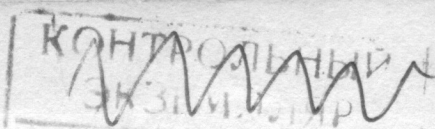


Автореф

Р 49



МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Аспирант РОТКО Юрий Михайлович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВИБРАЦИОННЫХ ПИТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ЭЛЕВАТОРНЫХ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Специальность № 05.02.14 - Машины и агрегаты
пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ ПИЩЕВОЙ
ПРОМЫШЛЕННОСТИ имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи
Аспирант РОТКО Юрий Михайлович

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ВИБРАЦИОННЫХ ПИТАЮЩИХ УСТРОЙСТВ
ЭЛЕВАТОРНЫХ ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНЫХ СЕПАРАТОРОВ

Специальность № 05.02.14 - Машины и агрегаты
пищевой промышленности

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
КАНДИДАТА ТЕХНИЧЕСКИХ НАУК

v012285

Одесский технологический
институт пищевой промыш-
ленности им. М. В. Ломоносова
БИБЛИОТЕКА

ОНАХТ

29.05.12

Технологическое иссл

Одесса - 1974



v012285

Работа выполнена на кафедре "Технологическое оборудование перерабатывающих предприятий" Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

Научные руководители:

кандидат технических наук, профессор Л.И.Котляр,
кандидат технических наук, доцент А.А.Вайнберг.

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор В.В.Цединовский,
кандидат технических наук, доцент Н.В.Остапчук.

Безопасная организация - отделение Всесоюзного научно-исследовательского и экспериментально-конструкторского института продовольственного машиностроения в г. Горьком.

Автореферат разослан "19" II 1974 г.

Защита диссертация состоится "22" марта 1974 г.
на заседании Ученого Совета механического и инженерно-экономического факультетов Одесского технологического института пищевой промышленности имени М.В.Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу: ГСП, г.Одесса, ул.Свердлова 112, ОТИПИ им. М.В.Ломоносова, ученому секретарю Совета института.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ СОВЕТА ИНСТИТУТА
кандидат технических наук

Л.А.ЗАПОРОЖЕЦ

С П И С О К условных обозначений

- \hat{y} - теоретическое значение функции отклика, предсказанное уравнением регрессии;
- y_u - экспериментальное значение функции отклика в u -ом опыте;
- b_0 - выборочный "нулевой" (свободный) член уравнения регрессии, численно равный величине функции отклика при условии, что все факторы находятся на средних, "нулевых" уровнях;
- b_i - выборочный линейный коэффициент регрессии, показывающий зависимость функции отклика от i -го фактора;
- b_{ij} - выборочный коэффициент двухфакторного взаимодействия, показывающий, насколько изменяется степень влияния на функцию отклика i -го фактора при изменении величины j -го фактора;
- b_{ii} - выборочный квадратичный коэффициент регрессии, показывающий степень нелинейности влияния на функцию отклика i -го фактора;
- i, j - индексы факторов ($i, j = 1, 2, 3, \dots, k$);
- u - индекс опыта ($u = 1, 2, 3, \dots, N$);
- X_i - величина i -го фактора в кодированных единицах;
- $s^2\{b_0\}; s^2\{b_i\}; s^2\{b_{ij}\}; s^2\{b_{ii}\}$ - выборочные дисперсии, характеризующие ошибки в определении коэффициентов регрессии;
- $s^2\{y\}$ - выборочная дисперсия, характеризующая ошибку эксперимента;
- d - внедиагональные элементы ковариационной матрицы квази- D - оптимального плана;
- A - амплитуда колебаний лотка вибрационного питателя, мм;
- f - частота колебаний вибрлотка, Гц.

Директивы XXIV съезда КПСС по пятилетнему плану развития народного хозяйства СССР на 1971-1975 годы предусматривают достижение среднегодовой валовой сбор зерна по стране в количестве не менее 195 млн. тонн. В связи с этим значительное развитие получит и элеваторная промышленность, призванная существенно повышать продовольственную ценность закупаемого государством зерна. В решении такой народнохозяйственно важной задачи актуальным является повышение технического уровня и эффективности применяемых на элеваторах зерноочистительных машин на основе их технически и экономически целесообразного совершенствования.

Низкая относительная эффективность аэромеханического сепарирования зерновых смесей в зерноочистительных сепараторах: выделение засорителей, как правило, менее 70% и нередко составляет 35-40%. В связи с этим предусматривают двух-, а иногда и трехкратную очистку зерна. Это не только усложняет и удорожает процесс обработки зерновых смесей, но и приводит к травмированию и прямым потерям зерна. Поэтому технически и экономически важно изыскать пути повышения технологической эффективности процесса сепарирования зерновых смесей.

Технологически важным элементом серийно выпускаемого зерноочистительного сепаратора является зерноочистительный комплекс, эффективность работы которого предопределяет качество работы сопряженного с ним питающего устройства. Изыскание конструктивно и технологически рационального решения питающего устройства проведено путем опытно-конструкторских и экспериментальных исследований в целях оптимизации функциональной системы "питатель-

пневмосепарирующее устройство".

Диссертационная работа состоит из шести глав.

В первой главе обсуждены эксплуатационно-технические факторы, в различной мере влияющие на эффективность процесса аэромеханического сепарирования зерна. Проведенная по научно и технически важным признакам классификация питателей как подготовительных-распределительных и дозирующе-загрузочных устройств позволила сформулировать основные требования к ним.

Базируясь на методическом и планово-статистическом аспектах системного подхода к постановке многофакторного эксперимента, во второй главе определены основные подсистемы и этапы их рассмотрения или исследования в связи с управлением процессом аэромеханического сепарирования зерновых смесей; сформулированы и обоснованы технологические требования, которым должны удовлетворять функционирующие подсистемы и система в целом; произведен выбор однозначных показателей для оценки эффективности аэромеханического сепарирования зерновых смесей и оптимизирующей интерпретации полученной в опытах информации.

Для анализа и оптимизации функций отклика, характеризующих качество сложного процесса, обоснована целесообразность его формализации на основе статистического моделирования. В главе приведены выражения, полученные для вычисления параметров статистических моделей и оценки ошибок их определения. В целях более полного факторного анализа на основе построения двумерных поверхностей отклика уточнен порядок выбора коэффициентов оптимизационной модели - уравнения регрессии второго порядка в его канонической форме.

Для выбора технологически рационального кинематического режи-

на рабочего органа питателя (с позиций обеспечения необходимой интенсивности и равномерности загрузки пневмосенарирующего канала) важна обоснованная оценка сопротивления сдвигу отдельных слоев зерновой смеси при различных динамических воздействиях на нее.

В главах третьей и четвертой изложены результаты реализации плана многофакторного эксперимента, направленного на изучение сопротивления сдвигу слоев зернового материала и величины его объемной массы в зависимости от некоторых физико-технологических факторов и конструктивных особенностей средств питания.

В пятой главе изложены результаты производственно-технологических исследований двух модификаций вибрационного питателя с различными амплитудно-частотными характеристиками.

В шестой главе проведен оптимизационный анализ статистической модели процесса аэромеханического сепарирования зерновых смесей, охватывающей эффективность аэромеханического сепарирования с кинематическими параметрами питателя.

Обзор исследований убеждает в том, что сложный процесс аэромеханического сепарирования зерновой смеси является многофакторным и многовариантным и его эффективность предопределяют:

1) физико-технологические признаки и свойства многослойного потока подаваемого зернового материала; 2) конструктивно-функциональное решение питающих и пневмосенарирующих устройств зерноочистительных машин; 3) режимы взаимодействующих восходящего воздушного и нисходящего зернового потоков.

Научно-экспериментальные исследования В.С.Пальцева, А.В.Панченко и Г.Ф.Костыка, А.Т.Малыса и А.Р.Демидова, К.В.Дроздалина, А.М.Дзандзю и В.А.Кызева, И.Н.Платонова, А.А. Вайнберга и

А.И.Папченко свидетельствуют о том, что указанные факторы оказывают влияние на эффективность процесса аэромеханического сепарирования не только в отдельности, но и во взаимосвязанном сочетании. Поэтому плодотворное изучение этого процесса, в целях установления наиболее значимых входных факторов, следует базировать на использовании методов статистического планирования и обработки многофакторных экспериментов.

В работах В.М.Цецинского, А.Г.Громова, В.С.Пальцева, А.Р.Демидова, Н.Г.Реверы, Е.С.Перцовского подчеркивалось влияние технологически целесообразного действия питателя на качество процесса аэромеханического сепарирования зерна; но указанные авторы количественно не обобщили зависимость эффективности сепарирования от параметров питающего устройства.

