

На правах рукописи



ЗОРИНА ТАТЬЯНА ВЛАДИМИРОВНА

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОСМЕСИТЕЛЯ С РЕЦИКЛ КАНАЛОМ ДЛЯ
ПОЛУЧЕНИЯ МУЧНЫХ СЫПУЧИХ СМЕСЕЙ**

05.18.12 – Процессы и аппараты пищевых производств

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Кемерово 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Кемеровский государственный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Бородулин Дмитрий Михайлович

Официальные оппоненты: **Орешина Марина Николаевна,**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Государственный университет
управления», г. Москва, кафедра
информационных систем, доцент

Садов Виктор Викторович,
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Алтайский государственный
аграрный университет», г. Барнаул, кафедра
механизации производства и переработки
сельскохозяйственной продукции,
заведующий кафедрой

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Ярославский государственный
технический университет», г. Ярославль

Защита состоится 11 июня 2021 г. в 13.00 на заседании диссертационного совета Д 212.088.11 при ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» по адресу: г. Кемерово, б-р Строителей, 47, 2 лекц. ауд.

Отзывы на автореферат отправлять по адресу: 650000, г. Кемерово, ул. Красная, 6.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте ФГБОУ ВО «Кемеровский государственный университет» (<https://kemsu.ru/science/dissertation-councils/diss-212-088-11/protects/7588/>)

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета

Попова Дина Геннадьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Актуальной для большинства стран, включая и Российскую Федерацию, является проблема сбалансированного питания. Для её решения предприятия пищевой промышленности выпускают полуфабрикаты в виде сыпучих композиций с повышенным содержанием белка для производства хлебобулочных изделий.

Многокомпонентность смесей позволяет сбалансировать их состав и разрабатывать готовые изделия, которые способны укреплять защитные свойства организма человека. Увеличение спроса на полуфабрикаты в виде мучных сыпучих смесей стимулирует рост масштабов их производства. А поскольку доля каждого компонента в общей массе мучной композиции в большинстве случаев не превышает 1:100, их смешивание целесообразно проводить по непрерывной схеме в винтовых вертикальных вибрационных смесителях. Именно в них получают мучные сыпучие смеси высокого качества. Смешение компонентов в данных смесителях непрерывного действия (СНД) происходит в тонком виброкипящем слое (20-50 мм) в связи с наличием развитого рабочего органа, который виброактивирует дисперсную систему. Это дает возможность значительно сократить время смешивания. Кроме того данные СНД хорошо сглаживают флуктуации материальных потоков.

Перечисленные достоинства естественным образом диктуют необходимость расширения линейки винтовых вибрационных смесителей (ВС) с целью максимального удовлетворения потребностей населения в производстве полуфабрикатов в виде мучных сыпучих смесей. Поэтому исследование нового вибрационного СНД для получения мучных сыпучих смесей, является актуальным.

Степень разработанности темы исследования. Исследованиями процесса смешивания сыпучих композиций в различных смесеприготовительных аппаратах занимались такие ученые, как Ю.И. Макаров, В.Н. Иванец, Д.М. Бородулин, М.Н. Орешина, Т.Г. Мартынова, А.Б. Капранова, М.Ю. Таршис, И.Я. Федоренко, В.В. Садов, А.Б. Шушпанников, Г.Е. Иванец, Д.Н. Пирожков, А.А. Гнездилов, И.А. Бакин, Ю.Д. Видинеев, Д.А. Домашенко, С. Harwood, К. Walanski, E. Luebcke, D. Kuakpetoon, R. A. Flores, G. A Milliken, I. Vauman, D. Curic, M. Voban и др.

Цель работы. Разработка и исследование новой конструкции высокоэффективного вибросмесителя с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей.

Задачи исследований:

1. провести литературно-патентный обзор существующих конструкций вибрационных СНД для выбора направления дальнейших исследований;
2. на основе корреляционного анализа разработать математическую модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом;
3. разработать конструкцию вибрационного СНД с рецикл каналом, реализующего метод «последовательного разбавления»;

4. определить рациональные технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей заданного качества и степень влияния исследуемых параметров на качество получаемого продукта при помощи регрессионного анализа;

5. провести опытно-промышленные испытания вибрационного СНД с рецикл каналом в составе технологических линий получения мучных сыпучих смесей. Провести аминокислотный анализ хлебобулочного изделия из мучной сыпучей смеси, полученной в разработанном вибрационном СНД.

Объектом исследования являлась конструкция вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей. **Предметом исследования** являлось определение рациональных технологических параметров работы вибросмесителя с рецикл каналом.

Научная новизна. Получена математическая модель вибрационного СНД, реализующего метод «последовательного разбавления», на основе корреляционного анализа; установлено влияние параметров вибрации на качество готовых мучных сыпучих смесей, скорость их вибротранспортирования и расход через перфорацию; определены рациональные технологические параметры вибрационного СНД с рецикл каналом, при которых получают мучные сыпучие смеси заданного качества.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость работы заключается в возможности применения в пищевой индустрии полученных на основе корреляционного анализа математических уравнений, которые описывают процесс смешивания в вибрационном СНД.

Практическая значимость работы: разработка вибрационного СНД с рецикл каналом (патент РФ 2626415), позволяющего получать мучные сыпучие смеси высокого качества; разработка аппаратного оформления технологических линий производства мучных сыпучих смесей высокого качества, включающих в свой состав вибросмеситель с рецикл каналом.

Методология и методы исследования. Методология выполнения исследования включает теоретическую, экспериментальную и практическую направленности. Использовались следующие методы исследования: поиск путей оптимизации работы вибросмесителя с рецикл каналом; математическое моделирование; корреляционный и регрессионный анализ; практическое применение вибрационного СНД в промышленных условиях.

