

П 14  
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОSOBA

---

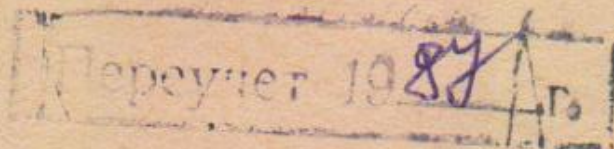
Аспирант А. И. ПАПЧЕНКО

На правах рукописи

**Исследование процесса  
пневмосепарирования зерновых  
смесей с целью его автоматизации  
методом многофакторного  
планирования эксперимента**

(Специальность № 05.198 — Автоматизация  
производственных процессов)

**Автореферат**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Одесса — 1970

Ногорез  
П17

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

ОДЕССКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
им. М. В. ЛОМОНОСОВА

Аспирант А. И. ПАПЧЕНКО

На правах рукописи

Исследование процесса  
пневмосепарирования зерновых  
смесей с целью его автоматизации  
методом многофакторного  
планирования эксперимента

(Специальность № 05.198 — Автоматизация  
производственных процессов)

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

✓ 011494



ОНАХТ 15.06.12  
Исследование процесс

Одесса — 1970



у011494

Работа выполнена на кафедре «Автоматизация производственных процессов» Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

**Научные руководители:**

доктор технических наук, профессор **П. Н. Платонов**;  
кандидат технических наук, доцент **А. А. Вайнберг**.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки и техники УССР **М. Л. Варламов**;  
кандидат технических наук, профессор **Л. И. Котляр**.

Ведущее предприятие — Всесоюзный научно-исследовательский и экспериментально-конструкторский институт продовольственного машиностроения (г. Москва).

Автореферат разослан „\_\_\_\_“ \_\_\_\_\_ 1970 г.

Защита диссертации состоится „9“ октября 1970 г. на заседании Ученого Совета Одесского технологического института им. М. В. Ломоносова.

Просим Ваши отзывы в двух экземплярах присылать по адресу: г. Одесса-39, ул. Свердлова, № 112, технологический институт имени М. В. Ломоносова.

Ученый секретарь Совета

**Л. А. Запорожец.**

## ВВЕДЕНИЕ

В Программе КПСС, решении XXIII съезда партии и постановлениях пленумов ЦК КПСС указывается, что основной задачей дальнейшего подъема народного хозяйства является всемерное повышение производительности труда и эффективности общественного производства на основе ускоренного научно-технического прогресса. Для реализации этих указаний одновременно с ростом объема производства сельскохозяйственной продукции необходимо более эффективно и комплексно использовать технологический потенциал ее.

С целью обеспечения сохранности зерна и получения готовых продуктов высокого качества предприятия мукомольной, крупяной и комбикормовой промышленности и элеваторно-складского хозяйства оснащены высокопроизводительными зерноочистительными машинами с высокой степенью механизации технологических операций, что позволяет в современных условиях поставить на реальной основе вопрос об их автоматизации. Наиболее благоприятные условия для автоматизации производственных процессов созданы на современном элеваторе, в технологической схеме которого все процессы за исключением очистки зерна подготовлены к автоматизации. Поэтому решение вопроса автоматизации процессов очистки зерна — сепарирования зерна на пневматической основе — создаст условия для полной автоматизации элеватора. Решение задачи автоматического регулирования процесса очистки зерна и, в частности, его пневмосепарирования на современных воздушно-ситовых сепараторах создает условия для более полного использования зерна и включения этого процесса в систему автоматического управления. Все это несомненно приведет к улучшению технико-экономических показателей работы элеватора.

Предпосылкой к автоматизации пневмосепарирующих устройств служат исследования их технологических режимов, составление математической модели процесса, разработка датчиков качества продуктов сепарирования и режимов работы.

Представленная работа отражает проведенные производственные технологические испытания действующего серийно выпускаемого воздушно-ситового сепаратора модели ЗСМ-50, являющегося наиболее производительным и типичным представителем зерноочистительного оборудования в мукомольно-элеваторной промышленности; научно-теоретическое изучение процесса и обоснование математико-статистического метода исследования; экспериментальное исследование и составление математической модели процесса, в результате чего были разработаны технические рекомендации для конструирования вертикальных прямоугольных пневмосепарирующих каналов, для составления алгоритма оптимального управления процессом и для разработки систем автоматического регулирования.

Работа содержит 205 страниц машинописного текста, 27 рисунков, 11 таблиц и состоит из введения, пяти глав, общих выводов и рекомендаций, библиографии и приложений.

## I. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

Сепарирование зерновых смесей на пневматической основе в элеваторной и мукомольной промышленности основано на различной способности частиц материала оказывать противодействие воздушному потоку при их относительном движении. Действия сил сопротивления воздушной среды сыпучему телу настолько сложны и зависят от столь большого количества факторов, что они до сих пор не нашли полного аналитического описания. К тому же при очистке сыпучих продуктов встречаются с большим разнообразием их компонентов, а следовательно, и их физико-технологических свойств, которые не поддаются еще обобщающему аналитическому выражению. Все это обусловило доминирующую роль эмпирических методов исследования пневматического сепарирования сыпучих смесей.

В практике обогащения полезных ископаемых многие авторы (П. В. Лященко, Т. Г. Фоменко, Г. А. Адамов и другие) занимались определением величин сил сопротивления среды для частиц различной формы и скоростей падения зерен минералов в неограниченном и в ограниченном пространствах. Каждый автор исследовал отдельные стороны общей проблемы взаимодействия частиц со средой, в результате чего были получены лишь частные зависимости, которые не могут охарактеризовать процесс в целом для всего многообразия твердых частиц и различных аэродинамических режимов. Формулы, оценивающие величину конечной скорости падения частиц, предложенные указанными авторами, включают ста-

тистические величины, имеющие определенные законы распределения. При реальном использовании этих формул оперируют лишь статистиками положения без учета показателей рассеяния. Это вносит неудовлетворительную сходимост ь аналитических и опытных результатов исследований. Кроме того, при определении сил сопротивления частиц возникают трудности, вызванные разнообразием форм частиц и переменным положением их оси относительно вектора скорости воздушного потока.

