно-технической программой "Продовольствие", приказ Минвуза РСФСР № 190 от 30.06.85 г. (тема 06.63 "Разработка непрерывнодействующих смесительных агрегатов для приготовления высококачественных смесей порошкообразных комбинированных продуктов питания и комбикормов"). Ряд оригинальных СА и устройств разработаны в порядке выполнения Постановления ЦК КПСС и Совмина СССР № 344-89 от 18.04.84 г.; координационного плана НИР на 1981-1985 гг. по созданию новых неметаллических материалов для космических летательных аппаратов с длительным сроком эксплуатации (от 20.01.81 № 22), координационного плана по проблеме полиамидных матриц для композиционных материалов на 1981-1985 гг. (от 24.06.83 № 244) и в соответствии с целевой комплексной программой ОЦ.013, утвержденной Постановлением ГКНТ, Госплана СССР и Президиума АН СССР от 08.12.81 № 492/245/164.

Цель и задачи исследований. Цель работы - провести комплексные теоретические исследования процесса смешивания высокодисперсных материалов, взаимного влияния дозаторов, формирующих входные сигналы заданной формы, и СНД, обладающих разной инерционностью, на качество выходящего потока и на их основе разработать СА непрерывного действия для получения смесей хорошего качества при соотношении компонентов $1:10^2$ и выше. В соответствии с поставленной целью в диссертации решались следующие основные задачи: формирование и математическое описание функционально-структурных схем (ФСС) непрерывнодействующих СА и разработка методов их исследования на базе цифрового моделирования; нахождение алгоритма реализации интерактивного режима работы на автоматизированном комплексе; разработка новых конструкций СА, в том числе совмещающих процессы смешивания и диспергирования; разработка математических моделей для дискретно-непрерывных

процессов дозирования; разработка научно-обоснованных методов расчета непрерывнодействующих СА.

Научная новизна работы. Созданы математические модели процесса непрерывного смесеприготовления, позволяющие анализировать (в интерактивном режиме взаимодействия между исследователем и ЭВМ) возможность получения смеси заданного качества с учетом фильтрующих свойств конкретного СА; выявлены количественные и качественные закономерности сглаживания дискретных входных сигналов СНД вибрационного, центробежного, барабанного типов с разной инерционностью; разработаны математические модели различных вибрационных СНД с рециклом и проведен их анализ с целью нахождения наиболее рациональной конструкции; получены количественные зависимости изменения сглаживающей способности СНД центробежного, вибрационного и барабанного типов путем направленного варьирования их инерционных свойств при входных воздействиях сложного типа.

Практическая ценность и реализация результатов. На основе развития научных основ непрерывного процесса смешивания порошкообразных материалов разработаны новые конструкции СА с направленной организацией потоков в них, приборов и устройств, защищенных 22 авторскими свидетельствами на изобретения. Использование в промышленности подобных СА позволяет в 5-10 раз снизить металлоемкость и энергопотребление по сравнению с существующими смесителями периодического действия. Предложено аппаратное оформление непрерывного процесса смешивания при витаминизации порошкообразных пищевых продуктов производительностью 15 тыс. тонн в год. Оно включает в свой состав три СА и ряд устройств, защищенных 5 авторскими свидетельствами. Агрегат ДСВ-4-10/50 внедрен на Бирюлевском заводе НПО пищекопцентратной промышленности (г. Москва), а установка ДСВМ-150 и вибрационный СА производительностью 2 т/час проходят эту стадию. Реальный экономический эффект составляет свыше 100 тыс. рублей в год. Опытные промышленные испытания на Московском заводе ветпрепаратов проходит многокомпонентная дозирочно-смесительная станция типа МКС. На ПО "Колосс" (г. Москва) в стадии промышленных испытаний находится дозирующе-транспортирующее устройство прыностей, облегчающее условия труда. Смеситель-диспергатор, изготовленный по а.с. № 1389156 ДСП, внедрен в 1986 г. на опытном заводе НИИХП НПО "Карболит" для получения Аропласта марки Б-4 с реальным экономическим эффектом 214,5 тыс. руб. Работы "Смесительный агрегат с приборами" и "Центробежный смеситель" экспонировались в 1986-87 гг. на ВДНХ и награ-

ждены серебряной и бронзовой медалями. На ПО "Алмаз" (г. Ереван) внедрен непрерывнодействующий СА, изготовленный по а.с. № 1273236, для приготовления алюмоорганической шихты с фактическим экономическим эффектом за 1987 г. в размере 178,9 тыс. руб. В 1987 г. Кемеровским заводом "Химмаш" изготовлена опытная партия смесителей-диспергаторов в количестве 10 штук по разработанным совместно с нами чертежами на основе а.с. № 1389156 ДСП. В 1987 г. один из этих смесителей был внедрен на ПО "Алмаз" при получении реакционной шихты для синтеза алмазов с фактическим экономическим эффектом за 1988 г. в размере 334,5 тыс. руб. В 1988 г. модифицированные центробежные смесители внедрены в г. Кемерове на НПО "Карболит" для получения нового композиционного материала "ПАИС" с фактическим экономическим эффектом 101,2 тыс. руб. в год. Материалы диссертационной работы используются в учебном процессе на кафедре процессов и аппаратов пищевых производств Кемеровского технологического института пищевой промышленности при дипломном и курсовом проектировании. В состав лабораторного практикума входят работы "Шнековый дозатор" и "Устройство для объемного дозирования", выполненные на основе а.с. № 1064144 и № 1023204.

Апробация работы. Основные положения диссертации ежегодно докладывались и обсуждались на научных конференциях Кемеровского технологического института пищевой промышленности (1980-1989 гг.), Четвертой Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов" (Сдесса, 1980г.), Всесоюзной научной конференции "Проблемы тонкого измельчения, классификации и дозирования" (Иваново, 1982г.), Втором научно-практическом семинаре "Применение методов и аппаратов порошковой технологии в народном хозяйстве" (Томск, 1983), Всесоюзной научной конференции "Пути совершенствования технологических процессов и оборудования для производства, хранения и транспортировки продуктов питания" (Москва, 1984г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Процессы и аппараты производства полимерных материалов, методы и оборудование для переработки их в изделия" (Москва, 1986г.), Всесоюзной конференции "Технология сыпучих материалов - Химтехника-86" (Белгород, 1986), Всесоюзном коллоквиуме "Процессы и аппараты пищевых производств" (Москва, 1986г.), Всесоюзной научно-технической конференции "Применение аппаратов порошковой технологии и процессов термосинтеза в народном хозяйстве" (Томск, 1987), Третьей Всесоюзной научно-технической конференции "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания" (Москва, 1988 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 86 работ, получено 22 авторских свидетельств на изобретения.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов и приложения, включает 125 рисунков, 27 таблиц. Основной текст изложен на 268 страницах машинописного текста. Список литературы содержит 214 наименований. На защиту выносятся: математическое описание процесса смешивания с использованием методов цифрового машинного моделирования, позволяющих в интерактивном режиме подобрать рациональные параметры непрерывнодействующего СА, необходимые для получения композиции заданного качества; результаты исследований сглаживания сложных входных сигналов СЧД с разной инерционностью; новые конструкции СА, приборов и устройств, а также методики их расчета.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность и сформулирована цель работы, намечены пути интенсификации процесса смешивания высокодисперсных материалов в рабочем объеме аппарата.

В первой главе на основе анализа методов моделирования непрерывного процесса смешивания показана целесообразность использования комбинированного подхода, основанного на кибернетическом методе с применением в ряде случаев элементов вероятностного. При рассмотрении методов исследования системы смешивания на базе цифрового моделирования предложены два варианта ФСС непрерывнодействующего СА (рис. 1а). ФСС содержит блок дозаторов ($D_1, D_2, \dots, D_n$), работающих согласно параллельно на суммирующий элемент (СЭ), приемное устройство (ПУ), представляющее собой питатель преобразующего типа, и СЧД с контуром рефлекса (КР) или без него. ПФ по этой схеме, имеющая вид

$$W_S(s) = W_P(s) W_C(s) \sum_{i=1}^{i=n} W_{d_i}(s); \quad (1)$$

где $W_P(s)$ - ПФ ПУ; $W_C(s)$ - ПФ СЧД; $\sum_{i=1}^{i=n} W_{d_i}(s)$ - ПФ блока дозаторов, содержит блок, описывающий суммарный сигнал выходной концентрации дозаторов вида:

$$L[x_{bx}(t)] = \frac{x_{1m}(s^2 + \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)}{s(s^2 + \omega_1^2)} + \frac{x_{2m}(s^2 + \omega_2 s + \omega_2^2)(s^2 + \omega_1^2) + x_{3m}(s^2 + \omega_1 s + \omega_1^2)(s^2 + \omega_2^2)}{(s^2 + \omega_2^2)} \quad (2)$$

Здесь ω_1, ω_2 - частоты дозирующих устройств; x_{1m}, x_{2m}, x_{3m} - амплитудные уровни сигналов концентрации, создаваемых дозаторами.

Моделирование ПУ, являющегося звеном чистого запаздывания с ПФ $W_p(S) = \exp(-\tau S)$ и частотным коэффициентом передачи $W(j\omega) = \cos \omega\tau - j \sin \omega\tau$, вызывает определенные трудности при его реализации в схеме машинного моделирования. Проанализированы способы представления ПФ ПУ в форме рядов Маклорена, дробно-рациональных рядов Паде и цепочечной схемы последовательно соединенных инерционных звеньев I-го порядка с единичными коэффициентами передачи. В последнем случае ПФ ПУ запишется в виде

$$W_p(S) = \exp(-\tau S) \approx [1 + (\tau/N)S]^{-N}, \quad (3)$$

где $\tau = \Delta T_i N$ - время запаздывания в ПУ; $N = 7 \dots 10$ - число последовательно соединенных звеньев.