Положения, выносимые на защиту. Математическая модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом, созданная на основе корреляционного анализа; конструкция разработанного вибросмесителя (патент РФ 2626415); результаты исследований процесса смешивания мучных сыпучих смесей в вибрационном СНД с рецикл каналом; промышленная апробация разработанного вибрационного СНД.

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения данной диссертации научно обоснованы, подтверждаются большим объемом экспериментальных данных и апробацией в условиях реального производства.

Основное содержание диссертации отражено в 17 работах, в том числе 1 публикация в международном издании, входящем в наукометрические базы данных Scopus, 4 публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ, 2 патента РФ. Материалы диссертации обсуждены на: Международных научных конференциях «Пищевые инновации и биотехнологии» (г. Кемерово, 2014-2018 гг.); Международной научно-практической конференции «Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств» (г. Воронеж, 2016 г.); Международном симпозиуме «Инновации в пищевой биотехнологии» (г. Кемерово, 2019 г.); Национальной конференции «Холодильная техника и биотехнологии» (г. Кемерово, 2019 г.).

В приложениях диссертации представлены акты испытаний вибрационного СНД с рецикл каналом, которые подтверждают практическую значимость результатов исследований.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, включающих литературно-патентный обзор, математическое моделирование процесса смешивания мучных сыпучих смесей, аппаратное и методологическое оформление процесса смешивания, результаты экспериментальных исследований, промышленную реализацию, результаты и выводы, заключение, список литературы (174 наименования) и приложений. Основной текст изложен на 117 страницах. Работа содержит 32 таблицы и 46 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении описана общая характеристика работы, определены цель, задачи, объект и предмет исследований.

В первой главе рассмотрены вопросы влияния неравномерности подачи сыпучих материалов на качество готовых композиций. Описано состояние и перспективы развития современного смесеприготовительного оборудования. Обоснован выбор лотковых вертикальных СНД вибрационного типа в качестве основы для поиска технического решения.

Во второй главе на основе корреляционного анализа описаны математические модели процесса смешивания в базовых конструкциях и новом вибрационном СНД с рецикл каналом, реализующем метод «последовательного разбавления», с целью сравнения значений их способностей сглаживать флуктуации входящих материальных потоков и выявления целесообразности использования исследуемого смесителя.

На рисунке 1 представлены схемы движения материальных потоков в разработанном (Патент № 2626415) и в базовом вибрационных СНД (Патент РФ 2286203). Проведем анализ схемы организации движения потоков в разработанном вибросмесителе. Ключевой компонент подается на рабочую поверхность дополнительного рабочего органа смесителя. Массовый расход фонового компонента поделён на три части: 1-ая часть подается вместе с ключевым на дополнительный рабочий орган; подача 2-й и 3-й частей осуществляется на второй (X_{01}) и третий (X_{02}) витки основного рабочего

органа. Благодаря перфорации основного рабочего органа создается рецикл канал, который осуществляет возврат некоторой части компонентов на нижележащие витки.

Так как дополнительный рабочий орган не имеет перфорации, то на данном участке осуществляется проточное движение материала. Рассмотрим только основной рабочий орган (количество витков $n = 6$). Обязательным является выполнение условия $X_0 = X_{01} + X_{02}$, примем $X_{01} = \frac{1}{2}X_0$, $X_{02} = \frac{1}{2}X_0$.