Учитывая вышесказанное, аэродинамические свойства частиц и возможность разделения сыпучей смеси оценивают другим показателем — скоростью витания  $V_{\text{вн}}$ . Определением аэродинамических свойств частиц занимались И. Гастерштадт, М. А. Дементьев, И. Л. Безручкин, К. В. Дрогалин, А. М. Дзядзио, А. С. Кеммер, Г. Ф. Костюк, А. А. Вайнберг и другие. А. М. Дементьев установил, что пневмосепарирование зерновых смесей реализуется на базе аэродинамических свойств зерен, а не на различии весов тяжелых и легких зерен. И. П. Безручкин определил, что аэродинамические свойства зерен зависят от режима воздушного потока, характеризуемого числом Рейнольдса  $Re$ , и что в вертикальном канале достигается более высокий эффект разделения, чем при наклонном и горизонтальном воздушных потоках. А. М. Дзядзио, А. С. Кеммер и Г. Ф. Костюк установили эмпирические зависимости  $V_{\text{вн}}$  частиц, находящихся как в свободных, так и стесненных условиях, от симплекса  $d/D$ , где  $d$  и  $D$  — эквивалентные диаметры соответственно частицы и воздушного потока, и от концентрации частиц, находящихся в канале. А. А. Вайнберг использовал способ определения  $V_{\text{вн}}$  с учетом развитости поверхности вегетативных частей растений.

Изучением поведения частиц в воздушном потоке и определением скорости их движения занимались П. Н. Платонов, Г. Н. Худяков, З. Р. Горбис, И. Г. Плит и другие. Г. Н. Худяковым, в частности, установлено, что частицы в воздушном потоке приобретают вращательное движение, резко изменяющее характер обтекания частиц воздухом. Основными факторами, вызывающими вращение частиц, являются: неправильная форма частиц, условия ввода их в воздушный поток и периодическое касание частицей стенки трубки или соударения частиц между собой; вращающийся момент создается воздушным потоком вследствие различия местных скоростей по его сечению.

Из рассмотрения результатов ряда теоретических и экспериментальных исследований процесса разделения зерновых смесей воздушным потоком (Г. Д. Терскова, А. И. Лурье, В. С. Пальцева, А. Я. Малиса, А. Р. Демидова, М. Н. Летошнев, В. В. Боцманова, М. А. Валуйского, Н. Н. Ульриха,

Б. М. Максимчука, А. С. Матвеева, В. Р. Крауспа, С. С. Шклярова, В. А. Князева и других) следует, что на эффективность работы пневмосепарирующего устройства влияют его конструктивные параметры, аэродинамические свойства сепарируемых зерновых смесей, загрузочный и воздушный режимы.

В работах Е. А. Непомнящего, М. Д. Барского, Ю. В. Соколкина вопросы разделения сыпучих смесей рассмотрены как стохастический процесс. Стохастические модели процесса гравитационной классификации сыпучей массы, полученные М. Д. Барским и Ю. В. Соколкиным, хотя и позволяющие вычислить долю частиц, составляющих полученные в результате разделения фракции, однако вследствие большого количества упрощающих допущений не могут быть использованы при управлении конкретным технологическим процессом разделения.

Несмотря на значительное количество теоретических и прикладных работ, проведенных в СССР и за рубежом, физическая сущность процесса пневмосепарирования сыпучих смесей и его математическое описание полностью не раскрыты. Изучение процесса по упрощенной схеме, т. е. движения отдельной зерновки по вертикальному направлению в воздушной среде, не позволяет определить важные характеристики процесса, используемые как при технологических расчетах, так и при оптимальном управлении этим процессом. При аналитическом изучении движения массы частиц учет влияния всех факторов на процесс затруднителен, поэтому принимаемые в этом случае допущения позволяют получить лишь зависимость, которые способствуют более полному представлению о качественной стороне процесса пневмосепарирования сыпучих смесей, но требуют уточнения в практике.

Обзор 80 типов конструктивно-технологических схем воздушных и воздушно-ситовых зерноочистительных сепараторов отечественного и зарубежного производства показал, что 85% рассмотренных пневмосепарирующих устройств содержат каналы прямоугольной формы (вертикальные, изогнутые, наклонные, с постоянной или переменной по высоте площадью сечения). При этом серийно выпускаемый воздушно-ситовой сепаратор модели ЗСМ-50 и подготавливаемый к серийному выпуску сепаратор модели ЗС-50 также снабжены вертикальными пневмосепарирующими каналами прямоугольной формы.

Вопросам контроля и регулирования воздушного потока в каналах посвящены исследования авторов А. В. Панченко, В. С. Пальцева, А. М. Дзядзио, Л. И. Котляра, В. В. Дорошевского, А. Т. Птушкина, А. С. Матвеева, В. Р. Крауспа и других. Однако существующие способы автоматического

регулирования расхода воздуха в пневмосепарирующем канале не нашли широкого применения.

Рассмотрение выполненных научно-исследовательских работ в области пневмосепарирования зерновых смесей и изучение технического уровня отечественной и зарубежной техники и тенденций ее развития, а также анализ патентно-информационных материалов позволили сделать вывод о том, что пневмосепарирование является одним из основных технологических процессов в мукомольно-элеваторной промышленности и смежных отраслях промышленности, но этот процесс до сих пор не автоматизирован ни в отечественной, ни в зарубежной практике.

Целью настоящей работы явилась разработка предпосылок для разработки системы автоматического регулирования процесса пневмосепарирования зерновых смесей в вертикальных каналах прямоугольной формы: выявление факторов, существенно влияющих на эффективность пневмосепарирования, составление обобщенной математической модели процесса с учетом конструктивных и технологических параметров, разработка алгоритма оптимального управления процессом и структурных схем автоматизации, определение динамических параметров пневмосепарирующего устройства.

## II. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ ПНЕВМОСЕПАРИРУЮЩЕГО КОМПЛЕКТА ЗЕРНООЧИСТИТЕЛЬНОГО СЕПАРАТОРА МОДЕЛИ ЗСМ-50

Производственные испытания питающего и пневмосепарирующих устройств зерноочистительного сепаратора модели ЗСМ-50, проведенные на элеваторе комбината хлебопродуктов № 1 в г. Одессе, ставили своей целью определить конструктивно-технологические возможности сепаратора как объекта автоматизации.

Задачами исследования являлись:

— экспериментальное изучение воздушного режима в пневмосепарирующих каналах и определение пространственного поля (рельефа) скоростей воздушного потока;

— определение зависимости технологической эффективности пневмосепарирования от аэродинамического режима и условий загрузки пневмосепарирующего канала в связи с физико-технологическими свойствами обрабатываемого продукта;

— экспериментальное изучение условий загрузки пневмосепарирующего устройства, т. е. исследование питателя как

приемо-распределительного и загрузочно-дозировочного устройства.

Исследования проведены на производственно-экспериментальном стенде, созданном на базе сепаратора модели ЗСМ-50.

Изменение подачи зерна контролировалось расходомерами типа РВД 2×10, настроенными на суммарную зерновую нагрузку 60 т/час.