Реальные СНД аппроксимируются чаще всего звеньями инерционного типа с элементами чистого запаздывания. Низкочастотные фильтрующие свойства СНД удобно характеризовать годографами, представляющими изображения по Фурье весовых функций. Таким образом, ПФ смесителя, с учетом транспортного запаздывания, запишется так:

$$W_0(S) = \frac{\exp(-\tau S)}{(T_3 S + 1)(T_4 S + 1)} \quad (4)$$

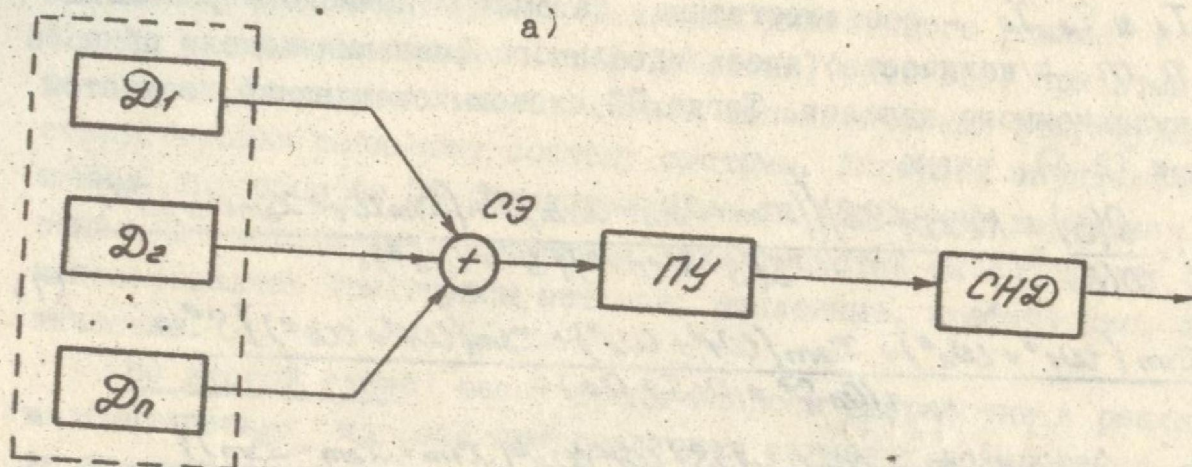
где: T_3, T_4 - постоянные времени СНД конкретные значения которых определены способом регистраций функций отклика аппарата на разные виды входных возмущений. Проведен анализ методов количественного определения параметров ПФ смесителя. На основании анализа материального баланса (рис. 1б) ПФ СНД с внешним рециклом будет равна

$$W_0(S) = \frac{W_1(S)}{1 + R - R W_1(S) W_2(S)} \quad (5)$$

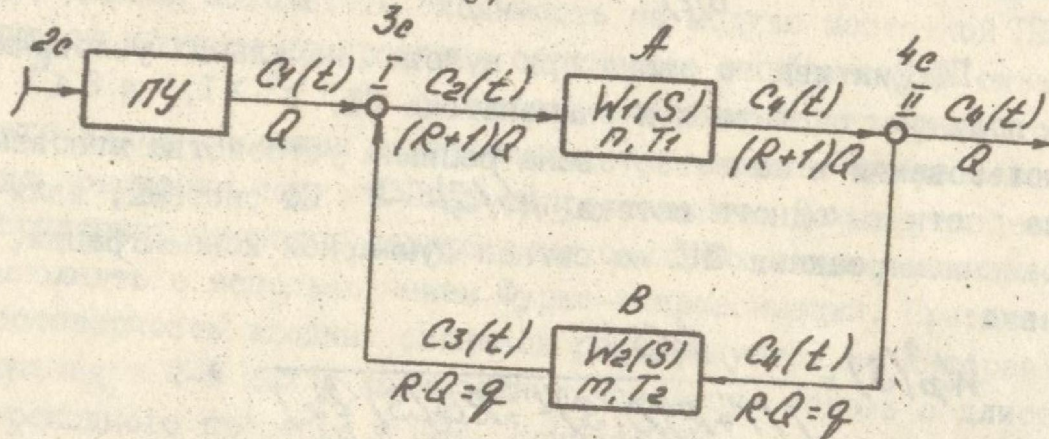
где: $W_1(S), W_2(S)$ - ПФ прямого и рециркулярного канала СНД; $R = q/Q$ - степень расхода рецикла; C_0, C_i - входная и выходная концентрации; Q - полный поток смеси; q - поток, поступающий на вход рециркулярной цепи. ПФ прямого и рециркуляционного каналов СНД могут быть представлены следующим образом:

$$W_1(S) = \frac{\exp(-\tau_1 S)}{[(T_1/n)S + 1]^n}, \quad W_2(S) = \frac{\exp(-\tau_2 S)}{[(T_2/m)S + 1]^m} \quad (6)$$

а)



б)



в)

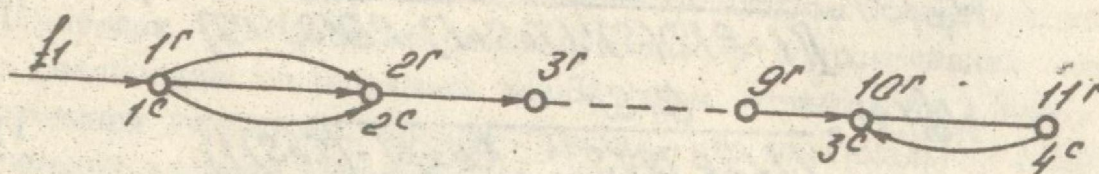


Рис. I.

ФСС смешеприготовительного агрегата

а) без контура рефлексии.

Сигнальный граф (в)

б) с контуром рефлексии.

где: τ_1, T_1 и τ_2, T_2 - соответственно, параметры прямого и рециркуляционных каналов; n, m - количество ячеек идеального смешения модели прямого и рециркуляционного каналов. Тогда ПФ системы смешивания, с учетом выражений (2-4), равна

$$W_9(s) = \frac{G(s)}{D(s)} = \frac{K \exp(-\tau_1 s) \{ (x_{1m} + x_{2m} + x_{3m}) S^4 + (x_{1m} \omega_1 + x_{2m} \omega_2) S^3 +$$

$$+ [x_{1m}(\omega_1^2 + \omega_2^2) + x_{2m}(\omega_1^2 + \omega_2^2) + x_{3m}(\omega_1^2 + \omega_2^2)] S^2 +$$

$$+ (x_{1m} \omega_1 \omega_2^2 + x_{2m} \omega_2 \omega_1^2) S + \omega_1^2 \omega_2^2 (x_{1m} + x_{2m} + x_{3m}) \}$$

$$+ [1 + (\tau_2/n) S]^n}{S(S^2 + \omega_1^2)(S^2 + \omega_2^2) \times} \quad (7)$$

Таким образом, сигнал выходной концентрации запишется в виде

$$\mathcal{L}[x_{\text{вых}}(t)] = \mathcal{L}[x_{\text{вх}}(t)] / \delta(t) \cdot W_{\varphi}^0(s) W(s), \quad (8)$$

где: $W_{\varphi}^0(s)$ - ПФ фиктивного звена при нулевых начальных условиях; $G(s), D(s)$ - полиномы числителя и знаменателя ПФ.

При использовании в качестве звена рецикла устройства мгновенного переноса части выходного потока $W_2(s) = c_2$ ПФ системы, являющаяся изображением реакции СНД на сигнал суммарной концентрации, будет иметь вид:

$$W_{\varphi}^0(s) = \frac{G(s)^L}{[(1+R)D(s)^L - R G(s)^L c_2]} \quad (9)$$

где: L - индекс, соответствующий типу СА, определяющий конкретный вид полинома числителя ПФ.

Когда канал рециркуляции сформирован звеном идеального смешивания $W_2(s) = c_2 / (T_2 s + 1)$ или идеального вытеснения $\exp(-\tau_2 s)$, соответствующие изображения функции отклика будут записаны в виде

$$W_{\varphi}^0(s) = \frac{G(s)^L / (T_2 s + 1)}{[(1+R)D(s)^L / (T_2 s + 1) - R G(s)^L c_2]} \quad (10)$$

$$W_{\varphi}^0(s) = \frac{G(s)^L}{\{ [1+R] D(s)^L - R \exp[-(\tau_2 s)] \}} \quad (11)$$

Сигналы входной концентрации формировались нами по Паде; методом фазированных гармоник (спектров) и с помощью Фурье-разложения. Анализ смесительных систем предусматривает, что в общем виде их мате-

математические модели вводятся (в рамках диалогового режима) в ЭВМ, в виде сигнальных графов (графов Мэзона) (рис. 1в). При этом в ее памяти формируется определенная топологическая структура, соответствующая реальному составу системы. Алгоритм определения машинным способом ее ПФ реализовывался на основании выражения Мэзона. Для определения временных характеристик смесительных систем использовались три группы методов: численные, графические, аналитические.

