

Автор ерр.

О-76

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

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

---

---

На правах рукописи

ОСТАПЧУК Николай Васильевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ И ХЛЕБОЗАВОДОВ  
МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА**

Специальность 05.18.12 — Процессы и технология пищевых  
производств

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

ОДЕССА — 1973

Автореф  
0-76

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО  
ОБРАЗОВАНИЯ УССР

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

На правах рукописи

ОСТАПЧУК Николай Васильевич

ИССЛЕДОВАНИЕ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ  
ЗЕРНОПЕРЕРАБАТЫВАЮЩИХ  
ПРЕДПРИЯТИЙ И ХЛЕБОЗАВОДОВ  
МЕТОДАМИ СИСТЕМНОГО АНАЛИЗА

Специальность 05.18.12 — Процессы и технология пищевых  
производств

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

ОНАХТ Автореф  
Исследование техноло



v018411

*е.мо.му*  
*и.к.со.ви.гу* *г.ей.но.в.ст.но.му*

*Остапчук*

29.11.732.

ОДЕССА — 1973

Работа выполнена в Одесском технологическом институте пищевой промышленности им. М. В. Ломоносова, во Всесоюзном ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательском институте зерна и продуктов его переработки (ВНИИЗ) и Всесоюзном научно-исследовательском институте хлебопекарной промышленности (ВНИИХП).

Научный консультант —  
доктор технических наук профессор **П. Н. Платонов**.

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР,  
доктор технических наук профессор **Н. П. Бусленко**,  
доктор технических наук профессор **Л. Е. Айзикович**,  
доктор технических наук профессор **Н. И. Назаров**.

Ведущая организация — Всесоюзный проектно-конструкторский и научно-исследовательский институт автоматизации пищевой промышленности «Пищепромавтоматика».

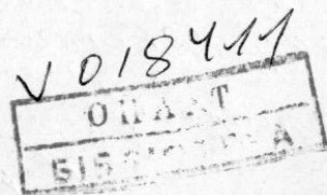
Автореферат разослан „30“ сентября 1973 г.

Защита диссертации состоится „2“ ноября 1973 г. на заседании Ученого совета Одесского технологического института пищевой промышленности имени М. В. Ломоносова.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения, просим направлять по адресу: г. Одесса, ГСП-510, ул. Свердлова, 112.

Ученый секретарь — к. т. н. **Л. Запорожец**.



В решениях XXIV съезда КПСС поставлена задача ускорить темпы научно-технического прогресса путем всемерного развития исследований в наиболее перспективных областях науки и сокращения сроков внедрения результатов научных исследований в производство. Особая роль в ускорении темпов научно-технического прогресса отводится внедрению автоматизированных систем управления.

В решении этой задачи весьма важными и перспективными являются методы системного анализа и математического моделирования, которые способствуют сокращению сроков внедрения передового опыта и достижений науки и техники в производство и значительно расширяют возможности выбора оптимальных и всесторонне обоснованных решений.

Системный анализ представляет собой способ изучения сложных систем, заключающийся в рассмотрении проблем выбора решений в условиях значительной неопределенности. При этом применяют известные принципы и новые принципы комплексного рассмотрения проблемы в целом с обязательным применением количественных оценок, учетом всех факторов, влияющих на процесс, выявлением и возможным устранением неопределенности.

Важными задачами системного анализа является установление математических соотношений между переменными, описывающими поведение систем: поиск средств описания систем, представления связи между входами и выходами в математической форме, а также поиск средств перехода от одной формы описания к другой, более целесообразной для решения поставленной задачи.

Составление математических моделей является важным и наиболее трудным этапом системного анализа. Сложности вызваны отсутствием каких-либо конкретных строго определенных рекомендаций по составлению моделей, неизученностью природы и отсутствием необходимых математических описаний многих объектов, в том числе и многих технологических процессов.