Величины местных скоростей воздушного потока в двух сечениях первого канала и в четырех сечениях второго канала измеряли комбинированной пневмометрической трубкой и микроманометром, при этом измерение динамических давлений в одном из исследуемых каналов производили при отключенном втором канале. Пневмометрическая трубка предварительно тарировалась по круговому коллектору. Статистическую оценку скоростного режима воздушного потока в контролируемых сечениях пневмосепарирующих каналов проводили посредством осредненных величин скорости воздушного потока  $V_{cp}$  и показателей рассеяния опытных значений скорости — среднеквадратического отклонения  $\sigma$  и коэффициента вариации  $\Phi = \frac{\sigma}{V_{cp}} \cdot 100\%$ .

Опыты проводились с пшеницей влажностью  $16 \pm 1\%$ , содержащей до 2,0% аэродинамически легких примесей.

Для оценки и сопоставления технологических результатов пневмосепарирования, в зависимости от условий загрузки и аэродинамического режима сепаратора, выбраны следующие показатели: удельная зерновая нагрузка, эффективность и четкость сепарирования. Последние два показателя определяли методом предельного пневмосепарирования исходного и неценного зерна на лабораторном пневмокласификаторе, созданном в ОТИ им. М. В. Ломоносова.

Варьирование аэродинамического режима проводили при ступенчатом изменении расхода воздуха в каналах в пределах 35—130 м<sup>3</sup>/мин и удельной нагрузке 0; 250 и 300 кг/час·см.

По статистически обработанным результатам измерений были построены рельефы скоростей воздушного потока в каждом из сечений первого и второго пневмосепарирующих каналов при различных аэродинамических режимах пневмосепарирования.

Степень неравномерности загрузки первого пневмосепарирующего канала в зависимости от производительности сепаратора определяли при помощи поддона с шестью продольными перегородками, вдвигаемого в момент опыта по приемному решету под канал.

Экспериментально установлено, что питатель сепаратора модели ЗСМ-50 не обеспечивает непрерывную и равномер-

ную подачу зерна по ширине пневмосепарирующего канала. С увеличением общей подачи зерна на сепаратор с 17,5 до 42,5 т/час конфигурация эпюры зерновой нагрузки по ширине приемного фронта первого канала сохраняется, но коэффициент вариации снижается и равен соответственно 16,6 и 12,4%.

Неравномерность воздушного потока, оцениваемая коэффициентом вариации  $\Phi$ , повышается с увеличением зерновой нагрузки. По высоте пневмосепарирующих каналов (по мере удаления от места ввода продукта) неравномерность воздушного потока уменьшается, что особенно наглядно прослеживается во втором канале, где, например, неравномерность воздушного потока при удельной зерновой нагрузке, равной 250 кг/час·см, уменьшается с  $\Phi = 40,7\%$  до  $\Phi = 10,0\%$ . Изменение  $V_{cp}$  практически не влияет на неравномерность воздушного потока в канале.

Анализируя результаты технологических испытаний, можно сделать вывод, что эффективность сепарирования находится в прямой зависимости от  $V_{cp}$ . Оптимальное значение  $V_{cp}$ , которое обеспечивает максимальное выделение примесей при потерях нормального зерна в отходах не более 2%, равно 4 м/сек (при принятом качестве зерна и удельной зерновой нагрузке  $q_v = 250$  кг/час·см). Увеличение зерновой нагрузки снижает разделяющую способность пневмосепарирующих устройств сепаратора. В испытаниях эксплуатационная производительность сепаратора не превышала 40—45 т/час с учетом возможной очистки на ситах и пневмоканалах. Паспортную эксплуатационную производительность сепаратора 50 т/час в реально складывающихся условиях достичь не удалось.

Рассмотрение результатов технологических и аэродинамических испытаний сепаратора ЗСМ-50, как возможного объекта автоматизации, позволило сделать следующие выводы:

1. Факторами, существенно влияющими на эффективность процесса пневмосепарирования, являются: величина удельной зерновой нагрузки  $q_v$  [кг/час·см], величина средней скорости воздушного потока  $V_{cp}$  [м/сек], размеры пневмосепарирующего канала и начальная скорость частиц продукта на входе в канал  $\omega_0$  [м/сек]. При этом априорно считается, что масса продукта равномерно подается по ширине приемного фронта пневмосепарирующего канала.

2. Конструкция существующего питателя не обеспечивает равномерной подачи продукта в пневмосепарирующий канал, разрушения динамических сводов в приемном бункере, оптимальных кинематических условий ввода частиц продукта в зону сепарирования, не создает зернового затвора, препятствующего подосу воздуха в канал из питателя. Все это в зна-

чительной степени обуславливает неравномерность скорости воздушного потока в каналах и тем самым снижает эффект очистки.

3. Конструкция пневмосепарирующих комплексов сепаратора модели ЗСМ-50 не обеспечивает высокоэффективное сепарирование зерновых смесей (эффективность очистки не превышала 70%).

4. Автоматизация процесса пневмосепарирования на базе конструкции сепаратора модели ЗСМ-50 нецелесообразна; необходима разработка технически рациональной конструкции питающего устройства и пневмосепарирующего комплекта.

### III. ОБОСНОВАНИЕ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧЕСКОГО МЕТОДА ИССЛЕДОВАНИЯ

Сложность и недостаточная изученность физических и аэродинамических явлений, имеющих место при пневмосепарировании, не позволяют на современном этапе получить аналитическими методами достаточно полное математическое описание, необходимое для автоматизации этого процесса. В таких ситуациях важное значение приобретают математико-статистические методы исследования, позволяющие составить математическое описание с использованием самого объекта исследования в качестве оператора.

Рассматриваются основные направления развития современных математико-статистических методов исследования технологических процессов, проводится краткий обзор основных теоретических и прикладных работ по планированию эксперимента, опубликованных в СССР и за рубежом, указаны преимущества метода многофакторного планирования эксперимента перед пассивным и классическим методами планирования экспериментальных исследований.

Приведены теоретические предпосылки использования метода многофакторного планирования эксперимента и математической обработки получаемых результатов при исследовании пневмосепарирования зерновых смесей.

Из обзора литературных источников по использованию многофакторного планирования эксперимента в химической, металлургической и горно-обогатительной промышленности следует, что многофакторное планирование эксперимента является наиболее эффективным методом исследования сложного технологического процесса, позволяющим при минимальных временных и материальных затратах на эксперимент получить математическую модель, по которой представляется возможность определить оптимальный режим изучаемого про-

цесса. Однако до настоящего времени этот метод не получил широкого распространения при проведении исследований в мукомольно-элеваторной промышленности. Последнее объясняется новизной самих методов исследования, спецификой технологических процессов в этой отрасли, повышенными требованиями, предъявляемыми к техническому совершенствованию экспериментальной установки, методической отработке проведения опытов и последующей математической обработке результатов экспериментов.