В программе предпринятых исследований было предусмотрено рассмотреть конструктивно-функциональные схемы применяемых питателей, выбрать наиболее рациональное конструктивное решение питателя для последующей постановки факторных экспериментов и определения условий, при которых возможно осуществить экспериментальную и аналитическую оптимизацию нелинейной модели процесса аэромеханического сепарирования зерновых смесей с различными физико-технологическими свойствами.

Базируясь на работах К.В.Алферова и Р.М.Бенкова, А.Г.Соколова, И.Ф.Гончаревича, Л.И.Котляра, А.И.Романова, Э.Р.Горбиса, К.Г.Петрова, разработано, исходя из функционального назначения, классификация питающих устройств для сыпучих материалов. По этому признаку все питатели разделены на три группы: дозаторы, разделители и дозаторы-распределители.

Питающие устройства зерноочистительных сепараторов с пневмо-

сепарирующими каналами прямоугольного сечения должны выполнять не только распределительно-дозировочные, но и подготовительно-загрузочные функции. Судя по классификации питателей, такие комбинированные функции (с технологически допустимыми погрешностями) могут выполнить лишь вибрационные питатели с наклонным опорным лотком, совершающим продольные либо поперечные приблизительно прямолинейные гармонические колебания. При вибрационных воздействиях на опорный лоток силовые импульсы, передаваемые им зерновому материалу, определяют скорость перемещения смеси, интенсивность ее разрыхления и самсортирования.

Исследованиями Е.С.Перцовского, А.Я.Малиса и А.Р.Демадова, Е.В.Тамарова, А.Б.Демского и Ю.А.Лесика, В.В.Гортинского, А.С.Матвеева, С.С.Шклярова установлено, что питающие устройства могут оказывать влияние на эффективность процесса аэромеханического сепарирования зерновых материалов путем предварительного самсортирования сепарируемого материала, повышения равномерности распределения его по ширине приемного фронта пневмосепарирующего канала, сообщения выходящему из питателя зерновому потоку оптимальной скорости и пространственно рациональной ориентации.

При построении стратегии эффективного исследования пневмосепарирующего устройства вначале были изучены подсистемы вне их связи с образуемой системой, затем исследована система аэромеханического сепарирования в единстве ее внешних связей и внутренней структуры.

Для формализации процесса изучения пневмосепарирующего комплекса, как объекта системотехники, в работе реализованы следующие этапы исследования:

И. При постановке исследования

1. Формулирование и анализ технической задачи.
2. Выделение системы и изучение ее свойств.
3. Фиксирование выходных связей и выбор показателей качества (эффективности) функционирования системы.
4. Выделение существенных внешних (входных) и внутренних связей.
5. Формулирование цели и задач исследования, выбор значений наложенных ограничений.
6. Изучение подсистем на различных уровнях.
7. Выбор способа моделирования и оптимизации.
8. Выбор математической модели.

П. При проведении исследования

9. Сбор экспериментальной информации и ее математико-статистический анализ.
10. Построение многомерной статистической модели.
11. Проверка адекватности модели функционирования реальной системы.
12. Выделение существенных факторов в экспериментальной области и корректирование предварительно принятой структуры системы.
13. Анализ модели для ее физико-технологической интерпретации.

И. При решении оптимизационной задачи

14. Оптимизация системы.

15. Проверка оптимальности и технической рациональности полученного решения на основе логического и количественного анализа.

Пневмосепарирующее устройство можно рассматривать как систему, состоящую из сопряженных подсистем, представленных на рис. 1.

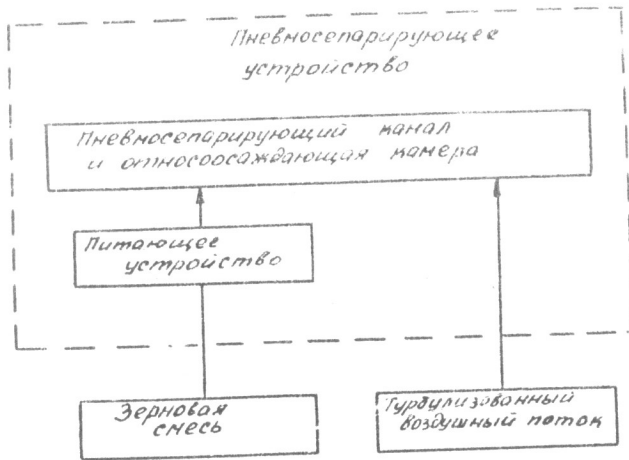


Рис. 1. Представление пневмосепарирующего устройства как системы.

Подсистемы "воздушный поток" и "пневмосепарирующий канал с относосаждяющей камерой" достаточно полно исследованы А.Я. Маллсом и А.Р. Демидовым, П.Н. Платоновым, А.А. Вайнбергом и А.И. Липченко. Поэтому в работе подвергнуты локальному и комплексному изучению подсистемы "зерновая смесь" и "питающее устройство", используя в этих целях методы статистического

планирования факторных экспериментов и анализа поверхностей отклика.

Сложность и значительная стохастичность процессов в пневмосепарирующем устройстве, неопределенность в связи с этим результатов аналитических исследований не позволили установить вид функций, адекватно описывающих изучаемый объект. Поэтому, базируясь на экспериментальных данных, статистическое моделирование проведено с помощью алгебраических полиномов, построение которых возможно в окрестностях любой точки факторного пространства. Просчет получаемых при этом уравнений регрессии реализует предсказательную способность моделей.

Математический анализ качества собранной информации состоял в исключении аномальных результатов экспериментов по правилам ГОСТ II.002-73 и в проверке равнозначности достоверных результатов по G -критерию Кохрана.

В работе использованы линейные ротатабельные, а также квази- D -оптимальные планы. Последние, обладая большими преимуществами перед остальными типами планов, не получили достаточно широкого применения из-за технических трудностей вычисления параметров получаемых статистических моделей. В связи с этим во второй главе приведены предложенные выражения, посредством которых, используя клавишную машинку либо ручной счет, могут быть определены параметры моделей и ошибки в их вычислениях:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N y_u x_{iu}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2}; \quad b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N y_u x_{iu} x_{ju}}{\sum_{u=1}^N x_{iu}^2 x_{ju}^2};$$

$$b_0 = \frac{1}{[(N\mu_1 - \mu_1^2) \cdot (k-1) / (N\mu_2 - \mu_2^2)] (\mu_1 - \mu_2)} \left\{ [(N\mu_1 - \mu_1^2) \cdot (k-2) / (N\mu_2 - \mu_2^2)] \sum_{u=1}^N y_u x_{iu}^2 - [N\mu_2 - \mu_2^2] \left(\sum_{u=1}^N y_u x_{iu}^2 - \sum_{u=1}^N y_u x_{iu} \right) - \mu_2 (\mu_1 - \mu_2) \sum_{u=1}^N y_u \right\};$$

$$b_0 = \frac{1}{k} \left(\sum_{u=1}^N y_u - \mu_2 \sum_{u=1}^N b_i \right);$$

$$s^2(b_i) = \frac{1}{N\lambda_i} s^2(y); \quad s^2(b_{ij}) = \frac{1}{N\lambda_{ij}} s^2(y);$$

$$s^2\{\beta_{0j}\} = \frac{1 - (k-1)(\lambda_2 - \lambda_1^2)d}{N(\lambda_2 - \lambda_1^2)} s^2\{y\}; \quad s^2\{\beta_{0j}\} = \frac{(k-1)\lambda_2 + \lambda_1}{N[\lambda_2 + (k-1)\lambda_1 - k\lambda_1^2]} s^2\{y\}.$$

В этих выражениях

$$\mu_1 = \sum_{i=1}^N X_{iu}^2; \quad \mu_2 = \sum_{i=1}^N X_{iu}^2 X_{ju}^2; \quad \mu_3 = \sum_{i=1}^N X_{iu}^4;$$

$$\lambda_1 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{iu}^2}{N}; \quad \lambda_2 = \frac{\sum_{i=1}^N X_{iu}^2 X_{ju}^2}{N}; \quad d = \frac{\lambda_2 - \lambda_1}{(\lambda_2 - \lambda_1)[\lambda_2 + (k-1)\lambda_1 - k\lambda_1^2]}.$$

Обсуждение экспериментальных данных Н.Г.Ревека, А.Н.Тимофеева, А.М.Папченко, П.Н.Платонова и А.А.Вайнберга, Горьковского отделения ВНИИПродмаш и Горьковской машиноспытательной станции Министерства заготовок СССР показало, что для распределения зерновых смесей питателями зерноочистительных машин характерно то, что в средней части потока устойчиво наблюдается повышенный объемный расход подаваемого материала. Это может быть объяснено возникновением таких внутренних сил сопротивления в материале, которые препятствуют свободному и равномерному "растеканию" его по поверхности рабочего органа.