Во второй главе рассмотрены вопросы разработки и реализации математических моделей при различных сигналах дозирования. Проведен качественный анализ сигналов порционного дозирования в виде дискретно-релаксационных импульсов. Поскольку изображения такого рода сигналов функционально зависят от операторов запаздывания, то в качестве рабочей модели их представления, помимо описанной ранее цепочечно-инерционной, апробирована аппроксимация рядами Паде, дающая абсолютную сходимость по модулю частотной ПФ и зависимость от частоты дозирования сходимость по фазе. Для скважностей

$\ell \geq 3$ и $1,1 \leq \ell \leq 1,3$ сложность операторов дуг графа, определяющего заданный режим дозирования, существенно возрастает вследствие повышения порядка Паде-аппроксиманта. Поэтому моделирование порционных сигналов дозирования с малыми значениями ℓ удобнее выполнять с использованием Фурье-аппроксимации. При этом оценивать достоверность входных сигналов рекомендуется на интервале моделирования в 2-3 цикла дозирования, согласуя модель с длительностью переходного процесса в СНД. Конкретные значения параметров спектрального анализа периодических сигналов загрузки рассчитаны в соответствующих таблицах приложения. После нахождения математической модели приступали к формированию графов входных воздействий дискретного типа. Дозирующий сигнал $x(t)$ создается путем подачи импульсной $\delta(t)$ функции на вход графа. Характеристические полиномы звеньев, воспроизводящих нужные входные воздействия в виде прямоугольных дискретных изменений входных концентраций, имеют II порядок. При этом максимальную ошибку аппроксимации оценивали по реализации с наибольшим количеством отсчетов на одном и том же временном диапазоне. Анализ показал, что максимальная ошибка аппроксимации входных концентраций не превышает $\delta_{\max} = 9,18\%$. Итоговый сигнал дискретного дозирования определяли методом суперпозиции. Из полученных на ЭВМ графиков и последующей их суперпозиции видно, что форма входной концентрации с высокой точностью аппроксимирует "прямоугольную волну" заданной скважности. Сложный сигнал

непрерывного дозирования формируется при наложении сигналов входной концентрации от нескольких дозаторов, работающих в различных частотных режимах

$$L[x_{\Sigma}(t)] = \frac{b_2 S^2 + b_1 S + b_0}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0} = \frac{A c_0}{d_2 S^2 + d_1 S + d_0} + \frac{g_0}{h_1 S + h_0} \quad (12)$$

Здесь первое слагаемое – колебательная составляющая входной концентрации, а второе – "псевдофоновая" составляющая, представляющая апериодическую компоненту дозирования. В общем случае лапласиан такого сигнала можно определить следующим образом:

$$L[x_{\Sigma}(t)] = \frac{g_0 d_2 S^2 + (A c_0 h_1 + g_0 d_1) S + (A c_0 h_0 + g_0 d_0)}{a_3 S^3 + a_2 S^2 + a_1 S + a_0} \quad (13)$$

где:

$$\begin{cases} b_2 = g_0 d_2; & a_3 = d_2 h_1; & a_2 = d_2 h_0 + d_1 h_1; \\ b_1 = A c_0 h_1 + g_0 d_1; & a_1 = d_0 h_1 + d_1 h_0; \\ b_0 = A c_0 h_0 + g_0 d_0; & a_0 = d_0 h_0 \end{cases}$$

Проверена возможность спектрального представления входных концентраций способом фазированных гармоник. Результаты моделирования дискретных и сложных дискретно-непрерывных процессов дозирования показывают, что при скважности $e = 2$ возможно их представление как рядом Фурье, так и способом фазированных гармоник. При других значениях скважности способ Фурье-разложения является более предпочтительным вследствие меньшей сложности машинной модели. Проведенные оценки точности аппроксимации по этим двум методам показывают, что в рамках используемой моделирующей системы допустимую погрешность обеспечивает только метод Фурье-разложения.

В третьей главе приводятся результаты исследований работы СНД центробежного, вибрационного и барабанного типов по сглаживанию флуктуаций 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 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 уравнением сигналов загрузки и переменной составляющей при частоте дозирования $\omega_1 = 0,1$; $\omega_2 = 0,5$; $\omega_3 = 1,0 \text{ с}^{-1}$. Абсолютное значение флуктуаций концентрации на выходе СНД можно найти по его частотной характеристике. Во время переходного процесса влияние колебательного характера переменной составляющей на форму выходного сигнала с течением времени увеличивается вследствие уменьшающейся производной постоянной составляющей выходной концентрации. Переменная составляющая становится при времени, сопоставимым с длительностью переходного процесса $t_{пп}$, примерно равной значению АЧХ на данной частоте с учетом реальной амплитуды дозирования. При этом производная меняется так, как показано на рис. 2. На начальном участке переход-

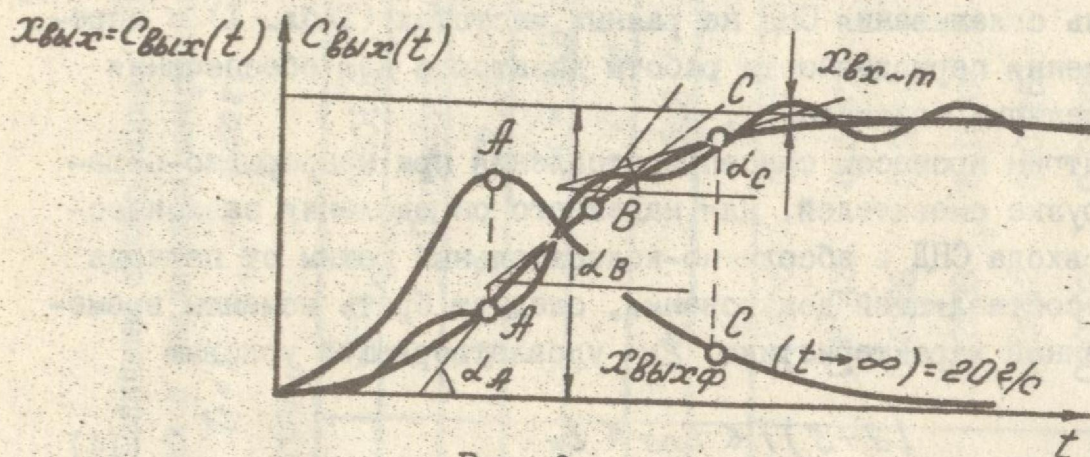


Рис. 2

ного процесса абсолютное значение концентрации не уменьшается даже при заметных периодических флуктуациях, т.к. влияние постоянной составляющей 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. По результатам моделирования найдена зависимость момента времени перехода смесителя в "абсолютно-колебательный" режим от частоты переменного дозирования. Для получения хорошего сглаживания входных флуктуаций и ускорения процесса смесеприготовления рекомендуется повышать величину $t_{мл}$, что соответствует увеличению частоты дозирования в непрерывно-переменном режиме. Определение фильтрующих свойств смесителей можно рассматривать в виде квазиоптимизации

степени сглаживания путем изменения постоянных времени ПФ T_0 и T_1 . Для проведения машинного исследования фильтрующих свойств смесителей нами рассчитывались их годографы в диапазоне частот $\Delta\omega = 0,01 + 10 \text{ с}^{-1}$.

С целью комплексного изучения фильтрующих свойств смесителей нами было проведено цифровое моделирование процессов в них на базе прикладного пакета программ для автоматизированного расчета динамических систем, разработанного, при нашем участии, сотрудниками Ленинградского электротехнического института им. В.И.Ульянова. 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 для основного типоразмера первой группы. На основании их анализа было прослежено, как меняется степень сглаживания СНД на разных частотах (Табл. I) 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 на временной характеристике t_k удовлетворяющей условию

$$(2+3)T \leq t_{nn} \leq t_k \quad (I4)$$

Если период T переменной составляющей слишком велик и не удовлетворяет условию (I4), то момент $t_{нап.}$ полностью определяется временем достижения максимальной концентрации с учетом чистого запаздывания СНД. Если $(2+3)T > t_{nn}$, то инерционность СНД соизмерима с инерцией фронтов в переменной составляющей и кривая $X_{вых}(t)$ полностью определяется формой последней. Графики на рис. 3 показывают зависимость момента "входа" центробежного СНД в абсолютно-колебательный режим при изменении частоты непрерывно-гармонического дозирования. Вертикальная линия заштрихованной стороной обращена в область абсолютно-колебательного режима, которая по своим параметрам удовлетворяет частоте дозирования ω и определяется зависимостью (I4). Те части графиков, которые располагаются в этой области, полностью согласуются с положениями, касающимися низкочас-

Таблица I.

Сравнительная оценка величины сглаживания (S') пульсаций входного
потока смесителями с различными инерционными параметрами
 $T_1 = 0,02$; $T_2 = 0,02$

Максимальная фаза (при $\omega = 10,0 \text{ с}^{-1}$), град.

ω	-354,2	-353,7	-352,3	-353,3	-351,8	-349,6	-354,7	-354,4	-353,6
0,01	0,9787	0,9518	0,8466	0,9935	0,9733	0,9304	0,9625	0,8791	0,7018
0,05	0,6753	0,5203	0,3077	0,8543	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	0,0082	0,00812	0,00745	0,0242	0,0216	0,0178	0,00308	0,00305	0,00295
10,0	0,00084	0,00084	0,00084	0,00025	0,00025	0,00025	0,00003	0,0000309	0,0000309

Коэффициент сглаживания $R(\omega)$

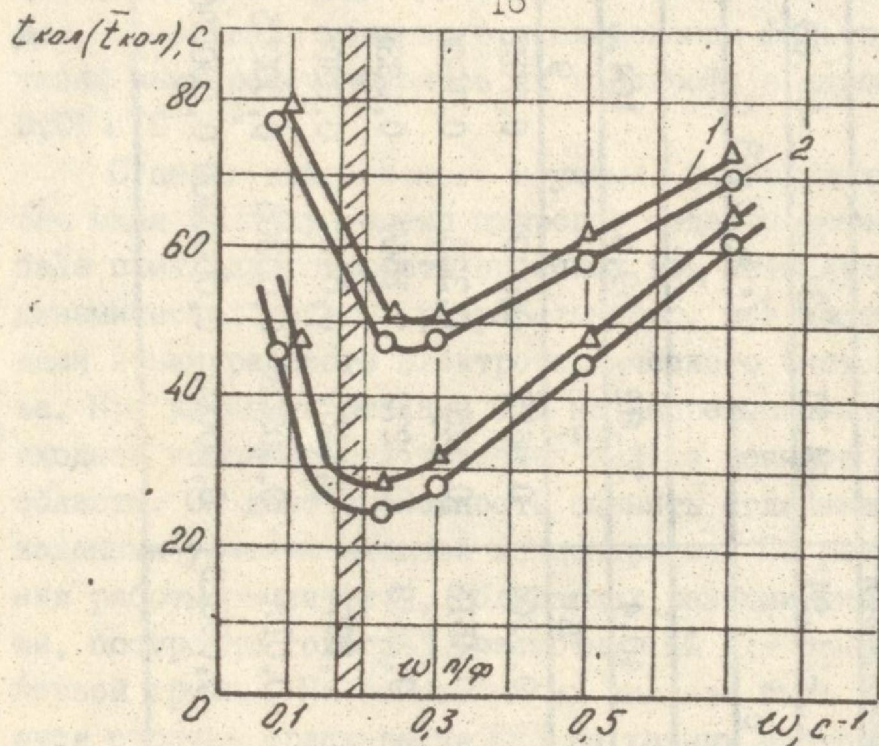


Рис. 3.