Отсутствие необходимых математических моделей серьезно сдерживает совершенствование технологических процессов, машин, аппаратов и их систем управления. Особенно важную роль играют математические модели при создании автоматизированных систем управления технологическими процессами. Математические модели позволяют представить изучаемый технологический процесс в компактном и наиболее удобном для анализа виде, выявить и изучить такие стороны процесса, которые невозможно познать традиционными методами исследования. Это в конечном счете приводит к увеличению информации и повышению эффективности управления процессами. Проблемы математического описания более эффективно решаются методами системного анализа, т. к. при этом частично формализуется сам процесс исследования, что позволяет упростить и стандартизовать процедуру составления математической модели.

Можно сказать, что системный анализ и математические модели совершенствуют технологию самого процесса исследования, т. е. способствуют интенсификации научных исследований. В связи с тем, что возможности экстенсивного развития науки ограничены, первостепенное значение должно уделяться системному анализу и математическому моделированию.

В связи с этим в настоящей работе проведено исследование некоторых различных по природе и назначению технологических процессов зерноперерабатывающих предприятий и хлебозаводов методами системного анализа с целью получения оптимальных решений для совершенствования производств и их систем управления и повышения эффективности всего производственного комплекса.

При совершенствовании систем управления технологическими процессами была предпринята попытка решить задачи без дорогостоящих автоматических средств либо с минимальным их количеством, минимальным количеством измерений и минимальным количеством точек приложения управляющих воздействий.

Исследование проведено в соответствии с основным алгоритмом исследования операций. При составлении модели, соответствующей поставленной задаче, в каждом случае был проведен анализ процесса с позиций возможности составления математического описания. При невозможности либо нецелесообразности использования имеющихся математических зависимостей был предусмотрен переход к иным формам их

представления либо осуществлялся поиск других, наиболее подходящих средств описания технологических процессов. Для тех процессов, природа которых математически не описана, были использованы методы планирования экспериментов.

В первой главе диссертации показано, что технологические процессы пищевых производств, в том числе и технологические процессы зерноперерабатывающих предприятий и хлебозаводов, как и любые другие технологические процессы, в различных отраслях промышленности характеризуются многими общими свойствами.

Технология относится к числу прикладных отраслей знания, для которых характерной чертой является переход от абстрактного мышления к практике, поэтому при разработке технологического процесса предполагается использование достижений фундаментальных наук: химии, физики, биологии, математики и др. Как всякая наука технология имеет свой предмет, методы и задачи, что в совокупности образует ее теорию.

Предметом любой технологии являются способы проведения процессов переработки сырья и полуфабрикатов в готовые изделия. Технология изучает сырье, его состав, структуру и свойства, их изменение в связи с воздействиями различных факторов в процессе переработки, влияние этих изменений на качество и выход продукции, состав, структуру и свойства готового продукта, а также принципы построения систем управления технологическими процессами и качеством продукции.

В настоящее время основными методами технологических исследований являются научно поставленный эксперимент, физическое и математическое моделирование.

Основной целью технологического процесса является получение продукта с определенными заранее заданными свойствами. В этом смысле технология может рассматриваться как содержание производственного процесса. Для достижения этой основной цели необходима система управления производством, которая должна включать в себя и систему управления качеством продукции.

Технология как наука может быть представлена, с одной стороны, как система знаний о совокупности промышленных приемов переработки исходного сырья в готовый продукт с заданными свойствами, а с другой, — как метод совершенствования технологических процессов. Важнейшей стороной метода является моделирование, позволяющее самым экономичным образом получить необходимые данные для совершенст-

ования технологических процессов, их систем контроля и управления. При совершенствовании технологии на основе использования новых научных открытий, когда техника их применения еще не отработана, значение и эффективность моделирования возрастают. В том случае, когда задача совершенствования технологического процесса может быть математически записана и является разрешимой, математическое моделирование оказывается наиболее экономным методом анализа и синтеза. К сожалению, в настоящее время создание математических моделей технологических процессов не всегда является возможным либо экономически целесообразным. Это связано не только со сложностью и многообразием технологических процессов, отсутствием подходящих математических методов, но и с недостатками самой технологии как науки.