В связи с этим в работе была изучена зависимость сопротивления сдвигу слоев зернового материала от ряда генетико-морфологических и технологических характеристик зерновых смесей, а также от кинематических параметров рабочих органов машин.

С помощью синхронного микродвигателя по поверхности зерновой смеси, уложенной в лоток, перемещали с постоянной скоростью площадку; на нижнюю поверхность которой были в один слой наклеены случайно ориентированные зерновки пшеницы. Сопротивление зерновой массы перемещению площадки фиксировали с помощью тензорезисторов, наклеенных на упругую стальную пластинку, заземленную в площадке. Сигнал тензорезисторов - функцию отклика y - усиливали тензоусилителем ТУ-4М и фиксировали по шкале микроампермет-

ра М-105. При этом не учитывались возможные эффекты от вертикального свободных зерновок, вариативность фрикционных связей зерновок с опорной поверхностью.

В качестве внутренних и внешних входных факторов были выбраны: крупность частиц зерновой смеси - X_1 ; засоренность и относительная влажность материала - соответственно X_2 и X_3 ; вес площадки и скорость ее относительного перемещения (сдвига) - соответственно X_4 и X_5 ; угол наклона плоскости сдвига к горизонту - X_6 . Изученный диапазон значений фактора X_1 обусловлен генетическими особенностями использованного в исследованиях зернового материала; экспериментальная область, образованная остальными факторами, ограничена реальными производственными ситуациями, характерными для элеваторов зерноперерабатывающих предприятий.

Использование F -критерия показало, что отклонение экспериментальных значений от линии регрессии первого порядка значительно больше экспериментальной ошибки, а следовательно, линейная статистическая модель неадекватна, поэтому был реализован центральный ротационный комбинаторный факторный план второго порядка. Из-за генетических особенностей материала не представилась возможность включить пять строго фиксированных уровней фактора крупности зерновок; поэтому в ротационный план этот фактор не был включен.

Реализация указанного плана и статистическая обработка полученных результатов позволили получить уравнение регрессии второго порядка для описания процесса сдвига зернового материала:

$$\hat{y} = 23820 + 0,1067x_1 - 0,0390x_2 + 0,2896x_3 + 0,0407x_4 - 0,7335x_5 - 0,0433x_1^2 - 0,0008x_2^2 - 0,0104x_3^2 + 0,0212x_4^2 - 0,0085x_5^2 + 0,0753x_1x_2 - 0,0003x_1x_3 + 0,0003x_1x_4 + 0,0164x_1x_5 - 0,0576x_2x_3 +$$

$$+0,0040 x_4 x_5 - 0,0691 x_4 x_6 - 0,0096 x_5 x_6$$

Ошибки в определении коэффициентов регрессии равны:

$$s\{b_0\} = 17,90 \cdot 10^{-3}; \quad s\{b_1\} = 8,95 \cdot 10^{-3}; \quad s\{b_{11}\} = 8,20 \cdot 10^{-3}; \quad s\{b_{12}\} = 11,00 \cdot 10^{-3}$$

Учитывая, что $F^p = 4,57 < F^r (6; 5)_{0,95} = 4,95$, устанавливается адекватность реальному процессу его математического описания; дисперсионный анализ последнего выявил существенную неадекватность полученной модели: дисперсионное отношение, связанное с квадратичными членами, оказалось значимым с высокой достоверностью.

Рассмотрение полученного уравнения позволяет заключить, что при постоянной плотности укладки зерновок с уменьшением угла наклона к горизонту лотка сопротивление сдвигу возрастает. Следовательно, в качестве параметра позволяющего оперативно изменять коэффициент внутреннего трения перемещаемого по лотку материала, целесообразно использовать варьируемое управление наклоном опорной плоскости.

Увеличение нормального давления на слой от веса вышележащих слоев, повышение засоренности материала и степени его неоднородности приводит к увеличению сопротивления сдвигу.

На внутреннее трение значительное влияние оказывают параметры вибрационного воздействия на зерновой материал. В связи с этим была изучена зависимость сопротивления сдвигу зернового материала от следующих внешних входных и внутренних факторов: крупности частиц - X_1 ; засоренности и влажности зернового материала - соответственно X_2 и X_3 ; веса площадки и скорости ее перемещения по поверхности материала - соответственно X_4 и X_5 ; угла между направлением колебаний лотка с материалом и направлением вектора сдвига площадки - X_6 ; амплитуды и частоты гармо-

нических колебаний лотка - соответственно X_7 и X_8 .

Статистическая модель, описывающая при указанных факторах сопротивление сдвигу вибрируемого зернового материала, имеет вид неполного квадратного уравнения регрессии.

$$\hat{y} = 3,4948 + 0,1079x_1 + 0,2931x_2 + 0,7689x_3 + 0,2232x_4 + 0,1116x_5 - 0,1030x_7 + 0,0944x_8 + 0,2330x_3x_4 + 0,0920x_7x_8$$

с ошибками в определении коэффициентов регрессии $s\{b\} = 0,0303$. Полученное уравнение адекватно описывает изучаемый процесс, поскольку $F^p = 3,90 < F^r (6; 5)_{0,95} = 4,95$.

Из рассмотренной полученной модели следует, что значимой является влажность зернового материала; величина сопротивления сдвигу при вибрировании зависит и от скорости сдвига слоя, причем эта зависимость носит линейный характер.

Зерновой материал при вибрационном воздействии на него приобретает свойства псевдовязкого материала; в нем происходит переукладка зерновок, их сближение и повышение подвижности с появлением внутренних относительных сдвигов слоев. Такое явление замечено и в экспериментальных исследованиях с другими сыпучими материалами, выполненных О.Н.Косиловым, И.В.Костиловой, И.А.Савченко, Г.И.Покровским.

В работе найден экспериментальное подтверждение и теоретический вывод И.И.Биховского об анизотропии вязкоупругих свойств сыпучих материалов.

Существенное влияние на вязкоупругие свойства зернового материала оказывает интенсивность колебаний (в виде произведения квадрата амплитуды на куб частоты колебаний), имеющая размерность удельной мощности.

Анализ полученной модели показывает, что передача вибраций

в направлении перемещения зернового слоя уменьшает величину сопротивления сдвигу. Поэтому, изменяя фазо-частотную и векторную характеристику вибраций, можно осуществить направленное изменение внутреннего сопротивления зерновой массы. Такое явление может быть рационально использовано для повышения эффективности действия вибрационных питателей: вибрирование зернового материала в горизонтальном направлении, перпендикулярном направлению основной его подачи, должно способствовать повышению равномерности распределения материала по ширине рабочего органа питателя.

Для более полного изучения влияния основных механических параметров вибротолка-амплитуды и частоты колебаний его - на сдвиг слоев зернового материала использованы методы канонического анализа моделей второго порядка с двумя независимыми переменными; такие методы позволяют аналитически представить оценку уравнения, записанного в новых координатах (соответствующим главным осям), а двумерную поверхность отклика геометрически интерпретировать в виде контуров постоянного значения.

Каноническое уравнение, из которого исключены все члены первого порядка, а также члены взаимодействия, таково:

$$\hat{y} - y_s = \lambda_1 X_1^2 + \lambda_2 X_2^2,$$

где y_s - предсказанный отклик в центре поверхности, описываемый оценкой уравнения регрессии;

λ_1 и λ_2 - коэффициенты - преобразование оценки параметров;

X_1 и X_2 - новые координаты, соответствующие главным осям.

Если с математических позиций порядок выбора коэффициентов λ_1 и λ_2 не имеет значения, то при решении задач планирования экспериментов этот порядок, во избежание неверных выводов, существенно важен.

В главе II изложено рекомендуемое правило выбора порядка следования указанных коэффициентов.

1. Если при переносе начала координат первоначальной системы в точку экстремума двумерной поверхности отклика и последующего поворота системы в положительном направлении до совмещения осей с ближайшими осями новой системы встретятся одноименные оси, то знак разности коэффициентов канонической формы $sign[\lambda_1 - \lambda_2]$ должен совпадать со знаком коэффициента $2B$ в исходном уравнении анализируемой кривой:

$$Ax^2 + 2Bx_1x_2 + Cx_2^2 + 2Dx_1 + 2Ex_2 + F = 0,$$

где x_1, x_2 - старые координаты.