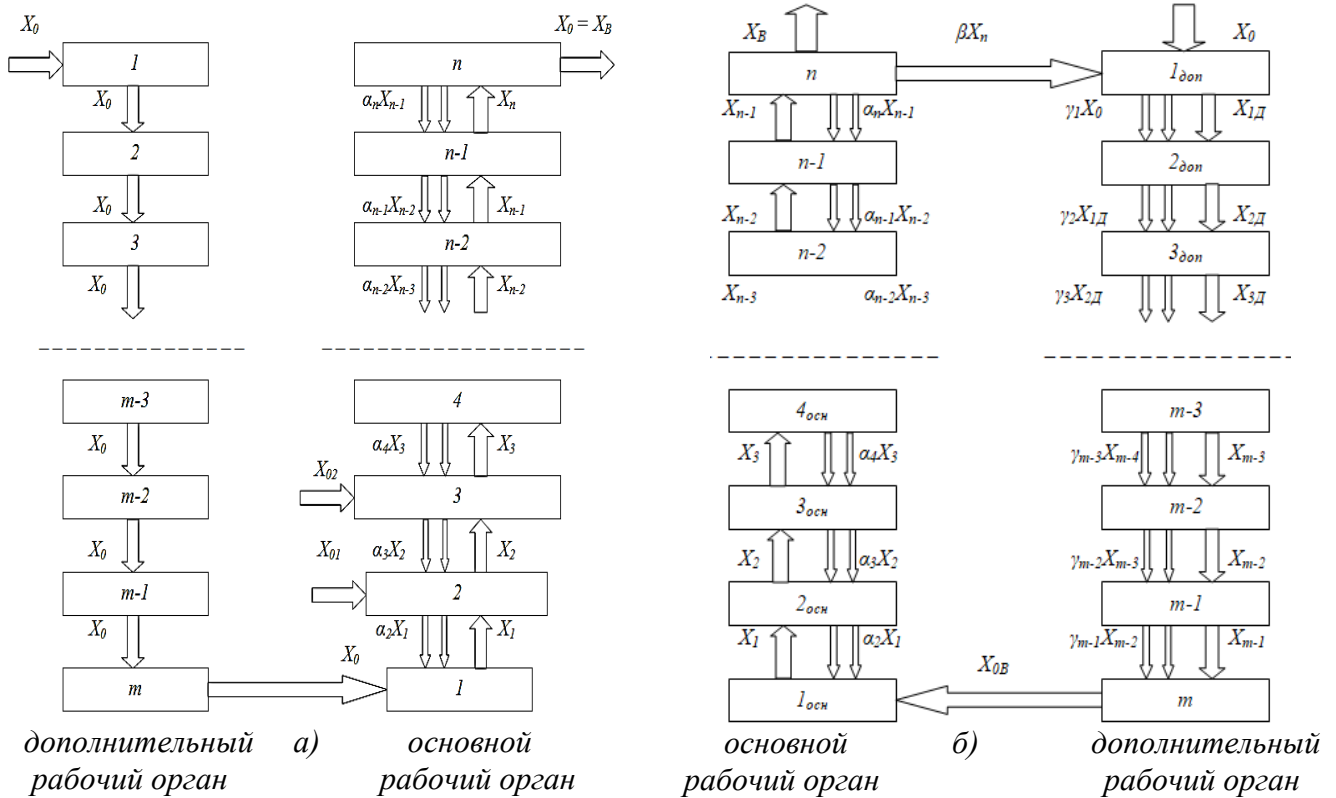


Рисунок 1 - Схемы движения материальных потоков

а) в вибрационном СНД с рецикл каналом; б) в базовом вибрационном СНД

Система уравнений материального баланса имеет вид (1): Корреляционные функции материальных потоков примут вид (2):

$$\left\{ \begin{array}{l} X_1 = \frac{1}{2}X_0 + \alpha_2 X_1 \\ X_2 = X_1 + \alpha_3 X_2 + \alpha_1 \frac{1}{2}X_0 - \alpha_2 X_1 \\ X_3 = X_2 + \frac{1}{2}X_0 + \alpha_4 X_3 - \alpha_3 X_2 - \alpha_1 \frac{1}{2}X_0 \quad (1) \\ X_4 = X_3 + \alpha_5 X_4 - \alpha_4 X_3 \\ X_5 = X_4 + \alpha_6 X_5 - \alpha_5 X_4 \\ X_6 = X_5 - \alpha_6 X_5 \\ X_B = X_5 - \alpha_6 X_5 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} Kx_1 = \frac{1}{2}Kx_0 + \alpha_2^2 Kx_1 \\ Kx_2 = Kx_1 + \alpha_3^2 Kx_2 + \alpha_1^2 \frac{1}{2}Kx_0 - \alpha_2^2 Kx_1 \\ Kx_3 = Kx_2 + \frac{1}{2}Kx_0 + \alpha_4^2 Kx_3 - \alpha_3^2 Kx_2 - \alpha_1^2 \frac{1}{2}Kx_0 \quad (2) \\ Kx_4 = Kx_3 + \alpha_5^2 Kx_4 - \alpha_4^2 Kx_3 \\ Kx_5 = Kx_4 + \alpha_6^2 Kx_5 - \alpha_5^2 Kx_4 \\ Kx_6 = Kx_5 - \alpha_6^2 Kx_5 \\ Kx_B = Kx_5 - \alpha_6^2 Kx_5 \end{array} \right.$$

Примем коэффициенты рециркуляции равными между собой, (т.е. $\alpha_2 = \dots = \alpha_n = \alpha$) и, учитывая, что $Kx_0(0) = \sigma_{x_0}^2$ и $Kx_{\text{вых}}(0) = \sigma_{x_{\text{вых}}}^2$, тогда решая систему уравнений (2) получим выражение, для определения сглаживающей способности $S(\alpha)$ рабочего органа:

$$S = \frac{\sigma_{x0}^2}{\sigma_{xB}^2} = \left[\frac{2(1+\alpha_n)(1+\alpha_{n-1})(1+\alpha_{n-2})(1+\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4})}{(1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1})(1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-3})(1-\alpha_{n-4}) + \alpha_{n-5}^2(1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1}) \cdot (1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4}) + (1-\alpha_n)(1-\alpha_{n-1})(1-\alpha_{n-2})(1-\alpha_{n-5})^2 \cdot (1+\alpha_{n-3})(1+\alpha_{n-4})} \right] \quad (3)$$

После проведенного математического моделирования мы заметили, что чем больше количество витков n , тем выше степень сглаживания S , но применение количества витков n больше 8 не целесообразно, так как это ведет к увеличению габаритных размеров аппарата. Поэтому рекомендуется использовать надлежащие параметры работы нового смесителя: $n=5$, либо $n=6$; $\alpha=0,7$. При приведенных параметрах параметр S варьируется от 309 до 1753 единиц, и этого достаточно для получения качественных мучных сыпучих смесей на различных предприятиях.

Аналогичным образом находим выражение для определения сглаживающей способности для схемы, представленной на рисунке 1 (б):

$$S = \frac{\sigma_{x0}^2}{\sigma_{xB}^2} = \left[\frac{((1-\alpha^2)^{n-1} - (\gamma^2 + (1-\gamma))^2(n-1) \cdot (1-\alpha)^{2(n-1)} \cdot \beta^2)}{(\gamma^2 + (1-\gamma))^2(n-1) \cdot (1-\alpha)^{2(n-1)} (1-\beta)^2} \right] \quad (4)$$

Так как в вибрационном СНД с рецикл каналом рассматривается только коэффициент рециркуляции α , то при решении уравнения (4) примем β и γ постоянными величинами равными 0,5. В результате проведенного математического моделирования нам удалось увидеть, что чем меньше количество витков и больше коэффициент рециркуляции α , тем выше степень сглаживания S . Наибольшее её значение составляет $S=20,42$ при $\alpha=0,8$ и $n=4$.

Исходя из полученных данных, видно, что для получения наиболее качественной мучной сыпучей смеси целесообразнее использовать разработанный вибросмеситель с рецикл каналом, так как он способен в 15 раз лучше сглаживать флуктуации питающих потоков.