Время входа в абсолютно-колебательный режим.

- Δ — кривая 1 ($t_{nn} = 110$ с; $T_1 = 26,02$ с; $T_2 = 10,9$ с; $\xi = 1,19$)
 — $\circ$ — кривая 2 ($t_{nn} = 140$ с; $T_1 = 35,7$ с; $T_2 = 10,9$ с; $\xi = 1,64$)

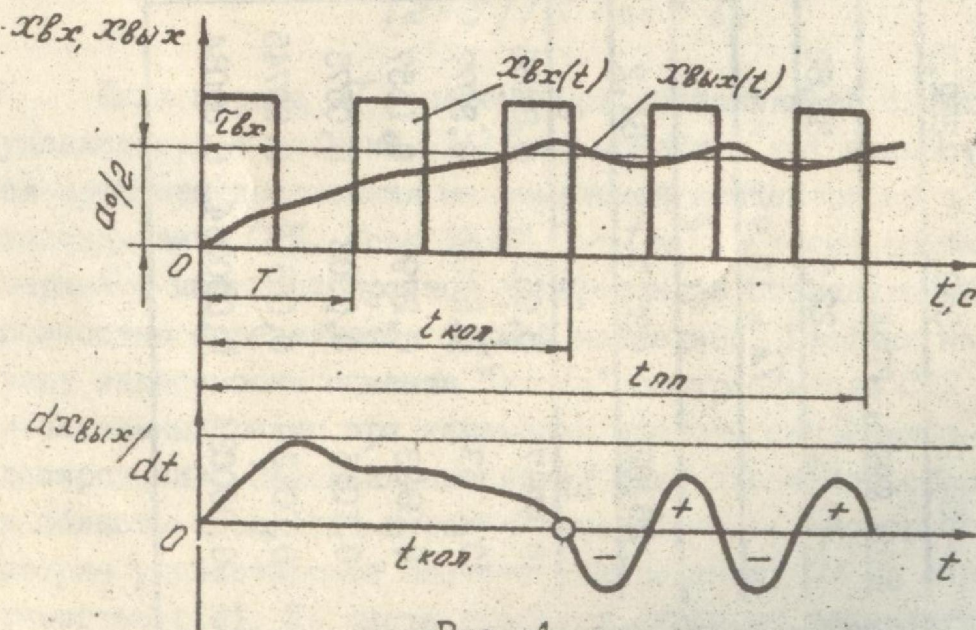


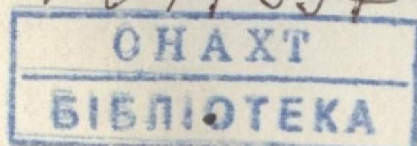
Рис. 4.

Возникновение переменного-колебательного режима при дискретном дозировании.

точной фильтрации и сглаживания входных флуктуаций, наложенных на постоянный "фон". В левой зоне СНД работает как повторитель переменной составляющей входной концентрации. Приведенные соображения, относящиеся к непрерывно-гармоническим режимам, справедливы и для порционного. Зона повторения (П) определяется эмпирическим выражением:

$$T_{\omega_{\text{дв}}} \geq (T_1 + T_2 + \tau), \quad (15)$$

где: $T_{\omega_{\text{дв}}}$ - период наиболее высокочастотной составляющей входной концентрации. Условие (15) задает локализацию точек моментов времени $t_{\text{кол}}(\omega)$ в области "П", а условие $T_{\omega_{\text{дв}}} < (T_1 + T_2 + \tau)$ - то же для области фильтрации "Ф". Таким образом, появляется возможность оптимизировать работу СА, скоординировав взаимодействие блока дозаторов с СНД. Для этого необходимо к существующему СНД подбирать такие типы дозирующих устройств, которые могут обеспечить требуемые частотные режимы. Рассмотрены переходные процессы в виде функций отклика СНД на дискретный входной сигнал. Анализ временной характеристики показывает, что значения концентрации, например для $\ell = 2$, систематически нарастая, приближаются к уровню равному половине постоянной составляющей $Q_0/2$ входного сигнала. При этом имеет место (рис. 4) колебательный режим, обусловленный возникновением знакопеременной скорости изменения входной концентрации, начиная с определенного момента $t_{\text{кол}}$. Определены зависимости момента возникновения колебательного режима от параметров загрузки ℓ и T . Анализ опытных данных показывает, что при больших значениях $\omega = 1,57 \dots 3,14 \text{ с}^{-1}$ сглаживающая способность СНД весьма высока и поэтому в пределах заданной точности расчетов пульсации малозаметны. При этом на форму выходной концентрации влияет главным образом реакция смесителя на постоянную составляющую дозирования. Поэтому для получения максимального сглаживания пульсаций от дозирующего устройства нужно вводить материал короткими импульсами ($\tau_{\text{вх}} < 10 \dots 20 \text{ с}$), т.к. на больших частотах следования сглаживание лучше. При очень малых периодах ввода значения $\tau_{\text{вх}}$ и ℓ практически не влияют на сглаживание. С понижением величины периода следования порций модуль частотной ПФ уменьшается, что соответствует возрастанию степени сглаживания. Последнее обстоятельство приводит к тому, что значение нижней границы зоны колебательности $t_{\text{кол}}$ сдвигается в область больших величин, приближающихся к $t_{\text{пл}}$. И наоборот, флуктуации концентрации, вызванные сигналом дозирования с основной гармоникой Фурье-



разложения меньшей частоты, проявляются уже на начальном участке переходного процесса. При дискретном дозировании СНД выступает в роли квазигармонизатора выходных флуктуаций концентрации. Он создает эффект гармонизации выходной концентрации смеси за счет низкочастотной фильтрации (рис. 4). С момента $t_{\text{кол}}$ начинается процесс установившихся колебаний с наложенной квазигармонической составляющей, равной частоте импульсов дозирования (особенно при $\ell = 2$) и существенно отличающихся от входных релаксационных флуктуаций (рис. 5).

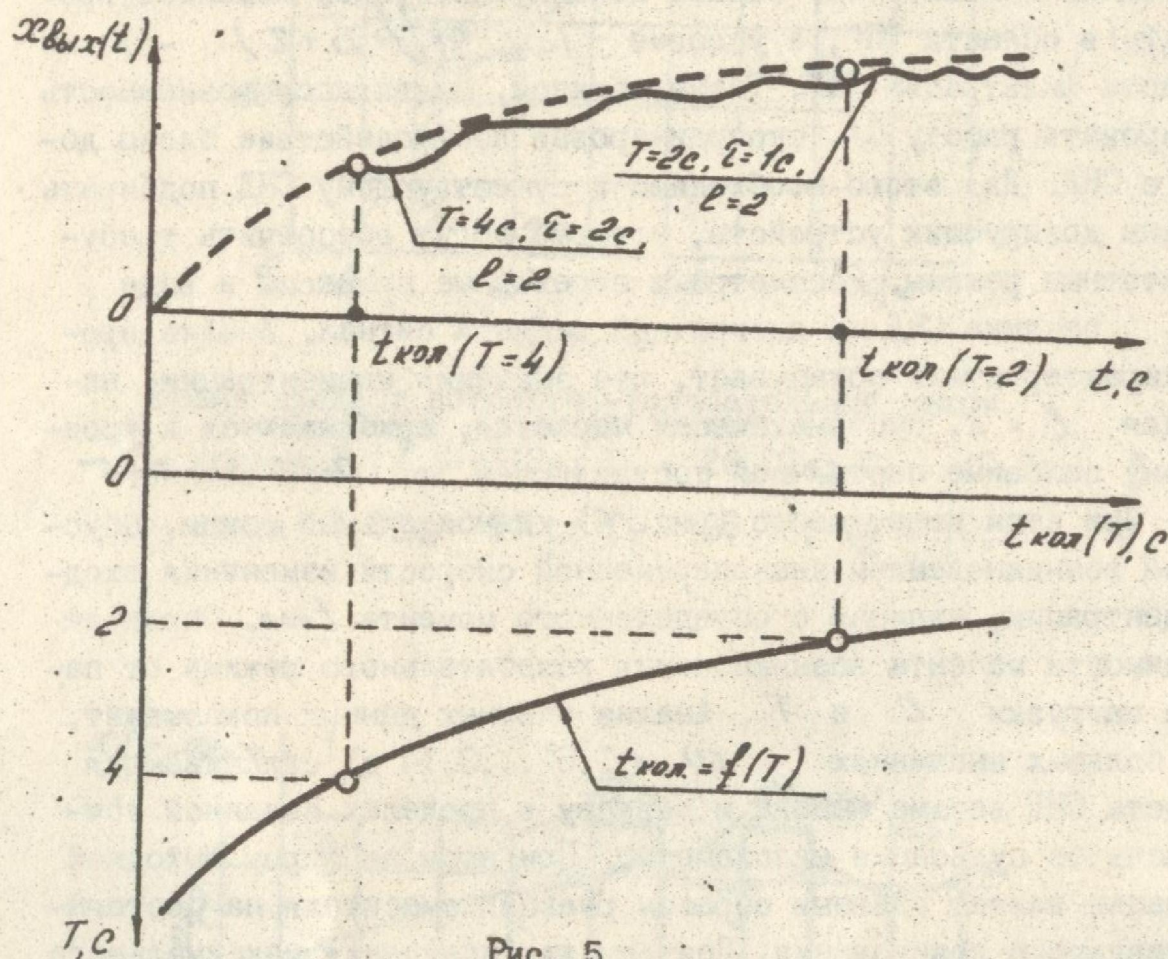


Рис. 5

В этом проявляются с одной стороны, свойства смесителя как аппарата низкочастотной фильтрации, а с другой – как устройства, гармонизирующего выходную концентрацию.