2. Если при повороте старой системы встречаются разноименные оси, то знаки должны быть противоположными:

$$sign[\lambda_1 - \lambda_2] \neq sign 2B.$$

Двумерные поверхности отклика (рис. 2) - кривые равного сопротивления (P, H) сдвигу слоев зернового материала в координатах "амплитуда A - частота f колебаний вибрационного лотка" - описываются каноническим уравнением второго порядка в форме

$$g - 3,6064 = 0,0460 X_1^2 - 0,0460 X_2^2$$

и представляют собой гиперболы с центром - седловой точкой, поскольку $|\lambda_1| = |\lambda_2|$, а λ_1 и λ_2 имеют разноименные знаки.

Исследуемая поверхность отклика относится к типу "маямяк": при движении вдоль оси X_1 сопротивление зернового материала сдвигу увеличивается, а вдоль оси X_2 - уменьшается. Снижение сопротивления сдвигу может быть достигнуто уменьшением амплитуды

№ 12285

Одесский технологический институт

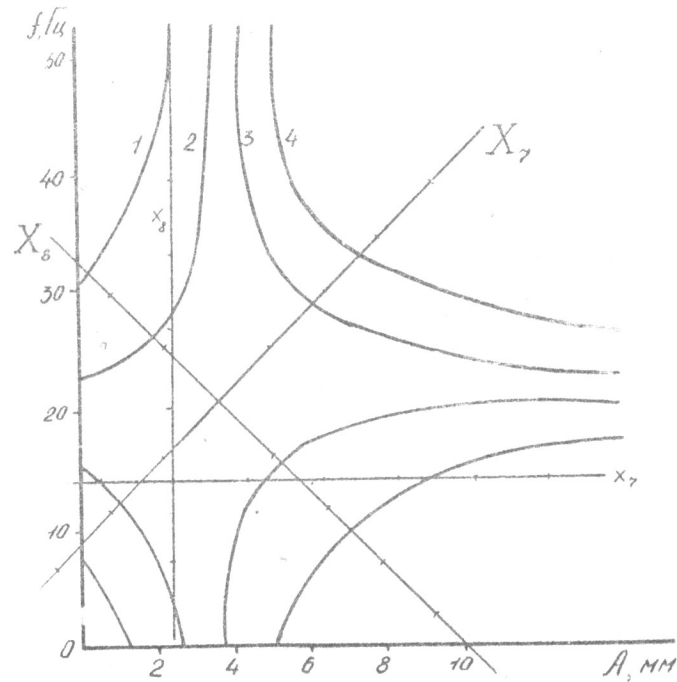


Рис. 2. Кривые равных значений P, H :
 1-3,30; 2-3,50; 3-3,70; 4-3,90.

до $1,5 \pm 0,5$ мм с одновременным повышением частоты колебаний до 32 ± 40 Гц, а также увеличением амплитуды до 6 ± 8 мм при снижении частоты колебаний до 8 ± 4 Гц.

Одной из технологически важных функций питателя, непосредственно сопряженного с пневмосепарирующим каналом, является предварительная подготовка подаваемого материала к высокоэффективному аэромеханическому сепарированию. Такая подготовка заключается в принудительном выведении аэродинамически легких частиц в верхние слои потока материала, выходящего из питателя. Исследованиями

Р.Н.Волика, П.Н.Платонова и А.П.Ковтуна, В.В.Гортинского и Г.Е.Птушкиной, Ч.Г.Гриммана и А.Бекбаева, И.Е.Костылевой, И.И.Быховского, И.А.Савченко установлено, что как внутреннее сопротивление, так и интенсивность сегрегации частиц в сыпучем материале зависят от его объемной массы. Это вызвало необходимость изучить зависимость объемной массы зерновых смесей от определяющих факторов.

Измерение локального значения объемной массы зернового материала в процессе его вибрирования осуществляли с помощью прибора, представляющего собой измерительный сосуд, собранный из десяти цилиндров высотой по 10мм и одного цилиндра высотой 80 мм. В зазоры между цилиндрами вдвигаются пластины толщиной 1мм, вращающиеся вокруг неподвижной оси; они могут разделить сыпучее тело на части требуемой толщины и находящиеся на различном расстоянии от дна сосуда.

Серия поясковых опытов и последующий дисперсионный анализ опытных данных с помощью F -отношения показали, что толщина выделяемого слоя материала должна быть не менее 30мм; в противном случае при введении разделяющих пластин происходит выдавливание зерна из пространства между пластинами, а это приводит к получению смещенных оценок величины объемной массы.

Изучение литературы указало на то, что объемная масса зерновых смесей зависит от многих факторов, различных по физической сущности. Для отбора наиболее значимых факторов была проведена серия отсеивающих экспериментов с использованием метода "ветвящейся стратегии", разработанного Р.И.Слободчиковой. При возможных комбинациях факторов такой метод позволяет последовательно уменьшать вклады в общую дисперсию по получению минимальной

остаточной дисперсии, удовлетворяющей требованиям адекватности.

В качестве внешних входных и внутренних факторов были выбраны: крупность зерновок пшеницы - X_1 ; засоренность и влажность зерновой смеси - соответственно X_2 и X_3 ; угол отклонения направления вибрирования от горизонтали - X_4 ; амплитуда и частота колебаний рабочего органа - соответственно X_5 и X_6 ; размеры измерительной емкости - X_7 ; расстояние от дна емкости до средней плоскости выделяемого элемента - X_8 ; высота сыпучего тела - X_9 ; время вибрирования - X_{10} . В исследованиях были использованы те же зерновые смеси, с помощью которых несколько ранее изучалось сопротивление сдвигу. Условия вибрирования и геометрические параметры сыпучего тела назначили исходя из значений, наиболее часто встречающихся в научно-технической литературе и при опытном конструировании вибрационных питателей. Влияние фактора X_7 изучали на двух модификациях измерительного прибора, имеющих разные внутренние диаметры - 89мм и 257 мм при одинаковой высоте.

Для реализации плана экспериментов были составлены ряды матрицы из независимых переменных со слабой корреляцией между столбцами (значение максимального коэффициента корреляции $r = 0,25$).

Реализация опытов по матрице и обработка полученных результатов (на ЭЦМ Минск-22 по алгоритму "ветвящейся стратегии") позволили выделить такие наиболее значимые эффекты: X_8 ; $X_2 X_4$; $X_5 X_{10}$; X_1 ; X_3 ; $X_2 X_{10}$; X_2 ; $X_1 X_9$; X_4 ; $X_2 X_6$; $X_2 X_5$. Отсутствие фактора X_7 свидетельствует о пренебрежимо малом влиянии размеров измерительного сосуда на величину объемной массы зернового материала. Этот вывод подтверждали и однофакторные эксперименты.

Наибольшее влияние на величину объемной массы оказывает засоренность зернового материала; влияние остальных выделенных

факторов на плотность структуры зерновых смесей приблизительно одинаково. Поэтому реализация алгоритма "ветвящейся стратегии" для рассматриваемой задачи не позволила четко выявить набор эффектов, который обеспечивает меньшее значение F -критерия по сравнению с табличным при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для получения адекватной математической модели был реализован центральный ротатабельный композиционный план второго порядка. При этом из рассмотренных были исключены: фактор X_1 - в связи с невозможностью осуществить строгое фиксирование пяти уровней размеров частиц; фактор X_7 , так как, судя по отсеивающим экспериментам, незначимым оказалось влияние размеров измерительного прибора; фактор X_{10} - ввиду того, что зерновая смесь, как показали наблюдения, находится на вибрируемом лотке питателя весьма непродолжительно - $1 + 1,5$ с.

Статистическая обработка экспериментальных данных позволила получить статистическую модель изменения объемной массы зерновой смеси под влиянием исследуемых факторов в виде такого уравнения регрессии:

$$\begin{aligned} \bar{y} = & 634,5252 - 57,3297x_2 - 17,9197x_3 + 1,6970x_4 + 9,1926x_5 + 8,9795x_6 + \\ & + 2,7850x_7 + 9,5526x_8 + 8,0313x_2x_3 - 11,0249x_2x_4 - 8,2034x_2x_5 + \\ & + 4,7273x_2x_6 + 5,5031x_2x_8 + 3,9061x_2x_9 + 2,2486x_3x_4 + 2,8354x_3x_5 - \\ & - 5,6789x_3x_6 - 7,0928x_3x_8 + 2,7470x_3x_9 - 2,0772x_4x_5 + 2,0653x_4x_6 - \\ & - 4,2484x_4x_8 + 3,4438x_4x_9 + 8,3240x_5x_6 - 1,6418x_5x_8 + 6,3155x_5x_9 - \\ & - 4,5417x_6x_8 - 1,5393x_6x_9 - 1,8568x_8x_9 + 5,3329x_2^2 + 2,1552x_3^2 + \\ & + 0,8837x_4^2 + 5,0689x_5^2 - 3,5648x_6^2 + 3,7280x_7^2 - 5,1527x_8^2 \end{aligned}$$

Ошибка эксперимента при этом составила $S\{\bar{y}\} = 26,59 \text{ кг/м}^3$.