Например, в настоящее время недостаточно разработаны методы синтеза технологических объектов, а ограниченные сроки проектирования вынуждают производить синтез при недостаточной информации. Создание математических моделей отдельных этапов технологических процессов либо достаточно полных методик их составления и анализа способствовало бы получению необходимой информации в короткие сроки комбинаторным перебором типовых моделей.

Таким образом, решение задач совершенствования технологических процессов на основе их математических моделей опирается на успехи фундаментальных наук и рациональное сочетание различных методов моделирования.

Технология как научная дисциплина решает комплексные проблемы переработки сырья в готовый продукт. Когда решение комплексных проблем не может быть получено методами одной из существующих дисциплин либо простым соединением методов различных дисциплин, и применяется системный анализ. Например, устранения неопределенности влияния различных факторов на протекание технологического процесса можно достигнуть только учетом влияния всех без исключения управляемых и неуправляемых параметров, путем более глубокого выяснения природы процесса, сбором статистических данных, изменением структуры технологического процесса, построением соответствующей системы управления и т. д. При таком подходе системный анализ является основным методом исследования технологических процессов. Поскольку системный анализ предполагает использование математических моделей, то создание базовых либо типовых

моделей, обоснование либо разработка типовых процедур их составления являются важнейшей задачей технологии как науки.

Технология пищевых производств отличается и некоторыми особенностями, заключающимися в сложной структуре сырья, неравномерностью его поступления (сезонность и пр.) и особыми требованиями к технологическому процессу, вытекающими из специфики назначения пищевого продукта. Это в свою очередь выдвигает особые требования к проектированию и ведению технологических процессов пищевых предприятий, а также к процедуре составления их математических моделей. Кроме указанных факторов, на зерноперерабатывающих предприятиях и хлебозаводах приходится учитывать такие особенности, как многократно повторяющиеся механические процессы: измельчение, разделение, перемешивание и др., а при переработке зерна в муку то, что готовый продукт получают почти на всем протяжении технологического процесса. Поэтому здесь общие принципы моделирования имеют свою специфику.

Технологические процессы хранения зерна, переработки его в муку и крупу, производство комбикормов, приготовление хлебо-булочных изделий являются взаимодействующими совокупностями элементов (машин и аппаратов), предназначенных для получения готового продукта. Они обладают сложностью структуры, характеризуются большим количеством прямых, обводных и рециркулирующих потоков и случайным характером их изменения (неопределенностью), т. е. обладают всеми свойствами сложных систем. Следовательно, и в этом случае наиболее целесообразным методом исследования является системный анализ, направленный на комплексное выявление всех факторов, оказывающих влияние на протекание технологических процессов, позволяющий установить наиболее общие формы и характер их взаимных связей и частично устранить проявляющуюся в различных формах неопределенность.

Все перечисленные комплексные технологические процессы состоят как бы из набора различных технологических операций, в большинстве случаев имеющих какие-то общие черты сходства. Например, различного рода и назначения процессы сепарирования, измельчения, дозирования, смешения и др., можно описать одинаковыми математическими уравнениями. Некоторые операции приема и отпуска можно на основе использования основных положений теории массо-

вого обслуживания представить одним видом математической модели. Операции формирования партий зерна различного назначения, формирования сортов муки, составления рецептов комбикормов и другие операции смешения можно свести к канонической форме задачи линейного программирования и т. д.

Это открывает возможности описания всех технологических процессов переработки зерна в продукты различного назначения сравнительно небольшим набором типовых математических моделей. В тех случаях, когда не удастся составить общие математические модели, можно ограничиться разработкой типовых методик составления частных моделей, основанных на экспериментальной информации.