Четвертая глава посвящена разработке новых конструкций СА и исследованиям их лабораторных моделей. В состав агрегатов входят устройства для стабилизации потока материала из бункера, дозаторы объемного типа непрерывного и дискретного действия и СНД.

С целью сокращения затрат времени на проведение экспериментальных исследований предложены устройства и приборы, защищенные а.с. № 1061030 и № 1276978, а также методики для дискретного и непрерывного анализа качества смеси. Их принцип действия основан

на измерении методом компенсации магнитной проницаемости смеси или ее емкостных свойств. Для определения рациональных и устойчивых режимов поступления исходных компонентов из накопительной емкости дозатора на его транспортирующий узел проведено исследование процесса истечения из бункеров различной формы в условиях подвода энергии вибрации. Нами предложен способ предотвращающий сводообразование порошкообразных материалов в бункере, защищенный а.с. № 639774. Для его реализации необходимо вращать материал в направлении, противоположном движению рыхлителя с угловой скоростью $\omega \leq 6 \text{ с}^{-1}$. В этом случае усиливается разрушение сводовых структур за счет приложения к частицам материала дополнительных сдвигающих сил. Конструкция устройства, обеспечивающего более полную разгрузку бункера за счет улучшения сводоразрушения, защищена а.с. № 825424.

СНД, используемые нами в составе СА, хорошо сглаживают пульсации входных потоков. Поэтому для подачи в них материалов разработаны оригинальные конструкции шнековых и сетчатых дозирующих устройств объемного типа простых в изготовлении и обслуживании. Анализ показал, что для обеспечения равномерного во времени расхода сыпучего материала в шнековых дозаторах необходимо устранить пульсирующую составляющую потока. Это возможно в том случае, если направления подачи шнекового дозатора и силы тяжести будут противоположны. Такой принцип осуществлен нами в а.с. № 1064144. В конструкции винтового дозатора решена задача стабилизации насыпной плотности в результате полного заполнения межвиткового пространства материалом, который принудительно подается туда эксцентрично расположенной спиральной лопастью. Для подачи в СНД материалов, способных образовывать агломераты, предназначен сетчатый дозатор. Экспериментальная проверка предложенных нами конструкций дозаторов выявила их высокие технические характеристики и небольшие ошибки дозирования.

Нами разработана конструкция порционного дозатора объемного типа, защищенная а.с. № 1023204. Она полностью исключает изменение объема материала в мернике, т.к. отсутствует относительный сдвиг между ним и бесконечной лентой при движении каретки, что существенно повышает точность дозирования. С целью повышения точности в него введено устройство с ворошителем, размещенное в бункере, и опорная пластина, повторяющая сечение мерника. Экспериментальная проверка лабораторной модели показала, что ошибка дозирования находится в диапазоне от 1,5 до 3,1 %.

Внутри вибрационного прамоточного СНД, защищенного а.с. № 655417, расположено перемешивающее устройство, состоящее из вертикального штока и укрепленного на нем пакета конусообразных перфорированных тарелок. Под действием вибрации материал образует на тарелке "виброкипящий" слой, накапливается на ней, перемешивается и одновременно просеивается сквозь отверстия. Исходные компоненты, последовательно проходя через ряд вибрирующих тарелок, тщательно перемешиваются и выгружаются из аппарата через выходной штуцер. Экспериментальные исследования прамоточного вибрационного СНД показали его высокую эффективность при переработке разнообразных мелкодисперсных материалов. Они обобщены в виде зависимости:

$$V_c = c K^{-0.32} Q^{-0.3} N^{-0.2} \quad (16)$$

где: Q - производительность; N - число тарелок; $K = \frac{A\omega^2}{g}$.

На базе этого СНД нами разработано несколько других конструкций. Процесс виброперемешивания сыпучих материалов можно интенсифицировать, используя такой эффективный метод как рециркуляцию. Такая конструкция СНД с рециркуляцией, защищенная а.с. № 919720, позволяет существенно увеличить его сглаживающую способность. Некоторые ее недостатки устранены в а.с. № 1115790. Здесь дополнительно установлен ступенчатый перфорированный цилиндр, а внутри его эквидистантно расположен ступенчатый шнек. За счет дополнительного перемешивания и направленной рециркуляции улучшается качество конечного продукта. На базе а.с. № 1105220 нами разработана конструкция СНД с внутренним рециклом. Он представляет собой винтовой перфорированный желоб. Под действием вибрации компоненты виброожижаются, транспортируются вверх по желобу и частично просеиваются на нижележащий виток. За счет изменения параметров вибрации можно плавно регулировать соотношение этих потоков. Неравномерность распределения загрузки по виткам устраняется путем размещения в перемешивающем устройстве двух перфорированных дисков. Один расположен выше верхнего витка на величину шага, а другой - у нижней кромки последнего витка и снабжен затвором. С целью получения математической модели проведен анализ процесса. Выявлена зависимость между рециркулирующими частями загрузки смесителя β и тарелки α для установившегося процесса. Варьируя значение коэффициента β можно пропорционально изменять и среднее время пребывания частиц в СНД. Схема материальных потоков в нем для установившегося режима показана на рис. 6. Здесь α , рециркулирующая часть за-

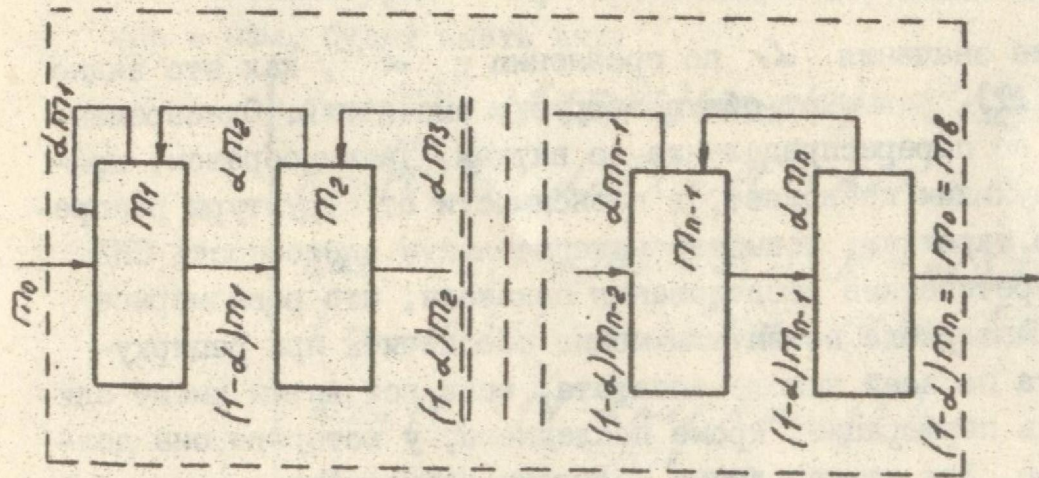


Рис. 6.

Схема материальных потоков в смесителе при установившемся режиме.

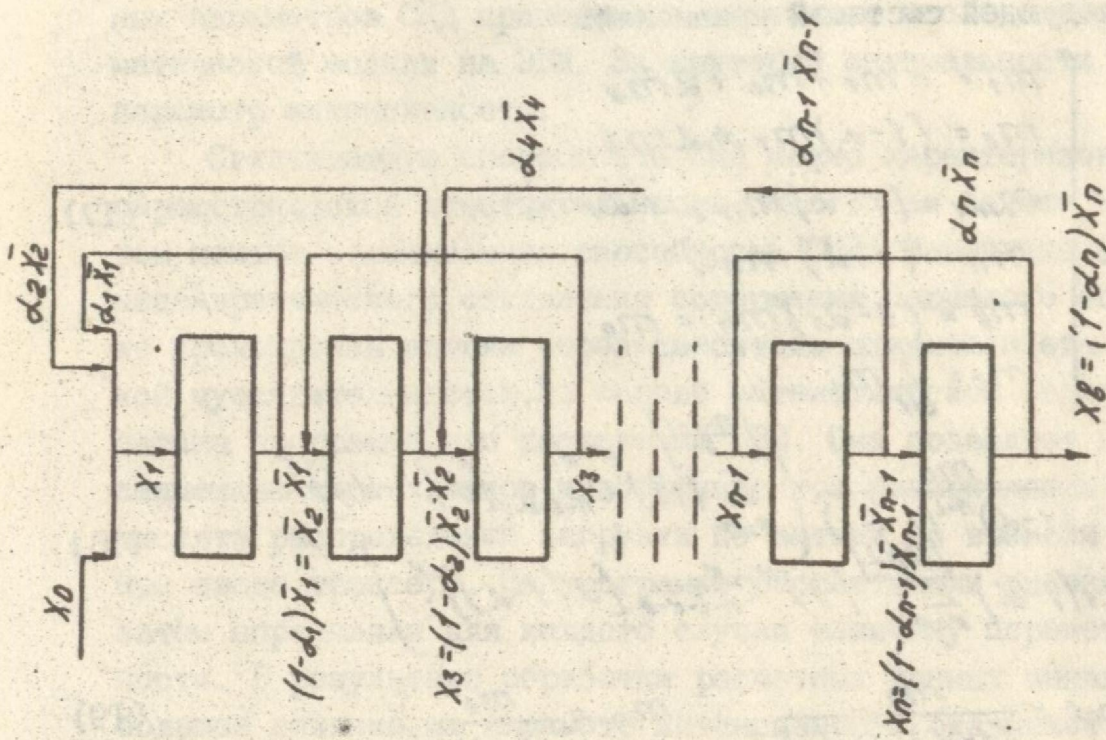


Рис. 7.