а ошибки в определении коэффициентов регрессии оказались равными:

$$s(b_0) = 7,10 \text{ кг/м}^3; s(b_1) = 2,97 \text{ кг/м}^3; s(b_{11}) = 3,33 \text{ кг/м}^3; s(b_{12}) = 2,43 \text{ кг/м}^3.$$

Анализ полученного уравнения показал: а) в исследуемой модели значимы как линейные, так и нелинейные (квадратичные) эффекты; это подтверждает и проверка с помощью F -критерия адекватности модели изучаемому явлению [$F^p = 0,91 < F^*(67; 13)_{0,95} = 2,29$]; б) на величину объемной массы существенно влияют засоренность и влажность зернового материала; в) амплитуда и частота колебаний, определяющие виброскорость Af и виброускорение Af^2 , практически одинаково влияют на величину объемной массы.

В качестве управляющих параметров, позволяющих изменять объемную массу зернового материала, могут служить амплитуда A и частота f вибраций. Кривые равных значений объемной массы материала в координатах $A-f$ (рис. 3) представляют собой гиперболы, описываемые каноническим уравнением в форме:

$$\bar{q} - y_s = 7,44 X_s^2 - 5,04 X_s^2.$$

Поскольку $\lambda_1 = 7,44 > \lambda_2 = 5,04$ и знаки при λ_1 и λ_2 соответственно плюс и минус, геометрической интерпретацией канонической формы является вытянутое седло с центром в седловой точке.

Исследуемая поверхность относится к типу "минимакс": при движении вдоль оси X_s объемная масса зерновой смеси увеличивается, а вдоль оси X_6 - уменьшается. Анализ двумерных поверхностей отклика показывает, что в области малых и средних значений амплитуды (0,5 + 1,5 и 2,5 + 3,5 мм) и малых и больших значений частоты (5 + 7 и 16 + 18 Гц) управление объемной массой может наиболее эффективно достигаться изменением амплитуды;

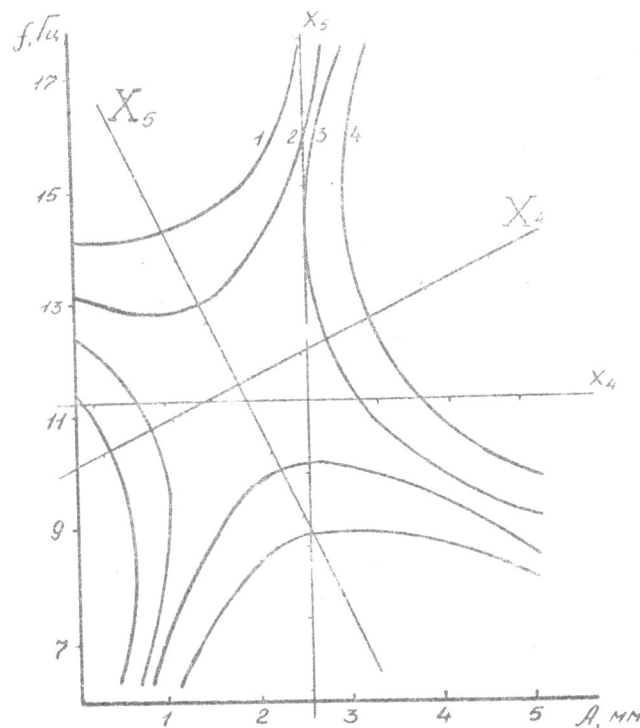


Рис. 3. Кривые равных значений величины объемной массы зерновых материалов ρ , кг/м^3 :

1-580; 2-600; 3-620; 4-640.

в области же больших амплитуд (4,5 + 5,5мм) и средних значений частоты (7 + 10 Гц) наибольшее влияние на величину объемной массы оказывает частота вибраций.

Результаты лабораторных исследований явились основой для программы производственных испытаний вибрационных питателей зерноочистительных сепараторов. Они были проведены на экспериментальном стенде (рис. 4), смонтированном в рабочей башне Одесского портового элеватора. Испытаниям были подвергнуты два

типа питателей: вибропитатель сепаратора ЗС-50 и питатель, вибрационный лоток которого совершал гармонические колебания в горизонтальной плоскости в направлении, перпендикулярном направлению основной подачи зернового материала.

В качестве показателей для оценки эффективности питателей были приняты: коэффициент вариации распределения локальных подач зернового материала на восьми участках по ширине лотка питателя - $y_1 = V = \frac{S}{\bar{q}_s}$ и коэффициент обогащения верхнего слоя выходящего из питателя потока зернового материала аэродинамически легкими примесями - $y_2 = \gamma = \frac{3k}{3_n}$. В качестве независимых переменных были выбраны: производительность питателя - X_1 ; частота и амплитуда колебаний рабочего органа - соответственно X_2 и X_3 ; угол наклона вибрационного лотка к горизонту - X_4 .

Область факторного пространства, избранная для исследований, ограничена производственно-техническими требованиями (фактор X_1), а также значениями, характерными для производственных условий оборудования зерноперерабатывающих предприятий (факторы X_2, X_3, X_4).

Значения функции отклика y_1 определяли экспериментально по величине прогиба восьми упругих вертикальных пластин, динамически нагруженных зерновым потоком, свободно сходящим с вибрационного лотка. Деформации балочек воспринимали наклеенные на их поверхности с обеих сторон фольговые тензорезисторы, присоединенные по мостовой схеме к тензометрической станции УТС-1-ВТ-12. Усиленные сигналы поступали к регистрирующим приборам - восьми микроамперметрам - и одновременно фиксировались с помощью фотопарата.

На рис. 5 представлены диаграммы, характеризующие распределение зернового материала по ширине вибролотка с поперечными коле-

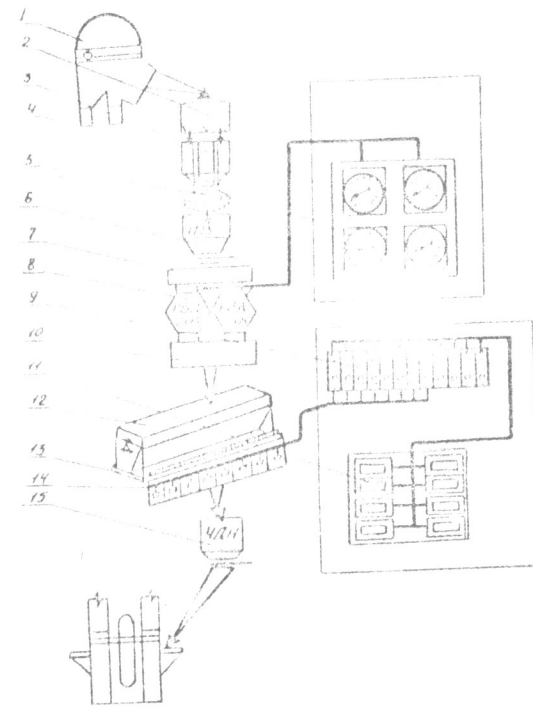


Рис. 4 Структурная схема экспериментального стенда в редакции дачно Омского парового элеватора:
1 - тарелка ИЦ-550; 2 - навозовый бункер; 3 - лоток тарельной засы 270; 4 - регистрирующие приборы расхода; 5 - навозовый бункер; 6 - верхняя опорная конструкция; 7 - распределительная каретка; 8 - гидравлический расходомер; 9 - тензометрическая станция УТС-1 ВТ-12; 10 - опорная каретка; 11 - микроамперметры М-24; 12 - тарельная засы; 13 - питательный лоток; 14 - тензорезисторы; 15 - нижняя опорная конструкция.

баниями. Аналогичен характер распределения материала, подаваемого вибратором к рабочим органам сепаратора ЗС-50.