Сочетая различным образом типовые математические модели либо типовые методики их составления, можно получить математическую модель комплексного технологического процесса, на основе которой может быть проведен сравнительный анализ различных технологических решений.

Благодаря работам советских ученых Н. П. Бусленко, А. В. Лыкова, С. С. Кутателадзе, Н. М. Жаворонкова, М. Г. Слинько, В. В. Кафарова, В. С. Бескова, П. Г. Романкова, А. И. Плановского, В. Н. Стабникова, В. В. Белобородова, С. М. Смирнова, И. М. Аношина, П. А. Кулле, Д. А. Франк-Каменецкого, Г. М. Островского, Ю. М. Волина и многих других математические методы широко применяются в химической и других отраслях промышленности.

В последнее время широкое применение этих методов стало возможным и в пищевой промышленности. В области процессов сепарирования по математическому моделированию известны работы В. Я. Белецкого, Е. А. Непомнящего, В. В. Гортинского, В. М. Цециновского, К. В. Дрогалина, Л. И. Котляра, А. А. Вайнберга, Ю. Г. Цыбулевского, Н. А. Ильвицкого, Г. В. Ветелкина, И. Т. Мерко, А. Я. Каминского. Математические модели формирования помольных партий зерна, формирования потоков муки по сортам и составления рецептов комбикормов получены П. Н. Платоновым, С. А. Солонд, В. Я. Полиновским, К. М. Унгуром, С. Е. Мамбишем, Н. Б. Гержоем, О. А. Новицким и др. Математическая модель процессов перемешивания сыпучих материалов составлена в ОТИПП им. М. В. Ломоносова под руководством П. Н. Платонова. Известны работы П. Н. Платонова, О. Д. Шумского, М. В. Гордиенко, В. М. Янко, А. И. Фукса, М. Я. Фарберовича, В. Б. Фасмана, В. Е. Комова по моделированию основ-

ных процессов функционирования элеваторов и хлебоприемных предприятий. В области сушки зерна известны работы по моделированию А. С. Гинзбурга, И. Л. Любошица, В. А. Резчикова, В. С. Уколова, В. И. Жидко, А. С. Бомко, А. Н. Фишмана, Г. С. Зелинского, Л. Д. Комышника, Г. С. Окуня, В. Р. Крауса, И. Э. Мильмана, С. Д. Птицына и др. Вопросами моделирования процессов увлажнения и гидротермической обработки зерна успешно занимаются Г. А. Егоров, П. П. Тарутин и др. Моделированием транспортных операций, воздушных потоков и пневматического сепарирования занимаются ВНИИЗ, ОТИППЛ, МТИПП, «Пищепромавтоматика» и другие организации. Известны также работы в области моделирования комплексных производственных процессов А. Т. Птушкина, В. А. Абашкина, П. П. Тарутина, В. А. Скрябина, В. В. Гусева, С. Л. Попкова и др. В области математического моделирования производственных процессов хлебозаводов известны работы Д. И. Скобло, А. А. Михелева, Н. Ф. Прокопенко, В. В. Щербатенко, Н. П. Козьминой, А. Гирсекорна, Л. Киссель и др. Значительный вклад в моделирование систем управления хлебозаводами внесен «Пищепромавтоматикой».

Вместе с тем значительная часть технологических процессов переработки зерна и приготовления хлеба математически не описана, либо существующие математические описания непригодны для поиска оптимальных решений. К таким процессам относятся сушка зерна, мойка зерна и очистка отработавшей моечной воды, измельчение, гранулирование, а на хлебозаводах процессы тестоведения. Имеются известные трудности в составлении математических моделей и других процессов, поскольку природа их окончательно не установлена и математически не описана. Тем не менее без математического описания отдельных участков этих процессов не могут быть успешно применены эффективные методы системного анализа при разработке и совершенствовании технологических процессов, машин и аппаратов и их систем управления.