Необходимым условием при исследовании пневмосепарирования зерновых смесей с целью его автоматизации является выбор критерия оптимизации, обуславливающего не только точность постановки конкретной задачи, но и быстроту и экономичность ее решения. Из всего многообразия критериев разделения (технологических, экономических, энергетических, кинематических, статистических и других), исходя из требований, предъявляемых к ним как при исследовании технологического процесса, так и его автоматического управления (Г. Х. Гуд, Р. З. Макол), при исследовании пневмосепарирования зерновых смесей выбраны технологические критерии разделения. Обзор технологических критериев разделения, используемых в горно-обогатительной, мукомольно-элеваторной промышленности, сельском хозяйстве и других отраслях, позволил выбрать следующие параметры оптимизации:

эффективность сепарирования

$$y_1 = \left(1 - \frac{Ab_1}{Qb_0}\right) \cdot 100\%; \quad (1)$$

четкость сепарирования

$$y_2 = \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{b_2}{a_2}}\right) \cdot 100\%. \quad (2)$$

где  $A$  — количество очищенного продукта (ценная фракция), кг;  $b_1, a_2$  — доля <sup>ценного и</sup> ценного компонента соответственно в очищенном продукте и аспирационных отходах;  $Q$  — количество исходного продукта, кг;  $b_0, b_2$  — доля неценного компонента соответственно в исходном продукте и аспирационных отходах.

При этом, с точки зрения цели, т. е. максимального выделения из зерновой смеси аэродинамически легких примесей, более важным является первый параметр оптимизации. Показатель четкости сепарирования, а также величину удельной зерновой нагрузки и величину расхода воздуха учитывали при определении оптимального режима сепарирования исходной зерновой смеси.

Вся совокупность факторов, воздействующих на процесс пневмосепарирования сыпучих смесей (рис. 1), на основании производственных испытаний сепаратора модели ЗСМ-50 и литературных источников классифицирована на:

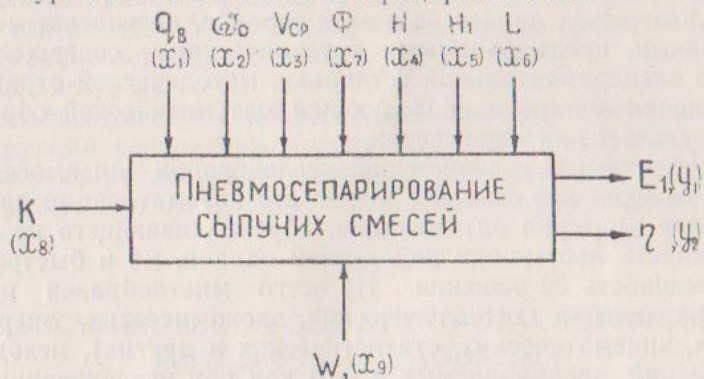


Рис. 1. Структурная схема.

— управляющие воздействия:  $q_B$ , ( $x_1$ ) — величина удельной зерновой нагрузки,  $кг/час \cdot см$ ;  $\omega_0$ , ( $x_2$ ) — начальная скорость частиц сепарируемой зерновой смеси,  $м/сек$ ;  $V_{cp}$ , ( $x_3$ ) — величина осредненной по сечению пневмосепарирующего канала скорости воздушного потока,  $м/сек$ ;  $\Phi$ , ( $x_7$ ) — равномерность воздушного потока в канале, %;

— контролируемый входной параметр  $K$ , ( $x_8$ ) — количество аэродинамически легких примесей в исходной зерновой смеси, %;

— конструктивные параметры:  $H$ , ( $x_4$ ) — высота верхней части канала,  $мм$ ;  $H_1$ , ( $x_5$ ) — высота нижней части канала,  $мм$ ;  $L$ , ( $x_6$ ) — глубина канала,  $мм$ ;

— неконтролируемые возмущающие воздействия  $W$ , ( $x_9$ ).

Учитывая требования, предъявляемые к факторам при многофакторном планировании эксперимента (Ю. П. Адлер), в качестве независимых факторов, определяющих протекание пневмосепарирования зерновых смесей, выбраны:  $q_B$ , ( $x_1$ );  $\omega_0$ , ( $x_2$ );  $V_{cp}$ , ( $x_3$ );  $H$ , ( $x_4$ );  $H_1$ , ( $x_5$ );  $L$ , ( $x_6$ );  $K$ , ( $x_8$ ).

#### IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПНЕВМОСЕПАРИРОВАНИЯ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ В ПРЯМОУГОЛЬНЫХ КАНАЛАХ И СОСТАВЛЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССА ДЛЯ РАЗРАБОТКИ АЛГОРИТМА ЕГО УПРАВЛЕНИЯ

1. Исследование пневмосепарирования проведено на экспериментальной установке полупромышленного типа (рис. 2),

являющейся физической моделью пневмосепарирующего комплекта зерноочистительного сепаратора модели ЗСМ-50.

Пуск, регулирование и остановка всех механизмов установки осуществлены с общего щита управления.

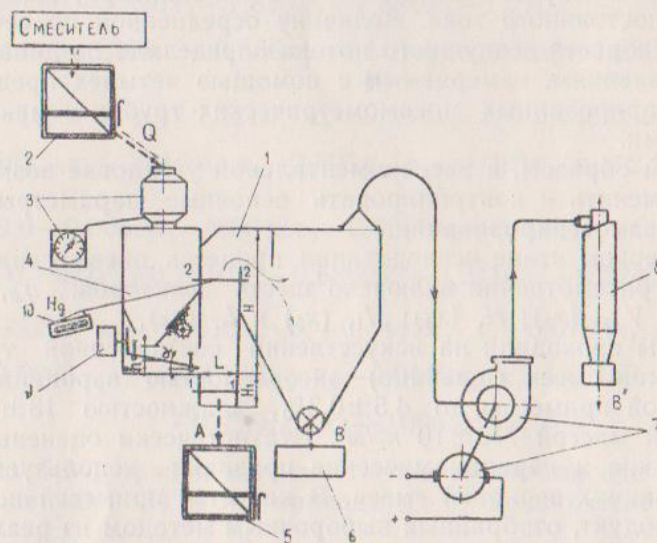


Рис. 2. Схема экспериментальной пневмосепарирующей установки:

1 — пневмосепарирующий канал с относосоаждующей камерой; 2 — емкость для исходной зерновой смеси (до 400 кг); 3 — расходомер РВД 2×10 с ЭПИД-04; 4 — вибрационный лотковый питатель; 5 — емкость для очищенного продукта; 6 — емкость для аэродинамически легких отходов; 7 — вентилятор типа СД-5 с приводом постоянного тока типа ПН-4,5; 8 — циклон; 9 — электромагнитный привод лотка; 10 — микроманометры типа ТНЖ-Н.