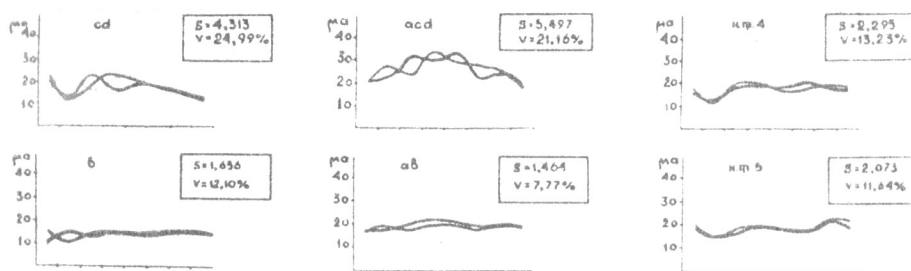


Рис. 5. Распределение зернового материала по ширине рабочего органа вибрационного питателя при поперечных колебаниях лотка.

Анализ полученных кривых показывает, что в средней части потока расход материала, как правило, больше, чем в боковых его частях. Неравномерность распределения обуславливает, главным образом, появление локальных струй в отдельных частях потока. Расположение этих струй в процессе проведения одного опыта не изменялось, однако воспроизведение опыта в тех же условиях вызвало изменение взаимного расположения этих струй. Это может быть объяснено динамически нестационарным характером истечения зернового материала через узкое выпускное отверстие приемного бункера питателя и неоднородным воздействием вибраций лотка на многокомпонентную смесь. При определенных кинематических параметрах лотка объемная масса движущегося по нему зернового материала уменьшается настолько, что образовавшиеся вследствие разрушения сводов при выходе из приемного бункера струи свободно проходят вдоль всего рабочего органа, ничем не задерживаясь. Эта тенденция особенно наглядно проявляется при больших углах

наклона лотка (на рис. 6 - верхний ряд графических зависимостей).

Обработка результатов экспериментов позволила получить следующие статистические описания распределения зернового материала:

для питателя сепаратора ЗС-50:

$$\hat{y}'_1 = 14,7735 \cdot 0,1489x_1 - 2,4489x_2 + 0,0461x_3 + 1,6889x_4 - 2,5964x_1^2 - 1,5264x_2^2 + 1,6687x_3^2 + 7,6337x_4^2 + 1,6313x_1x_2 + 0,6825x_1x_3 - 1,8850x_1x_4 - 0,1863x_2x_3 - 1,1263x_2x_4 + 0,2650x_3x_4;$$

для питателя с поперечными колебаниями лотка:

$$\hat{y}'_2 = 13,4444 - 1,3028x_1 - 1,2472x_2 - 0,2656x_3 + 5,2694x_4 + 0,9546x_1^2 - 0,4754x_2^2 + 0,4796x_3^2 + 1,0346x_4^2 + 0,2319x_1x_2 + 0,2294x_1x_3 - 0,0619x_1x_4 - 0,2169x_2x_3 - 1,1631x_2x_4 - 0,3556x_3x_4.$$

При этом дисперсии, характеризующие ошибки опытов в первом и втором случаях соответственно равны $S^2\{\bar{y}'_1\} = 2,7106$; $S^2\{\bar{y}'_2\} = 2,5767$, а средние квадратические отклонения, характеризующие ошибки в определении коэффициентов регрессии, равны:

$S\{b'_1\} = 0,5882$;	$S\{b'_2\} = 0,3786$;
$S\{b'_3\} = 1,0358$;	$S\{b'_4\} = 1,0099$;
$S\{b'_{12}\} = 0,4116$;	$S\{b'_{13}\} = 0,4013$;
$S\{b'_{14}\} = 0,7880$;	$S\{b'_{23}\} = 0,7683$.

Полученные модели адекватны изучаемым процессам: $F^*_{1,31} = 1,31$; $F^*_{1,31} = 0,31$; $F^*(9,71)_{0,95} = 2,01$.

Качественный анализ моделей показывает, что не все факторы одинаково влияют на процесс распределения зернового материала. Увеличение производительности питателя (фактора x_1) при продольных колебаниях лотка вызывает повышение неравномерности распределения материала ($b_1 > 0$); для питателя с поперечными колебаниями лотка это влияние противоположно ($b_1 < 0$).

Аналогичное положение характерно и для амплитуды вибраций рабочего органа (фактор X_1).

Определение численных значений функции отклика y_2 производили при установившемся режиме, отбирая в каждом опыте образцы исходной зерновой смеси и верхних слоев смеси, направляемой питателем в пневмосепарирующий канал. Образцы для оценки содержания в них аэродинамически легких частиц подвергали разделению в однотрубном пневмокласификаторе (в условиях ламинарного режиме воздушного потока).

В результате статистической обработки экспериментальных данных были получены статистические модели, обусловленные процессом самосортирования зерновых смесей на лотках

питателя для сепаратора ЭС-50:

$$\hat{y}_2 = 1,3660 - 0,1088 X_1 - 0,0961 X_2 - 0,0511 X_3 - 0,0271 X_4 + 0,0825 X_1^2 - 0,1965 X_2^2 - 0,0660 X_3^2 + 0,0725 X_4^2 + 0,1299 X_1 X_2 - 0,0047 X_1 X_3 + 0,0436 X_1 X_4 + 0,0462 X_2 X_3 + 0,1364 X_2 X_4 + 0,0738 X_3 X_4;$$

питателя с поперечными колебаниями лотка:

$$\hat{y}_2 = 0,7948 - 0,0706 X_1 + 0,0010 X_2 + 0,0653 X_3 - 0,2765 X_4 + 0,0364 X_1^2 + 0,1147 X_2^2 - 0,0269 X_3^2 + 0,1223 X_4^2 - 0,0686 X_1 X_2 - 0,0072 X_1 X_3 + 0,0206 X_1 X_4 + 0,0587 X_2 X_3 - 0,0563 X_2 X_4 - 0,1257 X_3 X_4.$$

Ошибки опытов при этом характеризуются дисперсиями соответственно $S^2\{\bar{y}_1\} = 0,0648$; $S^2\{\bar{y}_2\} = 0,0713$, а коэффициенты регрессии вычислены со следующими ошибками:

$$S\{b_1\} = 0,0600; \quad S\{b_2\} = 0,0633;$$

$$S\{b_{11}\} = 0,1600; \quad S\{b_{12}\} = 0,1679;$$

$$S\{b_{13}\} = 0,0640; \quad S\{b_{14}\} = 0,0611;$$

$$S\{b_{21}\} = 0,1217; \quad S\{b_{22}\} = 0,1277.$$

Расчетные значения F -критерия $F_2^{1/p} = 2,02$ и $F_2^p = 0,42$ оказались меньше, чем табличное значение $F^T(9; 71)_{0,95} = 2,01$, что свидетельствует об адекватности полученных уравнений.

Полученные уравнения регрессии, имеющие резко выраженный нелинейный характер, свидетельствуют о том, что процессы распределения и самосортирования зерновых смесей являются сложными и многофакторными: они характеризуются возникновением конфликтных ситуаций и петель образных связей, что в значительной мере обуславливает эффекты взаимодействия факторов.

Действительно, из всех анализируемых факторов только угол наклона лотка к горизонту оказывает одинаковое влияние на процессы распределения и самосортирования зерновой смеси, причем уменьшение значения этого фактора оказывает технологически положительный эффект. Остальные факторы создают конфликтные ситуации: изменение их приводит к повышению эффективности одного процесса и снижению эффективности другого.

В связи с этим, для получения количественных значений определяющих факторов проведен анализ двумерных поверхностей отклика в координатах "амплитуда-частота вибрирования". Анализ поверхностей показал, что любое отклонение амплитуды колебаний лотка относительно $A = 4$ мм вызывает снижение эффективности обоих изучаемых процессов. Для повышения качества работы необходимо, чтобы рабочий орган питателя совершал колебания с частотой $f = 15 + 17$ Гц.

Сравнительные испытания вибропитателей с продольными и поперечными колебаниями рабочих органов обнаружали более высокую эффективность питателя с поперечными колебаниями лотка. Это обусловило выбор такого питателя для дальнейших исследований.

В последней части работы ставилась задача изучить зависимость процесса аэромеханического сепарирования зерновой смеси от параметров вибрационного питателя, а также определить методические подходы к установлению оптимальных условий работы последнего.

Эффективность процесса аэромеханического сепарирования оценивали двумя показателями:

полнотой выделения аэродинамически легких примесей, E_n %,

$$y_1 = E_n = \left(1 - \frac{M_k Z_k}{M_n Z_n}\right) \cdot 100,$$

четкостью выделения примесей, E_u %,

$$y_2 = E_u = (1 - U) \cdot 100,$$

где M_n , Z_n и M_k , Z_k - соответственно масса и засоренность аэродинамически легкими примесями исходной зерновой смеси и очищенного зерна; U - содержание нормального зерна в отходах.