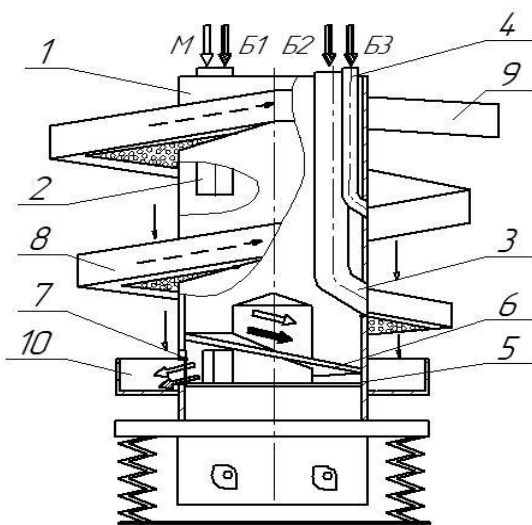


Рисунок 2 - Вибрационный СНД с рецикл каналом (Патент 2626415)

В третьей главе представлено описание лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований. Помимо разработанного вибрационного СНД, в его состав входят: дозировочное оборудование, ленточные конвейеры, электродвигатель и пульт управления. На рисунке 2 представлен разработанный вибрационный СНД с рецикл каналом, на который получен Патент РФ 2626415. В данном смесителе реализован метод «последовательного разбавления».

Принцип действия. Основной поток материала разделен на три части:

1-ая часть фонового компонента (Б1), подается на лоток 6, туда же направляется и ключевой компонент (М), используя патрубок 2; подача 2-й (Б2) и 3-й (Б3) частей осуществляется на второй и третий витки внешнего перфорированного лотка 8, используя патрубки 3 и 4, соответственно. Ключевым моментом является пропорциональное расширение лотка 8 в местах разбавления смеси (второй и третий витки лотка 8). Если не увеличить ширину лотка, то это приведет к росту высоты виброкипящего слоя. Рост ВКС уменьшит скорость транспортирования смеси и интенсивность его виброкипания. Благодаря рецикл каналу осуществляется возврат некоторой части компонентов на нижележащие витки основного рабочего органа смесителя. Окончание процесса смешивания наступает в момент вывода из аппарата готовой смеси через патрубок 9.

Проанализировав ситуацию на основных рынках российского и зарубежного сырья, для исследований нового вибрационного СНД были разработаны две мучные сыпучие смеси. Смесь №1 (100 кг) включает муку пшеничную I сорта (83,7 кг), кунжутную муку (4,2 кг), изолят сывороточного (4,2 кг) и соевого (4,2 кг) белка, белый сахар (1,6 кг), пищевую соль (1,3 кг), сухую клейковину (0,8 кг). Смесь №2 (100 кг) включает муку пшеничную I сорта (74,3 кг), муку чечевичную (9,3 кг) и муку из бурого риса (9,3 кг), сахар белый (1,9 кг), пищевую соль (1,4 кг), сухую клейковину (3,8 кг).

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований влияния амплитуды A и частоты колебаний f , угла вибрации β , а так же высоты виброкипящего слоя (ВКС) на процесс приготовления мучных сыпучих смесей. Рассмотрим результаты исследования по определению скорости вибротранспортирования смеси №1 по рабочей поверхности ВС в зависимости от применяемых технологических параметров его работы, которые представлены в виде таблиц 1-4.

Таблица 1 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от угла β и частоты колебаний f

Технологические параметры		v , м/с
β , °	f , Гц	
$A=4,5$ мм, ВКС=20 мм, без перфорации		
30	16,6	0,072
45		0,066
60		0,041
30	25	0,123
45		0,112
60		0,068
30	33,3	0,127
45		0,162
60		0,127

Таблица 2 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от амплитуды A и частоты f колебаний

Технологические параметры		v , м/с
A , мм	f , Гц	
$\beta=45^\circ$, ВКС=20 мм, без перфорации		
2,5	16,6	0,027
3,5		0,066
4,5		0,066
2,5	25	0,047
3,5		0,099
4,5		0,112
2,5	33,3	0,094
3,5		0,131
4,5		0,162

Таблица 3 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от высоты ВКС и частоты колебаний f

Технологические параметры		v , м/с
ВКС	f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, $A = 4,5$ мм, без перфорации		
20	16,6	0,027
30		0,022
40		0,018
20	25	0,047
30		0,030
40		0,021
20	33,3	0,094
30		0,041
40		0,031

Таблица 4 – Значения скорости вибротранспортирования v в зависимости от частоты колебаний f и диаметра перфорации \emptyset

Технологические параметры		v , м/с
\emptyset , мм	f , Гц	
$\beta = 45^\circ$, $A = 4,5$ мм, ВКС = 20 мм		
0	16,6	0,027
5		0,129
7		0,129
0	25	0,047
5		0,162
7		0,215
0	33,3	0,094
5		0,309
7		0,414

Для проведения данных исследований применялись ключевые технологические параметры: угол ($\beta = 30; 45$ и 60°), амплитуда ($A = 2,5; \dots; 4,5$ мм) и частота колебаний ($f = 16,66; \dots; 33,33$ Гц), высота ВКС (20; \dots ; 40 мм), перфорация ($\emptyset = 5; 7$ мм; без перфорации).

Из таблицы 1 можно заметить, что самые неблагоприятные условия для транспортирования мучной сыпучей смеси $v = 0,041$ м/с создаются при угле колебаний $\beta = 60^\circ$. При угле колебаний $\beta = 45^\circ$ направленное возвратно-поступательное движение компонентов смеси осуществляется гораздо интенсивнее, поэтому и наблюдается наибольшее значение скорости транспортирования исследуемой смеси $v = 0,162$ м/с.