В соответствии с определением Н. П. Бусленко, каждый технологический процесс в настоящей работе рассматривается как состоящий из отдельных участков (подсистем), характеризующихся общими свойствами, а каждый участок — как состоящий из элементов, не подлежащих дальнейшему расчленению.

В заключительной части главы отмечено, что существуют

два принципиальных подхода к исследованию технологических процессов. В одном случае процесс рассматривают в общем, как целостное образование, а в другом его рассматривают как систему, состоящую из отдельных подсистем, состоящих из элементов.

Изучая процесс как систему, можно его представить совокупностью простых элементов, а каждый элемент — типовой моделью либо типовой процедурой ее составления. В основу типизации следует положить наиболее простые элементы технологических процессов.

Создание и внедрение автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП) основано на базе широкого использования стандартных элементов, средств и методов их использования. Типизация и унификация элементов АСУТП способствует унификации проектной и рабочей документации, сокращению сроков и стоимости разработки систем.

Системы управления должны строиться по типовым проектным решениям, обеспечивающим возможность ее многократного использования без существенной доработки. В тех случаях, когда невозможно составить типовые решения, составляют типовые методики их составления. В алгоритмах решения экономических задач удельный объем типовых процедур (модулей) и вычислительных операторов составляет в среднем более половины. Еще больший удельный объем составляют команды, реализующие эти процедуры.

Учитывая то, что алгоритмизация технологических процессов является первой стадией создания АСУТП, составление типовых математических моделей технологических процессов либо типовых методик их составления должно предшествовать созданию АСУТП. Проблему унификации и типизации математических моделей можно решить только при системном подходе, т. е. при таком подходе, в соответствии с которым процесс выработки решений основан на определении общей цели системы. При этом появляется возможность в значительной степени формализовать процесс исследования, упростить и стандартизировать процедуру составления математической модели.

С этой целью все технологические процессы необходимо классифицировать с точки зрения общего подхода к составлению математических моделей, т. е. противопоставить набору разрозненных задач общую системную цель: составить единым и формальным образом математическую модель тех-

нологического процесса. Для этого с позиций математического моделирования технологические процессы следует подразделить на следующие группы:

1) технологические процессы, природа которых описана математически на основе существующих теоретических положений фундаментальных наук, позволяющих установить требуемые количественные соотношения и связи между параметрами процесса;

2) процессы, природа которых математически не описана, но количественные связи между параметрами которых можно вывести на основе балансовых уравнений;

3) процессы, природа которых, как и в предыдущем случае, математически не описана, но использование уравнений баланса для их описания невозможно либо нецелесообразно, что не позволяет установить необходимые соотношения между параметрами процесса.

В первом и втором случаях составление математической модели предполагает различные преобразования исходных систем уравнений для того, чтобы свести их к виду, пригодному для решения поставленных задач. Если же исходные математические соотношения невозможно либо нецелесообразно использовать для составления математической модели, то процесс следует отнести к третьей группе.

Составление математических моделей процессов третьей группы можно осуществить на основе экспериментальных данных, полученных различными методами по различным планам либо на основе различных гипотез о виде математических связей между параметрами процесса с последующей экспериментальной проверкой. Весьма эффективными экспериментальными методами получения математических моделей являются методы планирования экспериментов. При этом под планом эксперимента в общем случае понимают перечень и порядок проведения измерений, спецификацию обрабатываемых экспериментальных данных, методы и правила их обработки. Основными характеристиками планов являются их пригодность для решения поставленной задачи, осуществимость, точность и экономическая эффективность. Для получения оптимальных решений наиболее эффективными являются методы экстремального планирования экспериментов.

Математические модели, полученные на основании теоретических представлений о природе процесса, имеют большую область применимости, но не всегда могут обеспечить необходимую точность. Модели, основанные на эксперименталь-

ных данных, отличаются большей точностью, однако они применимы только для того объекта, на котором они получены.