В экспериментальной установке применен бункерный вибрационный лотковый питатель с электромагнитным колебательем с параметрами: частота и амплитуда колебаний соответственно 42 гц и 0,75 мм. Конструкция питателя позволяет изменять независимо друг от друга величину удельной зерновой нагрузки  $q_B$  от 0 до 450  $кг/час \cdot см$  и начальную скорость частиц сепарируемой зерновой смеси  $\omega_0$  от 0 до 1,0  $м/сек$  путем изменения величины зазора выпускной щели  $h$  и угла наклона лотка к горизонту  $\alpha$ .

Расход зерновой смеси через питатель в установившемся режиме определяли посредством расходомера типа РВД 2×10 с ЭПИД-04 и отбора временных проб на выходе из питателя.

Начальную скорость частиц сепарируемой зерновой смеси оценивали посредством скоростной киносъемки (камерой

СКС-1М со скоростью 800 кадров в секунду) процесса истечения зерновой смеси из виброточка питателя в неподвижную воздушную среду при различных нагрузках.

Общий расход воздуха в канале регулировали изменением числа оборотов центробежного вентилятора, имеющего привод постоянного тока. Величину осредненной по сечению канала скорости воздушного потока определяли по динамическим давлениям, измеряемым с помощью четырех предварительно тарированных пневмометрических трубок с микроанометрами.

Таким образом, в экспериментальной установке возможно было изменять и контролировать основные параметры процесса пневмосепарирования.

На первом этапе исследования процесса пневмосепарирования в рассмотрение включено шесть факторов:  $q_B$ , ( $x_1$ );  $\omega_0$ , ( $x_2$ );  $V_{cp}$ , ( $x_3$ );  $H$ , ( $x_4$ );  $H_1$ , ( $x_5$ ) и  $L$ , ( $x_6$ ).

Опыты проводили на искусственно составленной трудно разделяемой смеси (пшенице) засоренностью аэродинамически легкой примесью до  $4,5 \pm 0,3\%$ , влажностью  $13 \pm 1\%$  и объемной массой  $710 \pm 10 \text{ кг/м}^3$ . Статистически оценены геометрические и аэродинамические признаки используемой в исследованиях зерновой смеси. В качестве примесей использован продукт, отобранный выборочным методом из реальных отходов пневмосепарирующих устройств воздушно-ситовых сепараторов, работающих в условиях мельничного элеватора.

Оценку результатов разделения проводили методом предельного пневмосепарирования исходного и конечных продуктов на лабораторном пневмокласификаторе, используя формулы (1) и (2).

Для получения линейной модели процесса реализована  $1/4$  реплики от полного факторного эксперимента (ПФЭ) типа  $2^k$ , где  $k=6$  — число факторов. Опыты пятикратно дублировали ( $\gamma=5$ ) и проводили в случайном порядке. Статистическая оценка полученных результатов включала: проверку на равнозначность опытов (по критерию Кохрена), определение значимости полученных коэффициентов линейной части ряда Тэйлора (по критерию Стьюдента) и проверку адекватности полученных моделей (по критерию Фишера). Значимые коэффициенты включены в уравнения аппроксимации, имеющие вид:

$$y_1 = 44,8 - 5,43x_1 - 3,63x_2 + 12,34x_3 - 13,64x_4 + 4,11x_6; \quad (3)$$

$$y_2 = 99,2 - 0,21x_2 - 0,71x_3 - 0,27x_5 + 0,42x_6. \quad (4)$$

Так как представление процесса уравнениями (3) и (4) оказалось неадекватным, то на втором этапе исследования реализована схема ротатбельного центрального композиционного планирования (РЦКП), состоящая из полуреплики от

полного факторного эксперимента типа  $2^5$ , 10 «звездных» точек и 6 центральных точек. Общее число точек  $N=32$ .

По результатам экспериментов получены уравнения 2-го порядка:

$$\begin{aligned} y_1 = & 85,0 - 1,890x_1 + 1,820x_2 + 7,390x_3 - 1,270x_4 - 2,590x_6 - \\ & - 1,464x_1^2 - 4,156x_2^2 - 0,466x_3^2 - 0,112x_4^2 - 0,908x_6^2 + 1,283x_1 \cdot x_2 - \\ & - 0,587x_1 \cdot x_3 + 0,221x_1 \cdot x_4 - 0,284x_1 \cdot x_6 + 0,158x_2 \cdot x_3 + \\ & + 0,689x_2 \cdot x_4 + 3,216x_2 \cdot x_6 - 0,803x_3 \cdot x_4 - 0,019x_3 \cdot x_6 - 2,218x_4 \cdot x_6; \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} y_2 = & 99,0 - 0,0042x_1 - 0,0042x_2 - 0,6958x_3 - 0,0042x_4 + 0,0375x_6 + \\ & + 0,1990x_1^2 + 0,1610x_2^2 - 0,6860x_3^2 + 0,2110x_4^2 + 0,2240x_6^2 - \\ & - 0,0063x_1 \cdot x_2 - 0,0063x_1 \cdot x_3 + 0,0442x_1 \cdot x_4 + 0,0189x_1 \cdot x_6 + \\ & + 0,0063x_2 \cdot x_3 - 0,0189x_2 \cdot x_4 - 0,0442x_2 \cdot x_6 - 0,0189x_3 \cdot x_4 + \\ & + 0,0568x_3 \cdot x_6 + 0,0063x_4 \cdot x_6. \end{aligned} \quad (6)$$

Для 5,0% уровня значимости оба уравнения адекватны.

Уравнения (5) и (6) приведены к каноническому виду

$$y - y_s = \sum_{i=1}^3 B_{ii} X_i^2 \quad (i=1, 2, 3, 4, 6), \text{ что соответствует переносу}$$

начала координат в особую точку поверхности (центр фигуры) и повороту координатных осей до совмещения их с осями поверхности. Для нахождения характеристических полиномов использован метод А. М. Данилевского; решение полинома проведено на ЭЦВМ «Промінь» методом итерации. Установлено, что рассматриваемые поверхности относятся к типу «минимакс». Найдены выражения для новой системы координат.

Из сравнения уравнений (5) и (6) сделан вывод о различной степени влияния одних и тех же факторов на  $y_1$  и  $y_2$ .

На основании полученных зависимостей построены графики зависимости эффективности  $y_1$  и четкости сепарирования  $y_2$  от рассматриваемых факторов:  $y_1 = f_1(x_1)$ ;  $y_1 = f_2(x_2)$ ;  $y_1 = f_3(x_3)$ ;  $y_1 = f_4(x_4)$ ;  $y_1 = f_5(x_6)$  и  $y_2 = \varphi_1(x_1)$ ;  $y_2 = \varphi_2(x_2)$ ;  $y_2 = \varphi_3(x_3)$ ;  $y_2 = \varphi_4(x_4)$  и  $y_2 = \varphi_5(x_6)$ . Из рассмотрения этих графиков следует, что наибольшее влияние на процесс пневмосепарирования оказывает величина скорости воздушного потока в канале (фактор  $x_3$ ). Эффективность сепарирования находится в прямой зависимости от  $V_{cp}$ .