Из таблицы 2 видно, что наименьшие показатели скорости $v = 0,027$ м/с фиксируются при $A = 2,5$ мм, а наибольшие $v = 0,162$ м/с при $A = 4,5$ мм. Следовательно, чем выше частота f и амплитуда A колебаний, тем больше скорость вибротранспортирования смеси v .

Из данных, представленных в таблице 3, ясно, что при высоте ВКС = 20 мм наблюдается наибольшая скорость перемещения смеси $v = 0,094$ м/с, а при ВКС = 40 мм – наименьшая $v = 0,018$ м/с. Можно прийти к заключению, что чем ниже ВКС смеси и выше частота колебаний f , тем хуже её истечение через перфорацию и соответственно, выше скорость её транспортирования.

Из таблицы 4 заметно, что наименьшие показатели скорости перемещения компонентов смеси $v = 0,027$ м/с наблюдаются при отсутствии перфорации рабочего органа, а максимальные $v = 0,414$ м/с при диаметре перфорации $\emptyset = 7$ мм. Соответственно, скорость транспортирования мучной сыпучей смеси тем выше, чем больше диаметр перфорации \emptyset .

Анализ результатов исследования показал, что во всех представленных случаях рост частоты (f) и амплитуды (A) колебаний вызывает увеличение скорости вибротранспортирования смеси (v) по рабочему органу аппарата.

Далее проводились исследования по определению пропускной способности отверстия рабочего органа ВС. Перфорация рабочего органа аппарата требуется для создания рециркулирующих потоков в аппарате через рецикл канал. Результаты данных исследований представлены в таблицах 5-8.

Таблица 5 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от диаметра перфорации \varnothing и частоты колебаний f

Технологические параметры		$m_{отв}$, кг/с
\varnothing , мм	f , Гц	
$\beta = 45^\circ, A = 4,5 \text{ мм}, ВКС = 20 \text{ мм}$		
7	16,6	0,0041
10		0,0048
7	25	0,0054
10		0,0056
7	33,3	0,0044
10		0,0048

Таблица 6 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от высоты ВКС и частоты колебаний f

Технологические параметры		$m_{отв}$, кг/с
ВКС	f , Гц	
$\beta = 45^\circ, A = 4,5 \text{ мм}, \varnothing = 7 \text{ мм}$		
20	16,6	0,0033
30		0,0036
40		0,0041
20	25	0,0041
30		0,0047
40		0,0054
20	33,3	0,0031
30		0,0041
40		0,0044

Таблица 7 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от амплитуды A и частоты колебаний f

Технологические параметры		$m_{отв}$, кг/с
A , мм	f , Гц	
$\beta = 45^\circ, ВКС = 20 \text{ мм}, \varnothing = 7 \text{ мм}$		
2,5	16,6	0,0028
3,5		0,0023
4,5		0,0033
2,5	25	0,0037
3,5		0,0031
4,5		0,0041
2,5	33,3	0,0032
3,5		0,0026
4,5		0,0031

Таблица 8 – Значения расхода мучной сыпучей смеси через отверстия $m_{отв}$ в зависимости от угла β и частоты колебаний f

Технологические параметры		$m_{отв}$, кг/с
$\beta, ^\circ$	f , Гц	
$A = 4,5 \text{ мм}, ВКС = 20 \text{ мм}, \varnothing = 7 \text{ мм}$		
30	16,6	0,0041
45		0,0020
60		0,0015
30	25	0,0054
45		0,0024
60		0,0018
30	33,3	0,0044
45		0,0022
60		0,0016

Как видно из таблицы 5, расход мучной сыпучей смеси через отверстие имеет наибольший показатель $m_{отв} = 0,0056$ кг/с при значении перфорации $\varnothing = 10$ мм. Из этого следует, что чем больше диаметр перфорации \varnothing рабочей поверхности ВС, тем выше будет показатель $m_{отв}$.

Из таблицы 6 очевидно, что больший расход через отверстие $m_{отв}=0,0054$ кг/с наблюдается при высоте ВКС=40 мм. Значит, расход через отверстие $m_{отв}$ тем больше, чем выше высота ВКС.

Из таблицы 7 можно увидеть, что расход через отверстие достигает максимального значения $m_{отв}=0,0041$ кг/с при $A=4,5$ мм. Получается, что значение расхода смеси через отверстие $m_{отв}$ тем существеннее, чем выше амплитуда A колебаний.

Как видим в таблице 8, наивысший показатель расхода смеси через отверстие $m_{отв}=0,0054$ кг/с наблюдается при $\beta =30^\circ$. Из этого вытекает, что чем ниже угол колебаний β , тем больше значение расхода через отверстие $m_{отв}$.

Анализ результатов исследования пропускной способности отверстия позволил сделать вывод: наблюдается уменьшение пропускной способности отверстий с увеличением амплитуды колебаний и высоты ВКС.

Далее отображены исследования по определению влияния параметров вибрации и массы смесителя на потребляемую мощность. Ключевыми технологическими параметрами являлись: амплитуда ($A=2,5; \dots; 4,5$ мм), частота колебаний ($f=16,66; \dots; 33,33$ Гц).

Результаты исследования зависимости потребляемой мощности от амплитуды A и частоты f колебаний ВС массами 16,5 кг и 25,5 кг представлены в таблицах 9-10, соответственно.