В качестве входных независимых факторов были выбраны:

удельная зерновая загрузка пневмосепарирующего канала $q_0 - X_1$, частота f и амплитуда A колебаний вибрационного лотка питающего устройства - соответственно X_2 и X_3 ; угол наклона лотка к горизонту $\alpha - X_4$; осредненная по поперечному сечению пневмосепарирующего канала, незагруженному зерном, скорость восходящего воздушного потока $V_k - X_5$.

Засорителем зернового материала служили аэродинамически легкие примеси, выделение в относосоздаваемых камерах сепаратора РСМ-50.

В опытах был использован близкий к D -оптимальному плану Хартли для пяти факторов (Na_5), построенный на гиперкубе. Выбор этого типа плана обусловлен тем, что квази- D -

оптимальные планы обеспечивают получение наиболее точных координат оптимальной точки.

Опыты были проведены на экспериментальной установке, функциональная схема которой представлена на рис. 6.

Для исключения влияния бункерного эффекта (самосортирования зернового материала при истечении из емкости) эффективность процесса аэромеханического сепарирования рассчитывали не по средней исходной засоренности зерна, а по текущей его засоренности на входе в приемник питающего устройства.

По данным специально поставленной серии экспериментов были вычислены средние квадратические отклонения, характеризующие ошибки опытов, - $S\{y_1\} = 3,3694$, и $S\{y_2\} = 1,1586$. При обычно принимаемой предельно допустимой величине относительной ошибки $\delta = 0,10$ абсолютные ошибки составили $E_1 = 0,353$;

$E_2 = 0,116$. По величинам отношений $\frac{E_1}{S\{y_1\}} = 2,76$ и $\frac{E_2}{S\{y_2\}} = 8,37$ было найдено, что при доверительной вероятности $\rho = 0,9$

для обеспечения заданной точности определения полноты выделения примесей (y_1) необходимо каждый опыт проводить трижды, а для вычисления четкости сепарирования (y_2) с заданной точностью опыта достаточно только дублировать. Но так как при $Z = 2$ невозможно обеспечить необходимую точность определения функции отклика y_i , назначили число повторений опытов $Z = 3$.

Расчетные значения G -критерия Кохана $G_1^* = 0,1947$ и $G_2^* = 0,1236$ оказались меньше их табличного значения

$G^* (27; 2)_{0,95} = 0,2167$, что свидетельствует об однородности дисперсий функций отклика и хорошей воспроизводимости опытов.

В результате обработки экспериментальных данных была получена статистическая модель процесса аэромеханического сепарирования:

$$\hat{y}_1 = 55,2570 - 6,6094x_1 - 2,4278x_2 - 6,5200x_3 - 0,3794x_4 + 18,4183x_5 + 4,1319x_1x_2 - 0,5531x_1x_3 + 0,8406x_1x_4 - 0,4056x_1x_5 + 3,3019x_2x_3 - 5,6219x_2x_4 + 2,0469x_2x_5 + 0,4256x_3x_4 - 3,2731x_3x_5 + 0,7856x_4x_5 - 1,4578x_1^2 - 0,5928x_2^2 + 0,9573x_3^2 - 3,7578x_4^2 + 5,9822x_5^2;$$

$$\hat{y}_2 = 97,6658 - 0,0844x_1 + 0,3533x_2 - 0,2944x_3 - 0,2594x_4 - 2,0844x_5 + 0,1394x_1x_2 - 0,4481x_1x_3 + 0,3356x_1x_4 - 0,1806x_1x_5 + 0,2319x_2x_3 - 0,3619x_2x_4 + 0,2769x_2x_5 + 0,2556x_3x_4 - 0,3581x_3x_5 - 0,2044x_4x_5 + 0,7534x_1^2 + 0,9433x_2^2 + 0,3134x_3^2 + 0,8684x_4^2 - 2,6166x_5^2.$$

Ошибки опыта - $S\{\bar{y}_1\} = 3,7842$ и $S\{\bar{y}_2\} = 0,4476$. Коэффициенты регрессии первого уравнения вычислены с ошибками: $S\{b_0\} = 0,7229$; $S\{b_1\} = 0,4585$; $S\{b_{ij}\} = 0,4863$; $S\{b_{ii}\} = 1,2438$; ошибки, с которыми рассчитаны параметры второго уравнения, равны: $S\{b_0\} = 0,2486$; $S\{b_1\} = 0,1578$; $S\{b_{ij}\} = 0,1673$; $S\{b_{ii}\} = 0,4276$.

Полученная модель адекватна изучаемому процессу - $F_1^* = 2,21$ и $F_2^* = 1,88 < F^* (6; 54)_{0,95} = 2,27$.

Анализ модели с помощью одномерных поверхностей отклика (для случая одной зависимой и одной независимой переменных) показал, что исследуемые факторы создают конфликтные ситуации, связанные с увеличением y_1 и одновременным уменьшением y_2 и наоборот. При этом четко проявляется значительное влияние параметров работы вибропитателя на эффективность

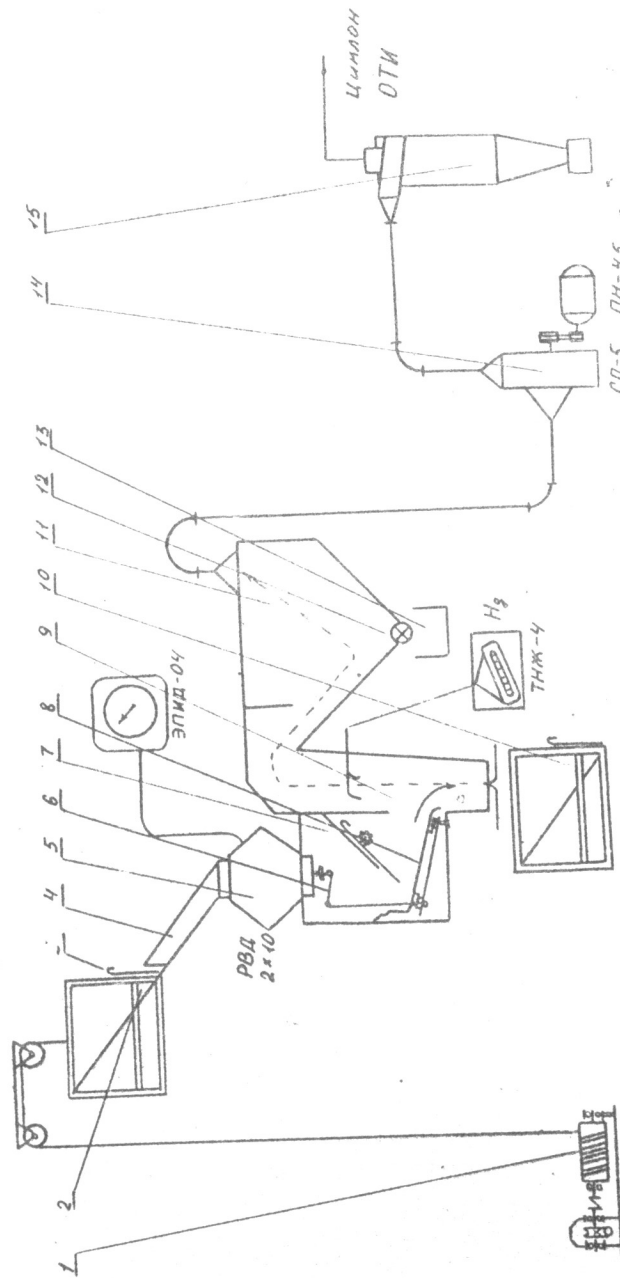


Рис. 6. Принципиальная схема экспериментальной установки.

- 1 - лед-дэн; 2, 10 - емкости для зерновой смеси; 3 - задвижка емкости; 4 - соплолет; 5 - датчик производительности гидравлического рожкового РВД 2x10; 6 - рычаг для подвеса лотка питателя; 7 - приемная воронка питателя; 9 - пневмосепараторный манометр; 11 - относительная влажность; 12 - индикатор запыленности; 13 - воронка для осцилляционных отливок; 14 - центробежный пылесос; 15 - регулируемый привод.

аэромеханического сепарирования зерновых смесей. В связи с этим с помощью двумерных поверхностей отклика более подробно было изучено влияние на эффективность процесса амплитуды и частоты колебаний вибрлотка.