Установлено, что только один показатель, определяемый по формуле Г. В. и В. Г. Ньютонов, не может характеризовать процесс разделения и его следует применять в сочетании с показателем  $y_2$ .



Таблица

№ п. п.	Удельная зерновая нагрузка, кг/час·см	Начальная скорость частиц, м/сек	Скорость воздушного потока, м/сек	Концентрация аэродинамических отходов, %	Эффект сепарирования, %		Ошибки		Четкость сепарирования, %		Ошибки	
					$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$y_{1p}$ (экспериментальный)	$y_{1p}$ (расчетный)	$\Delta$	$\frac{\Delta}{y_{1p}} \cdot 100\%$
1	120	0,57	7,3	1,34	75,40	73,24	+2,16	+2,90	97,30	97,87	-0,60	-0,60
2	170	0,47	6,5	3,35	76,20	73,52	+2,68	+3,60	99,10	99,49	-0,39	-0,40
3	150	0,57	7,0	2,36	72,80	76,24	-3,74	-5,10	93,20	98,76	-0,56	-0,57
4	170	0,53	7,0	4,38	80,00	83,00	-3,00	-3,70	99,40	99,00	+0,40	+0,40
5	160	0,47	6,3	2,36	74,20	69,10	+5,10	+6,90	99,80	99,52	+0,28	+0,29
6	140	0,53	7,1	3,35	85,10	80,00	+5,10	+6,00	98,90	98,54	+0,36	+0,36
7	150	0,55	6,8	2,80	75,40	76,13	-0,73	-1,00	98,70	99,03	-0,33	-0,34

факторов (например, управляющих воздействий); изменение факторов производится пропорционально их значимости с помощью коэффициента пропорциональности  $\Delta$ , определяемого по данным уравнения (11).

Указанная методика является основной для составления алгоритма управления процессом пневмосепарирования зерновых смесей.

## V. ПРЕДПОСЫЛКИ РЕАЛИЗАЦИИ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПНЕВМОСЕПАРИРОВАНИЕМ ЗЕРНОВЫХ СМЕСЕЙ

Показано, что случайное изменение удельной зерновой нагрузки  $q_B$  и концентрации аэродинамически легких примесей  $K$  в сепарируемой зерновой смеси может быть компенсировано изменением в ограниченных пределах осредненной по сечению канала скорости  $V_{cp}$  воздушного потока либо начальной скорости  $\omega_0$  частиц сепарируемой зерновой смеси. При этом эффективность сепарирования должна быть наиболее приемлемой с технологических, экономических и энергетических позиций.

Используя уравнение (11) и (12), на ЭЦВМ «Раздан-2» вычислен максимум функции  $y_1$  для различных сочетаний дискретных (фиксированных) значений  $q_B$  (120—180 кг/час·см) и  $K$  (1,34—5,46%), ряда заданных значений четкости сепарирования  $y_2$  (100,0; 99,5; 99,0; 98,5; 98,0%) и для  $V_{cp}$  и  $\omega_0$ , варьируемых в пределах  $6,1 \text{ м/сек} \leq V_{cp} \leq 7,3 \text{ м/сек}$ ;  $0,47 \text{ м/сек} \leq \omega_0 \leq 0,57 \text{ м/сек}$ .

В результате проведенных вычислений определены оптимальные статические зависимости (рис. 3) между исследуемыми факторами и технологической эффективностью пневмосепарирования зерновых смесей. Сравнивая зависимости рис. 3,а для  $y_2=99,5\%$ , видно, что во втором случае эффект очистки больше, чем в первом на (1,3—2,3)%. Однако при четкости сепарирования  $y_2=99,5\%$  оптимальный технологический режим пневмосепарирования можно получить при значительно большем значении удельной зерновой нагрузки ( $q_B=180 \text{ кг/час·см}$ ) и меньшей скорости воздушного потока в канале ( $V_{cp} \cong 6,4 \text{ м/сек}$ ), что обуславливает повышение экономических показателей процесса.

Предложенные зависимости рис. 3 являются графическим алгоритмом управления пневмосепарированием зерновых смесей.

Из рассмотрения уравнений (11), (12) и графиков рис. 3 следует, что при стабилизации загрузочного режима ( $q_B$  и  $\omega_0$ ) возмущения на систему можно компенсировать измене-

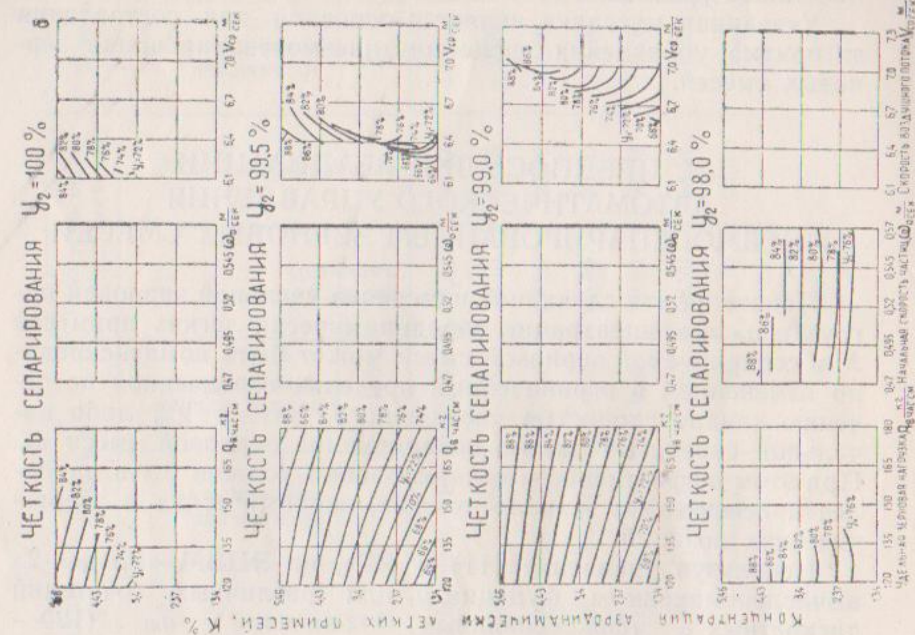
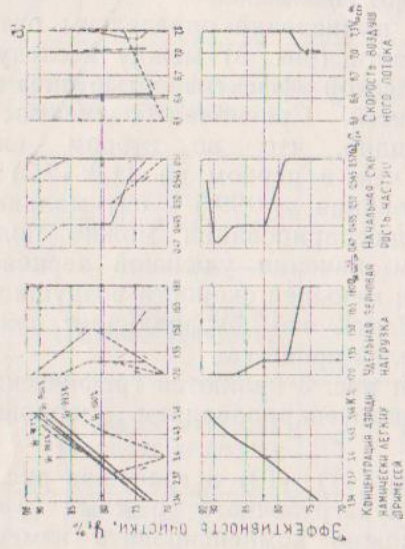


Рис. 3. Статистические характеристики пневмосепарирования зерновых смесей: а — при возмущении по концентрации аэродинамически легких примесей; б — при одновременном возмущении по зерновой нагрузке и концентрации аэродинамически легких примесей.