Таблица 9 – Значения потребляемой мощности N в зависимости от амплитуды A и частоты f колебаний (масса ВС – 16,5 кг)

Технологические параметры		N, кВт
A, мм	f, Гц	
$\beta =45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм		
2,5	16,6	0,1431
3,5		0,1431
4,5		0,1431
2,5	25	0,2750
3,5		0,2770
4,5		0,2790
2,5	33,3	0,4000
3,5		0,5000
4,5		0,5540

Таблица 10 – Значения потребляемой мощности N в зависимости от амплитуды A и частоты f колебаний (масса ВС – 25,5 кг)

Технологические параметры		N, кВт
A, мм	f, Гц	
$\beta =45^\circ$, ВКС=20 мм, $\varnothing=7$ мм		
2,5	16,6	0,1564
3,5		0,1564
4,5		0,1564
2,5	25	0,1869
3,5		0,2000
4,5		0,2679
2,5	33,3	0,3856
3,5		0,4058
4,5		0,5490

Из таблиц 9-10 видно, что максимальные значения потребляемой мощности $N=0,5540$ кВт и $N=0,5490$ кВт достигаются при следующих амплитуде $A=4,5$ мм и частоте $f=33,3$ Гц колебаний, а минимальные - при $A=2,5$ мм и $f=16,6$ Гц. При сопоставлении показателей потребляемой мощности для обеих конструкций можно заметить, что у ВС массой 16,5 кг её значения выше.

Получается, что показатель потребляемой мощности тем выше, чем выше амплитуда A и частота f колебаний.

Далее были проведены два полнофакторных эксперимента для определения рациональных технологических параметров работы базового и разработанного вибрационного СНД с рецикл каналом при изготовлении мучных сыпучих смесей.

В результате первого полнофакторного эксперимента были определены рациональные технологические параметры работы базового вибрационного СНД, при которых достигается наилучшее качество получаемой смеси $\nu=8,06\%$: угол $\beta=45^\circ$, амплитуда $A=4,5$ мм и частота колебаний $f=33,33$ Гц.

На вибрационном СНД с рецикл каналом, в ходе второго полнофакторного эксперимента, изменяли параметры: соотношение компонентов (долю ключевого компонента - пищевой соли) (диапазон - 1:24 (доля ключевого компонента - пищевой соли 0,04); 1:7,5 (0,12) и 1:5 (0,2)), амплитуду (диапазон - $A = 2,5; 3,5; 4,5$ мм) и частоту колебаний (диапазон - $f = 16,67; 25; 33,33$ Гц).

Обработка экспериментальных данных осуществлялась в программе «*Statistica*». Представим результаты проведенного полнофакторного эксперимента получения мучной сыпучей смеси №1.

Графические зависимости коэффициента неоднородности V_c от основных технологических параметров для смеси №1, полученной в новом СНД представлены на рисунках 3 – 5.

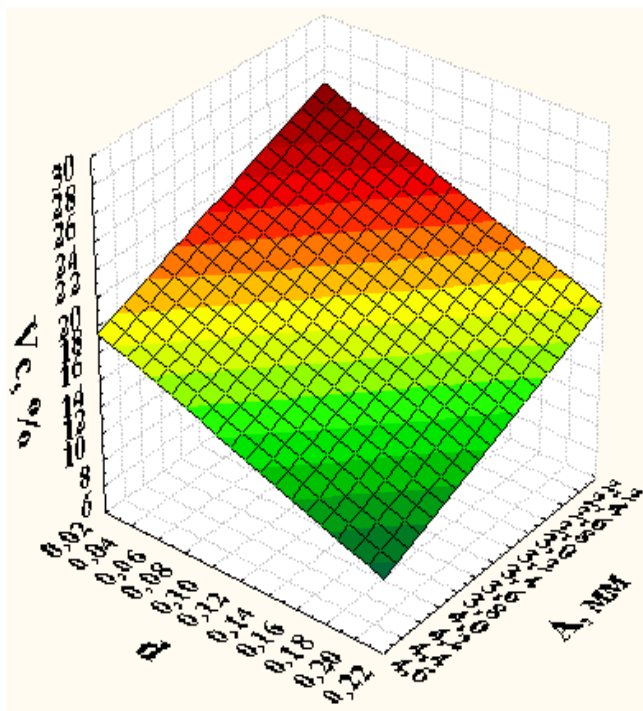


Рисунок 3 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от доли ключевого компонента (d) и амплитуды колебаний (A)

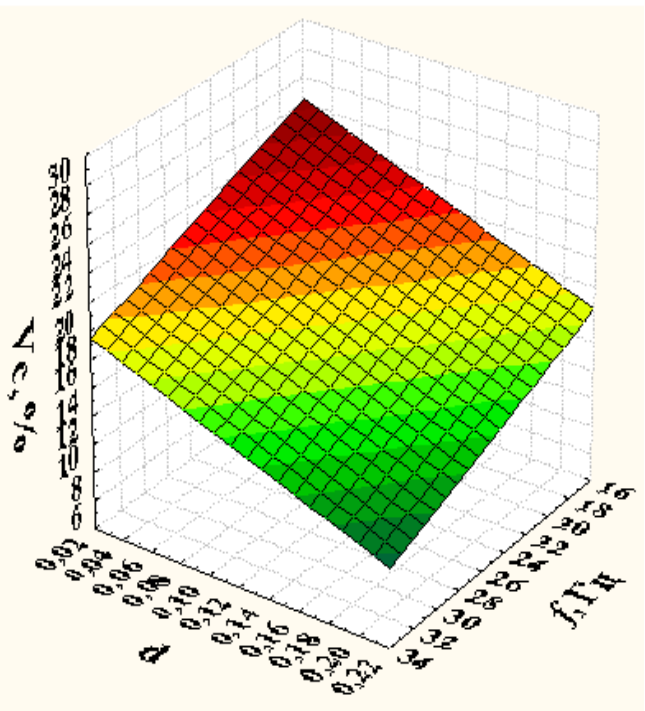


Рисунок 4 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от доли ключевого компонента (d) и частоты колебаний (f)