Схема движения материальных потоков в смесителе (тип А).

грузки последней тарелки.

Введем условие $\alpha_1 > \alpha$, что достигается уменьшением площади перфорации последней тарелки. Тогда процесс смешения можно описать следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} m_1 = \alpha m_1 + m_0 + \alpha m_2 \\ m_2 = (1-\alpha)m_1 + \alpha m_3 \\ \dots \\ m_{n-1} = (1-\alpha)m_{n-2} + \alpha_1 m_n \\ m_n = (1-\alpha)m_{n-1} \\ m_0 = (1-\alpha_1)m_n = m_0 \\ m_3 = \sum_{i=1}^n m_i \end{cases} \quad (I7)$$

или

$$m_i = \frac{m_0}{(1-\alpha)^{n-i}(1-\alpha_1)} \left\{ \sum_{k=0}^{\left[\frac{n-i-1}{2}\right]} (-1)^k C_{n-i-k-1}^k [d(1-\alpha)]^k - \alpha_1(1-\alpha) \sum_{k=0}^{\left[\frac{n-i-1}{2}\right]} (-1)^k C_{n-i-k-2}^k [d(1-\alpha)]^k \right\} \quad (I8)$$

$$m_{n-1} = \frac{m_0}{(1-\alpha)(1-\alpha_1)}; \quad m_n = \frac{m_0}{1-\alpha_1}; \quad (I9)$$

$$m_1 = \frac{m_0 + \alpha m_2}{1-\alpha}; \quad m_3 = \sum_{i=1}^n m_i; \quad m_0 = m_0, \quad (20)$$

где:

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}$$

Увеличение значения α_1 по сравнению с α , как это видно из выражения (I7), повышает общую загрузку смесителя. Одновременно происходит ее перераспределение по виткам. Таким образом, применение рециркуляции позволяет, в зависимости от структуры распределения α по тарелкам, повысить накопительную способность СНД в 6-8 раз. Теоретические исследования показали, что равномерное распределение материала по виткам можно обеспечить при рециркуляции материала по всей высоте аппарата, если все витки имеют одинаковую площадь перфорации, кроме последнего, у которого она должна быть меньше. Для этого случая получена зависимость

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{1+\alpha_1} \quad (2I)$$

Необходимо также выполнить ограничение $\alpha < 1/2$. Это позволит увеличить накопительную способность СНД до необходимой величины без опасений, что он "захлебнется". С целью определения рациональных параметров СНД проводилось численное исследование его математической модели на ЭВМ. За критерий оптимальности был принят параметр интенсивности.

Сглаживающую способность СНД можно характеризовать величиной параметрической чувствительности $K_{сгл}$. Чем больше величина $K_{сгл}$, тем меньше сглаживающая способность СНД. Изменение значения среднеквадратического отклонения содержания ключевого компонента после прохождения потока через смеситель оценивали его параметрической чувствительностью. На основе математической модели СНД разработана программа его расчета на ЭВМ. Она позволяет при заданных значениях числа витков и коэффициентов рециркуляции смесителя вычислять распределение загрузки по виткам во времени при импульсном вводе трассера. По программе рассчитывали значения $K_{сгл}$, а затем определяли для каждого случая величину параметра интенсивности. В результате обработки расчетных данных выявлено, что наибольшее влияние на параметр интенсивности оказывает коэффициент рециркуляции α_1 . Разработана программа расчета на ЭВМ качества смеси при непрерывной и порционной подаче исходных компонентов в СНД. Проанализировано влияние только рециркуляции на однородность смеси во времени для различных видов организации движения материальных потоков в вибрационных СНД. На рис. 7 приведена схема движения потоков в СНД типа А.

Система уравнений, определяющая корреляционные функции потоков в нем, будет иметь вид:

$$\begin{cases} Kx_1(\tau) = \alpha_1^2 K\bar{x}_1(\tau) + Kx_0(\tau) + \alpha_2^2 K\bar{x}_2(\tau) \\ Kx_2(\tau) = (1 - \alpha_1)^2 K\bar{x}_1(\tau) + \alpha_3^2 K\bar{x}_3(\tau) \\ Kx_i(\tau) = (1 - \alpha_{i-1})^2 K\bar{x}_{i-1}(\tau) + \alpha_{i+1}^2 K\bar{x}_{i+1}(\tau) \\ Kx_{n-1}(\tau) = (1 - \alpha_{n-2})^2 K\bar{x}_{n-2}(\tau) + \alpha_n^2 K\bar{x}_n(\tau) \\ Kx_n(\tau) = (1 - \alpha_{n-1})^2 K\bar{x}_{n-1}(\tau) \\ Kx_0(\tau) = (1 - \alpha_n)^2 K\bar{x}_n(\tau) \end{cases} \quad (22)$$

Примем $\alpha_i = \alpha$, $i = \overline{1,5}$, $\bar{x}_i(\tau) = x_i(\tau)$, т.е. число тарелок в смесителе равно пяти, коэффициенты рециркуляции каждого потока равны и однородность смеси не меняется при прохождении через виток. Тогда система (22) преобразуется к виду

$$\begin{cases} Kx_1(\tau) = d^2 Kx_1(\tau) + Kx_0(\tau) + d_2 Kx_2(\tau) \\ Kx_2(\tau) = (1-d)^2 Kx_1(\tau) + d^2 Kx_3(\tau) \\ Kx_3(\tau) = (1-d)^2 Kx_2(\tau) + d^2 Kx_4(\tau) \\ Kx_4(\tau) = (1-d)^2 Kx_3(\tau) + d^2 Kx_5(\tau) \\ Kx_5(\tau) = (1-d)^2 Kx_4(\tau) \\ Kx_6(\tau) = (1-d)^2 Kx_5(\tau) \end{cases} \quad (23)$$

Найдем связь между корреляционными функциями входящего и выходящего потоков

$$Kx_6(\tau) = (1-d)^2 (1-d)^2 Kx_4(\tau); \quad Kx_4(\tau) = \frac{(1-d)^2 Kx_3(\tau)}{1-d^2(1-d)^2},$$

$$Kx_3(\tau) = \frac{(1-d)^2 [1-d^2(1-d)^2] Kx_2(\tau)}{1-2d^2(1-d)^2},$$

$$Kx_2(\tau) = \frac{(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2] Kx_1(\tau)}{1-2d^2(1-d)^2 - d^2(1-d)^2 [1-d^2(1-d)^2]},$$

$$Kx_1(\tau) = \frac{1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4 Kx_0(\tau)}{(1-d^2)[1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4] - d^2(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2]}.$$

Тогда

$$Kx_2(\tau) = \frac{(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2] Kx_0(\tau)}{(1-d^2)[1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4] - d^2(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2]},$$

$$Kx_3(\tau) = \frac{(1-d)^2 [1-d^2(1-d)^2] Kx_0(\tau)}{(1-d)^2 [1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4] - d^2(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2]},$$

$$Kx_4(\tau) = \frac{(1-d)^2 (1-d)^2 Kx_0(\tau)}{(1-d)^2 [1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4] - d^2(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2]},$$

$$Kx_6(\tau) = \frac{(1-d)^7 Kx_0(\tau)}{(1+d)[1-3d^2(1-d)^2 + d^4(1-d)^4] - d^2(1-d)^2 [1-2d^2(1-d)^2]}.$$

При

$d = 0$ (отсутствие рециркуляции)

$$Kx_6(\tau) = \frac{1}{1} Kx_0(\tau), \text{ т.е. } \sigma_{x_6}^2 = Kx_6(0) = Kx_0(0) = \sigma_{x_0}^2$$

При $\alpha \rightarrow 1$	$\sigma_{xg}^2 \rightarrow 0$
При $\alpha \rightarrow 1/3$	$\sigma_{xg}^2 = 0,005 \sigma_{x0}^2$
При $\alpha \rightarrow 0,1$	$\sigma_{xg}^2 = 0,446 \sigma_{x0}^2$

Это говорит о том, что даже одна рециркуляция значительно повышает однородность смеси. Аналогичным образом рассмотрено протекание процесса в СНД с различной топологией потоков. Их сравнение при одном и том же коэффициенте рециркуляции позволило выявить наиболее рациональную конструкцию.