нием воздушного режима в пневмосепарирующем канале, поддерживая граничную четкость аэродинамически легких отходов (до 2,0% нормального зерна в отходах). В этом случае пневмосепарирование зерновых смесей будет соответствовать оптимуму. На этом основании предложена структурная схема автоматического регулирования процесса пневмосепарирования зерновых смесей, показанная на рис. 4. Показано,

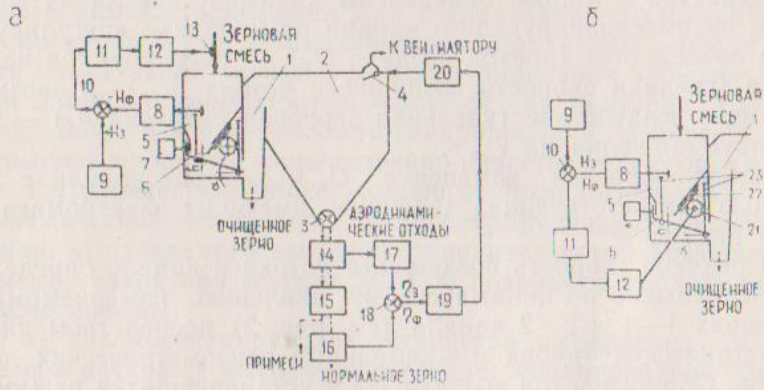


Рис. 4. Структурные схемы автоматизации процесса пневмосепарирования зерновых смесей: 1 — пневмосепарирующий канал; 2 — относосоадающая камера; 3 — шлюзовый затвор; 4 — заслонка дроссельная; 5 — коробка питателя; 6 — лоток; 7 — вибропривод; 8 — датчик уровня; 9 — задатчик; 10, 18 — сравнивающие устройства; 11, 19 — регулирующие устройства; 12, 20 — исполнительные элементы; 13 — шибер; 14, 16 — расходомеры; 15 — контрольный разделитель; 17 — делитель; 21 — задвижка; 22 — шестерня; 23 — тяга.

что в зависимости от различных условий работы питающих устройств пневмосепарирующих каналов стабильный уровень зерновой смеси в бункере питателя необходимо поддерживать путем стабилизации подачи зерновой смеси в питатель (рис. 4,а) или изменением расхода зерновой смеси на выходе из питателя (рис. 4,б). Реализация схемы рис. 4,б может привести к увеличению производительности пневмосепаратора и сопровождаться уменьшением эффекта очистки процесса до 5%.

Показано, что при определении динамических параметров бункерного вибродаточного питателя для сыпучего продукта необходимо учитывать влияние перепада давления, возникающего при истечении продукта из питателя в среду, находящуюся под разрежением.

Для реализации предложенных систем автоматического регулирования, направленных на интенсификацию пневмосе-

парирования зерновых смесей, необходимо располагать динамическими характеристиками пневмосепарирующего канала, статическими и динамическими характеристиками конкретной конструкции питающего устройства вибрационного типа и воздушного классификатора непрерывного действия для аэродинамически легких примесей.

Принимая предположение о линейности динамических характеристик в малом, определены динамические характеристики пневмосепарирующего канала по каналам: «регулирующее воздействие (расход воздуха  $Q_v$ ) — регулируемая величина (средняя скорость воздушного потока  $V_{cp}$ )» и «возмущающее воздействие (удельная зерновая нагрузка  $q_v$ ) — регулируемая величина  $V_{cp}$ ».

Скачкообразное изменение  $Q_v$  и  $q_v$  производили с помощью соответствующих задвижек, имеющих электромагнитный привод.

Среднюю скорость воздушного потока в канале определяли непрерывно по динамическому давлению, измеряемому в сечениях 1—1 и 2—2 канала (см. рис. 2) посредством пневмометрических трубок и мембранных тензометрических датчиков. Общий расход воздуха  $Q_v$  в установившихся режимах определяли посредством пневмометрических трубок с микроманометрами, установленных в сечении 3—3.

Обработка кривых переходного процесса проведена методом «площадей», предложенным М. П. Симою. Ошибка в определении средних динамических параметров  $\tau$ ;  $T$ ;  $K_{об}$  не превышала 15%. Реальные кривые переходного процесса аппроксимировали последовательно включенными звеном чисто запаздывания и звеном I порядка.

Результаты обработки кривых свидетельствуют об заметном изменении динамических свойств пневмосепарирующего устройства.

Указаны оптимальные динамические параметры по возмущающему и управляющему воздействиям, необходимые для расчета систем автоматического регулирования.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. Из рассмотрения широкого круга теоретических и прикладных работ в области пневмосепарирования сыпучих продуктов следует, что физическая сущность этого процесса и его математическое описание полностью не раскрыты, несмотря на широкое и длительное использование этого процесса в различных областях народного хозяйства. Указанное обстоятельство можно объяснить сложностью, многофакторностью этого процесса и отсутствием соответствующего аналитиче-

ского аппарата. В этой связи определенную научно-техническую и инженерно-прикладную значимость приобретает экспериментальное изучение пневмосепарирования зерновых смесей с использованием статистического метода планирования многофакторных экспериментов, позволяющего получить математическую модель процесса.

2. Из анализа критериальных оценок эффективности разделения сыпучих продуктов с учетом требований, предъявляемых к ним как критериям для исследования технологического процесса и его автоматического управления, следует, что для объективной оценки пневмосепарирования зерновых смесей наиболее приемлемыми являются два критерия:  $E_1$  — эффект очистки и  $\eta$  — четкость сепарирования, которые характеризуют процесс с количественно-качественной стороны.