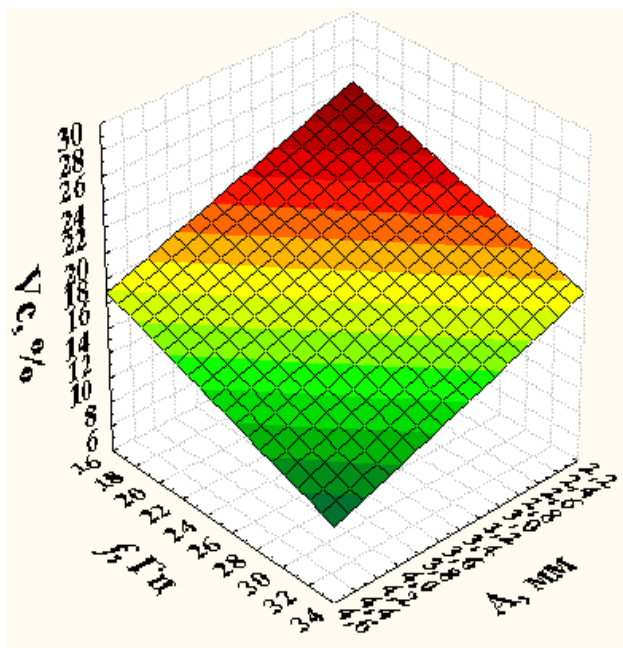


Рисунок 5 – Графическая зависимость коэффициента неоднородности (V_c) от амплитуды (A) и частоты колебаний (f)

Рисунки 3, 4 и 5 показывают, что лучшее качество смеси $V_c=7,8; \dots; 9,5\%$ достигается при доле ключевого компонента $d=0,18$, амплитуде $A=4,4$ мм и частоте колебаний $f=34$ Гц.

Уравнения регрессии для зависимостей, представленных на рисунках 3, 4 и 5, имеют вид (5), (6) и (7), соответственно:

$$V_c = 29,062 - 39,632 \cdot d - 3,13 \cdot A \quad (5)$$

$$V_c = 29,217 - 39,632 \cdot d - 0,386 \cdot f \quad (6)$$

$$V_c = 36,344 - 3,13 \cdot A - 0,386 \cdot f \quad (7)$$

Как следует из уравнений (5), (6) большее влияние на коэффициент неоднородности V_c оказывает доля ключевого компонента, а меньшее - амплитуда A и частота колебаний f .

Из уравнения (7) видно, что в большей степени влияет на коэффициент неоднородности V_c амплитуда колебаний A , а в наименьшей - частота f .

В завершении изучалось влияние всех технологических параметров работы нового вибрационного СНД на качество мучных сыпучих смесей. Уравнение регрессии, описывающее данное влияние, имеет вид (8):

$$V_c = 41,099 - 39,632d - 3,13A - 0,386f \quad (8)$$

Из уравнения (8) ясно, что самое значительное влияние на коэффициент неоднородности V_c при получении мучных сыпучих смесей оказывает доля ключевого компонента d , затем по значимости идет амплитуда A , а после чего частота колебаний f . Следует заметить, что отрицательные значения всех технологических параметров подтверждают тот факт, что с их увеличением будет понижаться коэффициент неоднородности, а, следовательно, повышаться качество получаемой смеси.

Далее сравнили наблюдаемые значения (полученные в ходе эксперимента) коэффициента неоднородности V_c с предсказанными (полученные с помощью уравнения регрессии). Адекватность предсказанных значений коэффициента неоднородности оценили с помощью относительной погрешности (Δ), среднее значение которой составило 9,7%. Следовательно, данную регрессионную модель можно применять для прогнозирования качества получаемых смесей.

В результате проведенного полнофакторного эксперимента установлено, что для получения наиболее качественных мучных сыпучих смесей при доле ключевого компонента $d=0,2$ необходимо настроить следующие технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом: амплитуда $A=4,5$ мм и частота колебания $f=33,33$ Гц.

В пятой главе приведено описание опытно-промышленных испытаний вибросмесителя с рецикл каналом (патент РФ 2626415) на технологической линии процесса непрерывного смешивания разработанных мучных смесей на базе ООО «Кузбассхлеб», которые признаны успешными. Кроме того, в данной главе представлены результаты проведенного аминокислотного анализа, который показал, что массовая доля белка составила 10,16%, что свидетельствует о повышении на 33% биологической ценности хлеба, изготовленного из мучной сыпучей смеси №1 (454,6 мг/1 г белка), в сравнении с контрольным образцом (341,5 мг/1 г белка), изготовленным по ГОСТ 28808-90.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведен литературно-патентный обзор, в результате которого выявлено, что для получения мучных сыпучих смесей заданного качества целесообразно использовать лотковые вертикальные подъемные СНД вибрационного типа.

2. На основе корреляционного анализа разработана математическая модель процесса непрерывного смешивания в вибрационном СНД с рецикл каналом, способным сглаживать флуктуации входящих материальных потоков (S варьируется в пределах $309 \div 1753$ единиц). Для получения в вибрационном СНД наиболее качественной мучной сыпучей смеси рекомендуется использовать схему с двухступенчатым разбавлением материального потока, с количеством витков $n=5$ или $n=6$ и коэффициентом рециркуляции $\alpha=0,7$.

3. Разработана конструкция вибрационного СНД с рецикл каналом (патент РФ 2626415), реализующая метод «последовательного разбавления», которая позволяет получать мучные сыпучие смеси заданного качества.

4. Определены рациональные технологические параметры работы вибрационного СНД с рецикл каналом для получения мучных сыпучих смесей высокого качества при соотношении компонентов 1:7,5, высоте виброкипящего слоя 20 мм и диаметре перфорации рабочего органа 7 мм: угол вибрации 45° с амплитудой колебания дебалансов 4,5 мм на рабочей частоте колебания дебалансов 33,33 Гц. В результате регрессионного анализа определено, что на коэффициент неоднородности V_c при получении мучных сыпучих смесей наибольшее влияние оказывает соотношение компонентов d , а наименьшее - частота (в диапазоне $f=25; \dots; 33,3$ Гц) и амплитуда колебаний (в диапазоне $A=4; \dots; 4,5$ мм).