Кривые равных значений полноты выделения примесей E_n представляют собой гиперболы, описываемые каноническим уравнением в форме

$$\hat{q}_1 - 57,10 = 2,01 X_2^2 - 1,64 X_3^2$$

с центром в точке $X_2 = 0,6393$; $X_3 = 2,7576$. Главные оси гипербол отклонены на $51^{\circ}35'$ от первоначальных координатных осей.

Контуры поверхности отклика, представляющей четкость сепарирования E_u , описываются каноническим уравнением в виде

$$\hat{q}_2 - 96,75 = 0,96 X_2^2 + 0,29 X_3^2$$

Анализируемая поверхность представляет собой эллипсоидальную впадину с минимумом, так как оба коэффициента положительны и $\lambda_1 > \lambda_2$. Центр эллипсов находится в точке с координатами $X_2 = -0,0741$; $X_3 = -0,1363$. Главные оси кривых отклонены на $10^{\circ}06'$ от факторных осей.

Анализ двумерных поверхностей отклика свидетельствует о том, что существенное повышение эффективности процесса аэромеханического сепарирования может быть достигнуто одновременным уменьшением амплитуды и частоты колебаний рабочего органа питателя.

Задача оптимизации процесса аэромеханического сепарирования была сформулирована следующим образом: при оценке эффективности процесса с помощью двух функций отклика - полноты

$y_1 = f(X_1, X_2, \dots, X_5)$ и четкости $y_2 = \mathcal{F}(X_1, X_2, \dots, X_5)$ сепарирования - найти координаты такой точки факторного пространства $X^*(X_1^*, X_2^*, \dots, X_5^*)$, в которой обеспечивается максимум функции y_1 при наложении ограничения на функцию y_2 , а именно: $y_2 \geq 98\%$.

Решение задачи было осуществлено на ЭЦМ Раздан-2 методом направленного перебора. В результате решения были найдены оптимальные параметры процесса аэромеханического сепарирования зерна: $q_6^* = 7,9 \text{ кг/(с·м)}$; $f^* = 6,9 \text{ Гц}$; $A^* = 2,8 \text{ мм}$; $\alpha^* = 0,31 \text{ рад}$; $V_6^* = 5,7 \text{ м/с}$. При этом $E_n^* \approx 100\%$, $E_u^* \approx 98\%$. Экспериментальная проверка этого режима подтвердила его высокую эффективность: $E_n^2 = 93\%$; $E_u^2 = 98\%$.

В связи с тем, что эффективность аэромеханического сепарирования в значительной степени зависит от физико-технологических свойств обрабатываемой зерновой смеси, найденные значения входных факторов, определяющих эффективность процесса, являются оптимальными лишь при сепарировании зерновых смесей, которые близки к использованным в проведенных исследованиях.

Повышение эффективности выделения из зерновой смеси аэродинамически легких примесей является существенной предпосылкой для интенсификации процесса сепарирования по геометрическим признакам равномерно распределенного материала по ширине приемного фронта решетной части зерноочистительного сепаратора.

Общие выводы и рекомендации

1. Аэромеханическое сепарирование зерна является сложным многофакторным и многовариантным процессом, в связи с чем его исследование целесообразно базировать на использовании

формализованных этапов системного подхода и методов статистического планирования многофакторного эксперимента.

2. Статистические зависимости между подсистемами "питатель - пневмосепарирующий канал" представляют собой уравнения регрессии второй степени. Расчет параметров такого уравнения следует базировать на сбалансированных планах второго порядка.

3. Для облегчения процедуры построения двумерных сечений поверхностей отклика выведено правило выбора последовательности коэффициентов в канонической форме уравнения регрессии.

4. Вибрирование опорного лотка питателя направленно изменяет реологические свойства зерновых материалов - они переходят в класс псевдовязких материалов.

5. Неравномерность распределения питающими устройствами зернового материала вызвана появлением локальных струй в выходящем из питателя потоке материала.

6. Повышение эффективности аэромеханического сепарирования зерновой смеси должно достигаться не только в результате равномерной раздачи по приемному фронту пневмосепарирующего канала зернового материала, но и путем вибрационного воздействия на него для направленного самосортирования и перемещения аэродинамически легких засорителей в верхние слои.

7. Целесообразны в зерноочистительных сито-воздушных сепараторах вибрационные питающие устройства с гармоническими колебаниями опорно-направляющего лотка вдоль горизонтальной прямой, перпендикулярной направлению основной подачи материала.

Механические параметры вибраций не однозначно влияют на величину объемной массы зернового материала: в области малых и средних значений амплитуды (0,5 - 1,5 и 2,5 - 3,5 мм) и

малых и больших значений частоты (5-7 и 16-18 Гц) большее влияние оказывает амплитуда колебаний, в области же больших амплитуд (4,5 - 5,5 мм) и средних значений частот (7-10 Гц) - частота вибраций.

8. При аэромеханическом сепарировании нормального зерна пшеницы со значениями скорости витания зерновок в свободных условиях $V_s = 10,5 \pm 0,5$ м/с и длины зерновок $l = 6,4 \pm 0,9$ мм при содержании аэродинамически легких примесей ($V_s = 3,5 \pm 1$ м/с) $1,5 \pm 2,5\%$ технологически оптимальными параметрами являются:

$$q_s = 7,9 \text{ кг/(м.с)}; f = 6,9 \text{ Гц}; A = 2,8 \text{ мм}; \alpha = 0,3 \text{ рад}; V_6 = 5,7 \text{ м/с}.$$

9. Используемые в работе формализованные методы скле и плано-статистические методы эксперимента могут быть плодотворно применены для дискретного исследования оптимальных режимов работы сопряженных подсистем "питатель-пневмосепарирующий канал" при различных физико-технологических свойствах подаваемых на обработку зерновых смесей.

Учитывая технологическую значимость действия питающего устройства в оптимальных условиях для достижения высокой эффективности аэромеханического сепарирования зерновых смесей целесообразно такое конструктивное решение зерноочистительного сепаратора, при котором возможна технически несложная оперативная подналадка питателя для перевода его в околооптимальный режим при изменении физико-технологических свойств исходной зерновой смеси.

10. Предполагаемая экономическая эффективность от применения в производстве зерноочистительного сепаратора, оснащенного вибрационным питателем и генерирующими колебаниями рабочего

органа и усовершенствованной решетной части, технологическая эффективность которой не ниже эффективности аэромеханической очистки, составляет в расчете на I сепаратор базовой конструкции (ЗСМ-50) 900 рублей в год.

С п и с о к
опубликованных в соавторстве работ
по материалам диссертации

1. Сепаратор как объект автоматизации. - "Мукомольно-элеваторная промышленность", 1967, № 8.
2. Влияние вибраций на объемную массу зерновой смеси. - "Известия вузов СССР. Пищевая технология", 1971, № 3.
3. Исследование математической модели сопротивления сдвигу зернового материала. - "Известия вузов СССР. Пищевая технология", 1971, № 4.
4. Определение параметров вибрационных питателей для зерноочистительных машин. В кн. "Хранение и переработка зерна", ЦНИИТЭИ Министерства заготовок СССР, 1971, № II.
5. Об эффективности работы вибрационных питателей. - Материалы II Всесоюзной конференции "Механика сыпучих материалов", ОТИШ им. М.В.Ломоносова, 1971.
6. Исследование математической модели сопротивления сдвигу зернового материала в динамических условиях. - "Известия вузов СССР. Пищевая технология", 1972, № 5.
7. Применение квази-D -оптимального плана В при исследовании питающих устройств для сыпучих материалов. - "Заводская лаборатория", 1972, № 7.

8. Построение и исследование математической модели режима вибрационного питателя для зерноочистительных сепараторов. - Тезисы II Всесоюзной научно-технической конференции "Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих материалов", ВНИИЗ, М., 1972.

9. Математическое моделирование вибрационной загрузки рабочих органов сито-воздушных сепараторов. - Тезисы докладов II Всесоюзного научно-технического совещания "Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна", ВИМ, М., 1973.

Материалы диссертации должны:

1. XXXI (февраль-апрель 1970) и XXXII (март-апрель 1971) научные конференции ОТИШ им. М.В.Ломоносова.
2. II Всесоюзная конференция "Механика сыпучих материалов" (Одесса, 1971).
3. II Всесоюзная научно-техническая конференция "Проблемы сепарирования зерна и других сыпучих материалов" (Москва, 1972).
4. II Всесоюзное научно-техническое совещание "Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна" (Москва, 1973).
5. Заседание Технического совета Миргородской машиноспательной станции Министерства заготовок СССР (октябрь, 1973).