3. Проведенные производственные технологические и аэродинамические испытания пневмосепарирующих устройств серийно выпускаемого высокопроизводительного воздушно-ситового сепаратора модели ЗСМ-50 позволяют сделать следующие выводы:

а) пневмосепарирующие устройства сепаратора ЗСМ-50 не обеспечивают высокоэффективное сепарирование зерновых смесей (эффект очистки не превышал 70%);

б) конструкция существующего питателя не обеспечивает равномерной подачи продукта по ширине приемного фронта пневмосепарирующего канала и оптимальных условий ввода частиц в зону сепарирования, что в значительной степени обуславливает неравномерность скорости воздушного потока в канале и тем самым снижает эффект очистки;

в) автоматизация процесса пневмосепарирования на базе несовершенной конструкции сепаратора модели ЗСМ-50 не целесообразна.

4. Анализ литературы и результаты испытания сепаратора ЗСМ-50 позволили определить существенные факторы, обуславливающие процесс пневмосепарирования зерновых смесей и удовлетворяющие требованиям статистических методов планирования эксперимента; к последним следует отнести: концентрацию аэродинамически легких отходов в исходной зерновой смеси,  $K$ ; величину осредненной по сечению канала скорости воздушного потока,  $V_{cp}$ ; равномерность воздушного потока в канале,  $\Phi$ ; начальную скорость частиц сепарируемой зерновой смеси,  $\omega_0$ ; величину удельной зерновой нагрузки,  $q_v$ ; геометрические размеры пневмосепарирующего канала: высоту верхней (от места ввода продукта) части канала,  $H$ ; высоту нижней части канала,  $H_1$  и глубину канала,  $L$ .

5. На основании экспериментального изучения процесса пневмосепарирования зерновых смесей на полупромышленной установке, моделирующей реально складывающиеся усло-

вия и режимы, получена математическая модель и алгоритмы управления процессом путем использования при исследовании метода многофакторного планирования эксперимента, позволившего выбрать оптимальную стратегию исследования при неполной информации о механизме происходящих явлений.

6. Разработаны и проверены методика определения на ЭЦВМ компромиссного оптимума по 2 параметрам оптимизации и взаимной компенсации параметров пневмосепарирования, являющаяся основой для составления алгоритма управления процессом.

7. Используя дробные реплики от полного факторного эксперимента и центральное композиционное ротатбельное планирование эксперимента, в работе получена модель II порядка для 5 факторов (удельной зерновой нагрузки, начальной скорости частиц сепарируемой зерновой смеси, осредненной по сечению канала скорости воздушного потока, высоты, верхней части канала и глубины канала), адекватно описывающая процесс (надежность оценки  $P=0,95$ ). Процесс описывается поверхностями типа «минимакс».

8. С учетом концентрации аэродинамически легких отходов в исходных зерновых смесях получена математическая модель пневмосепарирования, по которой на основании методики взаимной компенсации параметров с помощью ЭЦВМ установлены оптимальные статические характеристики процесса для различных четкостей сепарирования ( $\eta=100,0; 99,5; 99,0; 98,0\%$ ); последние являются графическим алгоритмом управления процессом пневмосепарирования.

9. По полученным моделям определены:

а) частные зависимости параметров оптимизации (эффекта очистки и четкости сепарирования) от исследуемых факторов (построены одномерные сечения типа  $y_{1,2}=f(x_j)$  и некоторые двумерные сечения типа  $y_{1,2}=\varphi(x_i, x_j)$  поверхностей отклика);

б) оптимальные конструктивные параметры пневмосепарирующих устройств с прямоугольным сечением канала: высота верхней части канала — 810 мм; высота нижней части канала — 210 мм и глубина канала — 155 мм;

в) технологические координаты оптимального режима пневмосепарирования пшеницы общей засоренностью примесями до 7% и объемной массой 710 кг/м<sup>3</sup>: величина удельной зерновой нагрузки 150 кг/час·см, начальная скорость сепарируемых частиц — 0,5 м/сек и средняя по сечению канала скорость воздушного потока — 6,8 м/сек.

10. Для найденных оптимальных конструктивных и технологических параметров пневмосепарирования эффективность очистки зерновых смесей (пшеницы) по сравнению с действующими устройствами увеличивается на 10,1%.

11. Разработана, обоснована и защищена авторским свидетельством структурная схема автоматического регулирования пневмосепарирования зерновых смесей.

12. С помощью мембранного тензометрического датчика определены динамические характеристики пневмосепарирующего канала по управляющему (изменению общего расхода воздуха) и возмущающему (изменению зерновой нагрузки на канал) воздействиям. Для расчета систем автоматического регулирования следует выбирать следующие динамические параметры:

а) по управляющему воздействию:  $K_y=7,4$  м/сек;  $\tau/T=1,5$ ;

б) по возмущающему воздействию:  $K_b=5,0$  м/сек;  $\tau/T=2,2$ .

13. Предложена методика определения динамических характеристик бункерного вибрлоткового питателя с учетом влияния перепада давления при истечении сыпучих продуктов в среду, находящуюся под разряжением.

**По теме диссертации опубликованы в соавторстве  
следующие работы:**

1. Сепаратор как объект автоматизации. Журн. «Мукомольно-элеваторная промышленность», 1967, № 8.
2. Применение метода математической статистики к исследованию процесса пневмосепарирования зерна. Сб. «Современные проблемы механики сыпучих материалов», М., ЦИНТИ Госкомзага СССР, 1969.
3. Сепаратор ЗСМ-50 для разработки системы автоматического регулирования процесса зерноочистки. Реферативная информация о законченных научно-исследовательских работах в вузах УССР (Пищевая промышленность), вып. 4, К., 1970.
4. Математическая модель пневмосепарирования зерновой смеси. Журн. «Известия вузов СССР. Пищевая технология», 1970, № 2.
5. Устройство для сортирования сыпучих материалов. Авторское свидетельство № 265600, класс 45е, 7/44. Бюллетень «Изобретения, промышленные образцы, товарные знаки». М., 1970, № 10.

**Материалы диссертации докладывались:**

1. На научных конференциях Одесского технологического института имени М. В. Ломоносова: XXIX (апрель 1967 г.), XXX (январь 1969 г.), XXXI (февраль 1970 г.).
2. На совещании при заместителе директора по научной работе ВНИИЗ, г. Москва (декабрь 1965 г.).
3. На заседании Южно-украинского семинара по технической кибернетике и автоматическому управлению (февраль 1968 г.).
4. На заседании секции оборудования и средств автоматики Центрального правления НТО мукомольной и крупяной промышленности и элеваторного хозяйства, г. Москва (июнь 1966 г.).
5. На расширенном заседании техсовета ГСКБ по комплексу машин для послеуборочной обработки зерна, г. Воронеж (февраль 1969 г.).
6. На расширенном заседании методических комиссий с участием сотрудников ВНИИ комбикормовой промышленности, г. Воронеж (февраль 1969 г.).
7. На расширенном заседании кафедры «Автоматизация производственных процессов» ОТИ им. М. В. Ломоносова (1970 г.).