5. Проведены успешные опытно-промышленные испытания вибрационного СНД с рецикл каналом на базе ООО «Кузбассхлеб» из которых следует, что смеситель обеспечивает получение мучных сыпучих смесей высокого качества ($V_c=5, \dots, 10\%$). Проведенный аминокислотный анализ показал, что биологическая ценность хлеба из мучной сыпучей смеси, полученной в разработанном вибрационном СНД, в сравнении с образцом контрольного хлеба из смеси, полученной классическим способом, возросла на 33%.

По материалам диссертации опубликованы следующие работы:

Статьи в изданиях, входящих в наукометрические базы Scopus

1. Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя для получения мучных сыпучих смесей / Д.М. Бородулин, Д.В. Сухоруков, **Т.В. Зорина** [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2021. - № 1 (51). – С. 109-122.

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ

2. Определение сглаживающей способности вибрационного смесителя на основе корреляционного анализа / Д.М. Бородулин, А.Б. Шушпанников, **Т.В. Зорина** [и др.] // Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. –2018. – Т. 80. - № 4. – С. 30-34.

3. Определение ключевых параметров работы вибрационного смесителя при получении мучных хлебопекарных смесей / Д.М. Бородулин, **Т.В. Зорина**, В.Н. Иванец [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. - № 1 (49). – С. 77-84.

4. Определение рациональных параметров работы вибрационного смесителя при получении сухих комбинированных продуктов / Д. М. Бородулин, **Т.В. Зорина**, С.С. Комаров, Г.Ф. Сахабутдинова // Хранение и переработка сельхозсырья. – 2019. – № 2. – С. 119-129.

5. Разработка смесительного агрегата для получения мучных хлебопекарных смесей с повышенным содержанием белка / Д.М. Бородулин, **Т.В. Зорина**, Е.В. Невская [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2019. - № 4 (49). – С. 579-586.

Патенты РФ

6. Пат. 2626415 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00. Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., **Зорина Т.В.**, Шушпанников Е.А., Шушпанникова А.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемТИПП. - №2016149970; заявл.19.12.2016; опубл. 27.07.2017, Бюл. 21.

7. Пат. 2648885 Российская Федерация, МПК⁷ В01F 11/00, Вибрационный смеситель / Шушпанников А.Б., Крохалёв А.А., **Зорина Т.В.**, Шушпанников Е.А., Шушпанникова А.С.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО КемГУ. - №2017122437; заявл. 26.06.2017; опубл. 28.03.2018, Бюл. 10.

Материалы конференций, симпозиумов

8. Шушпанников, А.Б. Устройство для анализа проб при определении концентрации ключевого компонента в сыпучей смеси / А.Б. Шушпанников, А.А. Крохалев, Е.А. Шушпанников, **Т.В. Казначеева** // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции 29 апреля 2014 г. – Кемерово. - 2014. – Т.1. – С. 331-332.

9. Шушпанников, А.Б. Исследование дозатора дискретно-циклического действия / А.Б. Шушпанников, Е.А. Шушпанников, **Т.В. Казначеева** // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы Международной научной конференции 29 апреля 2014 г. – Кемерово. - 2014. – Т.1. – С. 333-334.

10. Злобин С.В. Определение ширины лотка вибрационного смесителя / С.В. Злобин, **Т.В. Казначеева** // Пищевые инновации и биотехнологии:

материалы IV Международной научной конференции 27 апреля 2016 г. – Кемерово. - 2016. – С. 165-166.

11. **Казначеева, Т.В.** Виброперемещение муки по винтовому лотку / Т.В. Казначеева // Явления переноса в процессах и аппаратах химических и пищевых производств: материалы Международной научно-практической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения М.Х. Кишиневского 16-17 ноября 2016 г. – Воронеж. - 2016. – С. 54-57.

12. **Зорина, Т.В.** Анализ конструкций каскадных вибрационных смесителей / Т.В. Зорина, Е.А. Шушпанников, А.С. Шушпанникова // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции 25 апреля 2017 г. – Кемерово. - 2017. – С. 158-160.

13. Шушпанников, Е.А. Анализ конструкций прямоточных винтовых вибрационных смесителей / Е.А. Шушпанников, **Т.В. Зорина**, А.С. Шушпанникова // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции 25 апреля 2017. – Кемерово. - 2017. – С. 207-209.

14. Шушпанникова, А.С. Разработка вибрационного смесителя / А.С. Шушпанникова, Е.А. Шушпанников, **Т.В. Зорина** // Пищевые инновации и биотехнологии: материалы V Международной научной конференции 25 апреля 2017. – Кемерово. - 2017. – С. 210-211.

15. **Зорина, Т.В.** Моделирование процесса последовательного разбавления при смешивании сыпучих материалов / Т.В. Зорина, Е.А. Шушпанников // Пищевые инновации в биотехнологии: сборник тезисов VI Международной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых 14-16 мая 2018 г. – Кемерово. - 2018. – Т.1. – С. 140-142.

16. Бородулин, Д.М. Разработка вибрационного смесителя для получения обогащенных мучных смесей / Д.М. Бородулин, **Т.В. Зорина** // Холодильная техника и биотехнологии: сборник тезисов I Национальная конференция. – Кемерово. - 2019. – С. 22-25.

17. Бородулин, Д.М. Определение пропускной способности отверстия на вибрационном смесителе, реализующем метод «последовательного разбавления» / Д.М. Бородулин, **Т.В. Зорина** // Инновации в пищевой биотехнологии: сборник тезисов II Международного симпозиума 13-14 мая 2019 г. – Кемерово. - 2019. – Т.2. - С. 88-90.