В центробежном СНД, защищенном а.с. № 997776, смешивание происходит в накопителе и на внутренних поверхностях пакета роторов и конусных перегородок. Окончательная доводка смеси осуществляется в нижней части аппарата. Основная идея предлагаемой конструкции — возможность сглаживания амплитуд питающих потоков в 8–10 раз за счет использования регулирующей диафрагмы. Выявлено, что наиболее значимым параметром, влияющим на качество смеси, является время пребывания материала в СНД. Его величину можно регулировать с помощью диафрагмы, установленной в нижней части накопителя.

Для получения смесей хорошего качества целесообразно совместить в одном аппарате процессы смешивания и диспергирования. Центробежный смеситель-диспергатор защищен а.с. № 134513 ДСП. Здесь более качественную смесь удастся получить благодаря турбулизации и циркуляции потока внутри отражательной поверхности, имеющей форму шарового слоя. Наличие крестообразных тарелок с режущими кромками в накопителе и отражателя в виде шарового слоя выгодно отличает данную конструкцию от ранее рассмотренных. Дальнейшим развитием наших идей служит конструкция смесителя-диспергатора, защищенного а.с. № 138915 ДСП. Опытная проверка центробежных СНД нашей конструкции показала, что они позволяют получать высококачественные смеси порошкообразных материалов с различными физико-механическими характеристиками при соотношении исходных компонентов 1:100 и выше. Причем только при частоте вращения ротора $\omega \geq 250 \text{ с}^{-1}$ качество смеси начинает устойчиво улучшаться. Это объясняется тем, что при меньших частотах диспергирующая способность аппарата сведена к минимуму. Синтетические витамины (особенно B_2 , имеющий относительно большой размер частиц) на практике приходится предварительно растирать для обеспечения более равномерного их распределения в потоке муки. Для этого случая особенно целесообразно совмещение процессов смешения и диспергирования в одном аппарате. Большая площадь "свежеобразованной" поверхности тонкоизмельченно-

го материала облегчает его дальнейшую технологическую обработку и позволяет улучшить физико-механические характеристики смеси.

В пятой главе проводится сопоставление результатов машинного и физического моделирования. В ее начале излагаются основные сведения по разработанному автоматизированному комплексу для анализа динамических непрерывнодействующих систем и его основные характеристики. Достоверность результатов, полученных при количественном анализе разработанных СНД с помощью цифрового машинного моделирования на ЭВМ СМ, было проверено путем сравнения расчетных и опытных кривых отклика смесительной системы на дискретное и (или) непрерывное входное воздействие со стороны блока дозаторов, работающих от задатчика величины порций. Анализ полученных результатов позволил сделать вывод, что в исследованном диапазоне изменения ПФ дозирующих устройств и СНД средняя относительная ошибка не превышала 8 %.

Экспериментальная проверка математических моделей СНД с рециклом, проводилась по накопительной способности, путем сравнения начальных и центральных моментов опытной и теоретической кривых функций плотности распределения времени пребывания (ФПРВП), проверкой гипотезы о возможности оценки среднеквадратичного отклонения концентрации ключевого компонента на выходе из СНД по величине его параметрической чувствительности, а также устойчивости гидродинамического режима в СНД при различных коэффициентах межвитковой рециркуляции. Например, анализ данных показывает, что максимальное расхождение между опытными ФПРВП и рассчитанными теоретическим путем не превышает $\pm 8\%$. Экспериментальным путем были найдены значения коэффициентов V_c для каждого витка смесителя. Анализ данных показывает, что максимальное отклонение расчетных и опытных значений составляет $\pm 7\%$ в зависимости от физико-механических характеристик материалов. Здесь же приводится инженерная методика расчета вибрационного СНД с внутренним рециклом.

Шестая глава посвящена описанию промышленной реализации наших разработок.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Предложен способ математического описания процесса смешивания в ФСС с использованием методов цифрового машинного моделирования, позволяющих в интерактивном режиме подобрать рациональные параметры непрерывнодействующего СА, необходимые для получения смеси заданного качества. Способ осуществляется в два этапа: аналитически определяются аппроксимационные изображения по Лапласу,

задаваемых входных возмущений и ПФ фрагментов системы; для проведения интерактивного анализа системы каждый ее фрагмент вводится в ЭВМ в виде направленной дуги графа с указанием начала и конца дуги.

2. Результаты моделирования дискретных и сложных дискретно-непрерывных входных сигналов показали, что при скважности $\ell = 2$ возможно их представление рядом Фурье и способом фазированных гармоник. При других значениях скважности способ Фурье-разложения более предпочтителен, вследствие меньшей сложности машинной модели и небольших погрешностях аппроксимации.

3. 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 уменьшить время процесса смешения.

4. Исследована сглаживающая способность СНД путем направленного варьирования постоянных времени ПФ, определяющих их инерционные свойства. На основании рассчитанных частотных зависимостей прослежено изменение степени сглаживания на разных частотах и определены значения периодичности работы дозаторов для обеспечения требуемого качества смеси.

5. При исследовании процессов смешивания в условиях дискретного и сложного дискретно-непрерывного дозирования определены величины коэффициентов сглаживания, наличие области абсолютно-колебательного режима и параметры ее определяющие. Выявлено, что при дискретном дозировании смеситель выступает в роли квазигармонизатора выходных флуктуаций, преобразуя негармонические дискретные сигналы в псевдогармонические за счет низкочастотной фильтрации.

6. Разработаны приборы, защищенные двумя авторскими свидетельствами на изобретения, и методики для дискретного и непрерывного анализа качества смеси. В составе СА предложены конструкции устройств, предотвращающих сводообразование в бункерах дозаторов, защищенные двумя авторскими свидетельствами. Выявлены основные факторы, влияющие на устойчивость процесса истечения плохосыпучих материалов, в том числе в условиях подвода энергии вибрации.

7. Разработаны оригинальные конструкции восьми дозаторов объемного типа, защищенные шестью авторскими свидетельствами, и установлены факторы, оказывающие определяющее воздействие на точность работы шнековых, сетчатого и порционного дозаторов высокодисперсных материалов.

8. Предложены конструкции вибрационных СНД, защищенные пятью авторскими свидетельствами и проведен анализ влияния топологии материальных потоков в них на однородность смеси. Разработаны математические модели вибрационного СНД и программы их расчета на ЭВМ.

9. Разработаны конструкции шести центробежных СНД, защищенные пятью авторскими свидетельствами. Выявлены основные факторы, влияющие на сглаживание флуктуаций питающих потоков и качество конечной смеси. Доказана целесообразность совмещения процессов измельчения и смешения в одном аппарате при получении композиций высокодисперсных материалов при соотношении исходных компонентов 1:100 и выше.

10. Анализ результатов физического и машинного моделирования СА подтвердил адекватность разработанных нами математических моделей процессу смешения высокодисперсных материалов в них.

11. Смесители, дозаторы и транспортирующие устройства нашей конструкции, защищенные авторскими свидетельствами № 997776, 1023204, 1064144, 1344307, 1345413 ДСП, 1389256 ДСП, 1472110 использованы при аппаратурном оформлении стадий смешения в технологических схемах для получения: а) витаминизированных порошкообразных продуктов питания в составе смесительных агрегатов ДСВ-4-10/50, ДСВМ-150, ВСА-2, ЦСД-2 (НПО ПП и СПТ, г. Москва); б) пряностей в составе дозирующе-транспортирующего агрегата (ПО "Колосс" г. Москва); в) смеси микроэлементов и ее расфасовки в составе многокомпонентной дозирочно-смесительной станции типа МКС (Московский завод по производству ветпрепаратов); г) новых композиционных материалов Аропласта марки Б-4 и пенопласта, выпускаемых на опытном заводе НИИХП НПО "Карболит" г. Кемерово; д) алюмоорганической шихты и шихты для синтеза искусственных алмазов, на заводе "Алмаз" г. Ереван; е) шихты, используемой в стекольном производстве ПО "Сибэлектросвет" г. Томск.

Наше доленое участие в фактическом экономическом эффекте, полученном от внедрения этих разработок, составляет 1,048 млн. руб. в год.

По теме диссертации опубликовано 86 научных трудов, в т.ч. 22 авторских свидетельства на изобретения. Наиболее значительными из них являются:

1. К методике определения интенсивности продольного перемеши-

вания сыпучих материалов в проточных аппаратах. /В.Н. Иванец, И.И. Лукьянов//Химия и технолог. топлив и масел.-1968.- № 10.- с.41-44.

2. Иванец В.Н. Исследование продольного перемешивания сыпучих материалов во вращающихся аппаратах: Автореф. канд. дис.- М, 1969.- 16 с.

3. Разработка смесителей нового типа для сыпучих материалов с целью сокращения выбросов в окружающую среду. /В.Н. Иванец, В.А. Плотников, Ю.С. Желтухин//Тез. научн.-практ. конф. "Проблемы охраны окружающей среды региона с интенсивно развивающейся промышленностью".- Кемерово.- 1977.- с.110-112 ДСП.

4. Иванец В.Н., Плотников В.А., Иванец Г.Е. Вибросмеситель для порошкообразных материалов//Реф. сборник/ НИИТЭХИМ сер. "Оборудование, его эксплуатация, ремонт и защита от коррозии в химической промышленности".- 1977.- Вып. 10.- с.11-13.

5. Иванец В.Н., Плотников В.А. Винтовой дозатор с принудительным нагнетанием материала//Научн.-техн. реф. сб./ ЦИНТИхимнефтемаш. сер. "Хим. и нефтяное машиностроение".- 1979.- Вып.5.- с.3-4.

6. Курочкин А.С., Иванец В.Н., Плотников В.А. Интенсификация смешения сыпучих материалов в производствах пластмасс и пищевых продуктов//Науч. тр./ МТИП, - 1981.- Вып. 2.- с.166-172.

7. Иванец В.Н., Курочкин А.С. Интенсификация процесса смешения сыпучих материалов в центробежном смесителе.//Науч. тр./ МТИП, 1983.- Вып. 1.- с.29-33.

8. Сулеин Г.С., Иванец В.Н. Исследование влияния порционного дозирования на качество смеси, получаемой в вибрационном смесителе //Науч. тр./ МТИП.- 1983.- Вып. 1.- с.33-39.

9. Сулеин Г.С., Иванец В.Н. Порционный дозатор объемного типа //Науч.-техн. реф. сб./ ЦИНТИхимнефтемаш. сер. "Хим. и нефтяное машиностроение".- 1984.- Вып. 2.- с.11-12.

10. Г.С. Сулеин, В.Н. Иванец, Ю.А. Коршиков. Совершенствование стадии смешения процесса получения комбикормов.//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1984.- №3.- с.76-78.

11. Сулеин Г.С., Иванец В.Н., Коршиков Ю.А. О моделировании аппарата для смешения сыпучих материалов.//Науч. тр./ Ивановский химико-технологический ин-т.- 1984.- Вып. 1.- с.119-123.

12. Курочкин А.С., Иванец В.Н., Коршиков Ю.А. Центробежный смеситель.//Научн.-техн. реф. сб.// ЦИНТИхимнефтемаш. Сер. "Хим. и нефтяное машиностроение".- 1984.- Вып. 12.- с.10-11.

13. Использование порционных дозаторов в процессе непрерывного смешивания сыпучих материалов /А.С. Курочкин, В.Н. Иванец//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Пути совершенствования технологических процессов и оборудования для производства, хранения и транспортировки продуктов питания".- М.- 1984.- с.190.
14. Влияние упорядоченной структуры питающих потоков на качество смеси в смесителях непрерывного действия /А.С. Курочкин, В.Н. Иванец//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1984.- №5.- с.55-57.
15. Курочкин А.С., Иванец В.Н. Исследование возможности применения вибрационного смесителя в производстве фенолформальдегидных пресскомпозиций //Науч. тр. КНИХП КНПО "Карболит"/НИИТЭХИМ.- 1985.- Вып. I.- с.68-74.
16. Системный частотно-временной анализ процессов смешения сыпучих материалов при периодических изменениях входной концентрации /В.Н. Иванец, Б.А. Федосенков, А.С. Курочкин//Тез. докл. Всесоюзной конф. "Технология сыпучих материалов - Химтехника-86".- Белгород.- 1986.- Ч.2.- с.33-35.
17. О прогнозировании качества смеси сыпучих материалов /В.Н. Иванец, Г.С. Сулейн//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Технология сыпучих материалов - Химтехника-86". Белгород.- 1986.- Ч.2.- с.36-38.
18. Методы интерактивного машинного моделирования смесительных систем / В.Н. Иванец, Б.А. Федосенков//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Технология сыпучих материалов - Химтехника-86". Белгород.- 1986.- Ч.2.- с.16-17.
19. Моделирование процесса непрерывного смешивания порошкообразных материалов /В.Н. Иванец, А.С. Курочкин//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1987.- №1.- с.91-95.
20. Прогнозирование качества смеси в вибрационном смесителе с рециклом /В.Н. Иванец, Д.А. Коршиков, Г.Е. Иванец//Тез. докл. Всесоюзной конф. "Интенсификация процессов механической переработки сыпучих материалов". Иваново.- 1987.- с.6-10.
21. Новые конструкции вибрационных и центробежных смесителей для переработки порошкообразных материалов /В.Н. Иванец и др.//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Применение аппаратов порошковой технологии и процессов термосинтеза в народном хозяйстве". Томск.- 1987.- с. 7-8.
22. Разработка и усовершенствование конструкций дозаторов объемного типа для порошкообразных материалов /В.Н. Иванец, А.А. Крохалев//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Интенсификация процессов ме-

ханической переработки сыпучих материалов". Иваново.- 1987.- с. 134-135.

23. Смесители порошкообразных материалов для витаминизации пищевых и кормовых продуктов./В.Н. Иванец//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1988.- №1.- с.89-97.

24. Новые конструкции смесительных агрегатов центробежного типа для переработки порошкообразных материалов./В.Н. Иванец//Тез. докл. Всесоюзн. конф. "Социально-экономические проблемы достижения коренного перелома в эффективности развития производственных сил Кузбасса". Хим. промышленность. Кемерово.- 1988.- с.65-66 ДСП.

25. Реализация и анализ моделей системы смешивания на ЭВМ./В.Н. Иванец, А.С. Курочкин//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1988.- №2.- с.97-100.

26. Методы моделирования процессов смешивания дисперсных материалов при непрерывной и дискретной загрузке смесительного агрегата /В.Н. Иванец, Б.А. Федосенков//Изв. вузов. Пищевая технология.- 1988.- №5.- с.68-72.

27. Иванец В.Н., Федосенков Б.А. Методы анализа процессов смешения при дискретной подаче материала в смесительный агрегат //Науч. тр./Ивановский химико-технологический инст-т,- 1988.- Вып. I.- с.69-75.

28. Влияние температурного поля на сохранность микродобавок витаминов в процессе получения пищевых концентратов /В.Н. Иванец и др.//Тез. докл. III Всесоюзн. научн. конф. "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания". М.- 1988.- с.437-438.

29. Использование центробежных смесителей-диспергаторов в процессе получения витаминизированных продуктов питания /А.С. Курочкин, В.Н. Иванец и др.//Тез. докл. III Всесоюзн. научн.-техн. конф. "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания". М.- 1988.- с.439-440.

30. Аппаратурное оформление процесса получения витаминизированных продуктов питания /В.Н. Иванец и др.//Тез. докл. III Всесоюзн. научн.-техн. конф. "Разработка процессов получения комбинированных продуктов питания". М.- 1988.- с.454-455.

31. А.с. 631188 СССР, МКИ³ B01F7/28. Центробежно-пульсационный аппарат /С.И. Лазарев, В.А. Плотников, В.Н. Иванец (СССР)- 2456016/23-26. Заявл. 01.03.77; Оpubл. 5.II.78., Бюл. №41.

32. А.с. 655419 СССР, МКИ³В01F 11/00. Вибрационный смеситель. /В.А.Плотников, В.Н.Иванец (СССР) - 2551609/23-26. Заявл. 07.12.77; Оpubл. 5.04.79, Бюл. № 13.

33. А.с. 919720 СССР, МКИ³В01F 11/00. Вибрационный смеситель. /В.Н.Иванец, В.А.Плотников, А.Т.Еремин (СССР) - 296558/23-26. Заявл. 02.07.80; Оpubл. 15.04.82, Бюл. № 14.

34. А.с. 997775 СССР, МКИ³В01F 7/26; В28С5/16. Центробежный смеситель порошкообразных материалов /А.С.Курочкин, В.Н.Иванец, Г.С.Сулеин, А.А.Крохалев (СССР) - 3383241/29-33. Заявл. 05.01.82; Оpubл. 23.03.83, Бюл. № 7.

35. А.с. 1023204 СССР, МКИ³Г 01F 13/00, Устройство для объемного дозирования /Г.С.Сулеин, В.Н.Иванец (СССР) - 3284342/18-10. Заявл. 28.04.82; Оpubл. 15.06.83, Бюл. № 22.

36. А.с. 1064144 СССР, МКИ³Г 01F 13/00. Шнековый дозатор. /Г.С.Сулеин, В.Н.Иванец (СССР) № 3521508/18-10. Заявл. 11.11.82, Бюл. № 48.

37. А.с. 1115790 СССР, МКИ³В01F 11/00. Вибрационный смеситель /А.С.Курочкин, В.Н.Иванец, А.А.Крохалев, Ю.А.Коршиков (СССР) - 3567541/23-21. Заявл. 25.03.83; Оpubл. 30.09.84, Бюл. № 36.

38. А.с. 1278236 СССР, МКИ³В28С5/16. Центробежный смеситель /А.С.Курочкин, В.Н.Иванец, Д.Г.Нерсисян, В.О.Киришян (СССР) - 3882313/29-33. Заявл. 12.04.85; Оpubл. 23.12.86, Бюл. № 47.

39. А.с. 1278239 СССР, МКИ³В28С5/16. Центробежный смеситель /А.С.Курочкин, В.Н.Иванец, Д.Г.Нерсисян, В.О.Киришян (СССР) - 3902489/29-33. Заявл. 12.04.85; Оpubл. 23.12.86, Бюл. № 47.

40. А.с. 1345413 СССР, МКИ³В01F 7/26. В28С5/16. Смеситель сыпучих материалов /А.С.Курочкин, В.Н.Иванец, Б.В.Ерж, В.В.Юнников, А.Д.Марков (СССР) - 3927897/31-26. Заявл. 11.07.85; ДСП.

41. А.с. 1382743 СССР, МКИ³В66В1/10. Лопастной дозатор /В.Н.Иванец, А.Г.Пимаков, Г.С.Сулеин, Л.П.Кинзбург (СССР) - 4033683/31-13. Заявл. 07.03.86; Оpubл. 23.03.99, Бюл. № 11.

42. А.с. 1389156 (СССР), МКИ³В28С5/16. Смеситель-диспергатор. /В.Н.Иванец, А.С.Курочкин, С.И.Батурина и др. (СССР) - 4107811/31-33. Заявл. 11.07.85. ДСП.

43. А.с. 1472110 (СССР), МКИ³В01F 11/00. Вибрационный смеситель /Г.С.Сулеин, В.Н.Иванец, Ю.А.Коршиков, В.И.Коврижных, А.Н.Абияка (СССР) - 4220681/31-26. Заявл. 01.04.87; Оpubл. 15.04.89, Бюл. № 14.

Зубов