На зерноперерабатывающих предприятиях и хлебозаводах к первой группе можно отнести процессы увлажнения, сушки, гидротермической обработки зерна, выпечки хлеба и др. Балансовые уравнения можно применить при составлении математической модели к любому технологическому процессу, в том случае, если эта модель соответствует поставленной задаче исследования. Балансовые уравнения очень часто используют при исследовании различных технологических процессов с рециклами и другими видами потоков.

Большую часть технологических процессов хранения и переработки зерна и приготовления хлеба можно отнести к третьей группе, т. к. их природа либо не описана, либо существующие описания не устанавливают необходимых связей между параметрами, пригодных для решения поставленных задач исследования.

Из процессов первой группы выделены и изучены сушка зерна, из процессов второй группы — мойка зерна и очистка мочной воды, из процессов третьей группы — процессы измельчения зерна, гранулирование различных продуктов и тестоведение.

Научной целью работы является исследование проблем математического моделирования технологических процессов зерноперерабатывающих предприятий и хлебозаводов. Практической целью работы является разработка методов расчета технологических процессов и рекомендаций по их совершенствованию при проектировании, эксплуатации и автоматизации на основе полученных математических моделей, учитывающих общие закономерности протекания процессов и частные особенности их конкретной реализации в производственных условиях.

Во второй главе изложены вопросы оптимального выбора режимов сушки зерна. Из общей технологической схемы элеватора, сушка зерна выделена в отдельный участок (подсистему) и представлена структурной и параметрической схемами. Структурная схема отражает существующие методы сушки зерна в различных типах зерносушилок и состоит из элементов, представляющих все характерные устройства и необходимые для сушки зерна: топку, смеситель, камеру нагрева, сушильную камеру и т. д.

Параметрическая схема сушильной камеры включает вход-

ные параметры: начальное влагосодержание  $u_0$ , начальную температуру  $t_{30}$ , скорость  $v_3$ , толщину слоя  $h_3$  и количество  $G_3$  поступающего на сушку зерна, его качество и структурные свойства как капиллярно-пористого тела, условно обозначенные общим параметром  $k_{30}$ . Ко входным отнесли также параметры сушильного агента: начальную температуру  $t_{ca}$ , влагосодержание  $d_{ca}$ , скорость  $v_{ca}$  и расход  $L_{ca}$ , а также барометрическое давление  $P_a$ .

Выходными параметрами являются конечные влагосодержание  $u_k$  и температура зерна  $t_{zk}$ , его качество, определяемое общим параметром  $k_{zk}$ , влагосодержание  $d_{ca}^{отр}$  и температура  $t_{ca}^{отр}$  отработавшего сушильного агента. Коэффициенты тепло- и массообмена  $\alpha$  и  $\beta$ , диффузии тепла и влаги  $a_d$  и  $a_m$ , термобарометрический коэффициент  $\delta$ , порозность слоя  $m$ , его аэродинамическое сопротивление  $\zeta_c$ , время сушки  $\tau$ , температуры отдельных конструктивных элементов камеры и пр., которые обозначены общим символом  $k_{вых}$ , в зависимости от поставленной задачи исследования могут быть выходными или входными параметрами. К выходным параметрам можно отнести также различные критерии эффективности  $E_j$ , которые определяют виды затрат на сушку и выражаются как техническими, так и экономическими показателями.

Выходные параметры, характеризующие высушиваемый материал и отработавший сушильный агент, могут быть управляемыми. Причем конечные влагосодержание и температуру зерна обычно задают, поскольку они должны удовлетворять определенным качественным показателям, связанным с условиями дальнейшего хранения либо переработки зерна, параметры отработавшего сушильного агента должны обеспечить максимальное использование потенциала сушки, выражающего совместное влияние температуры и влагосодержания сушильного агента на процесс сушки и определяемого адиабатной психрометрической разностью температур сухого и мокрого термометров. Максимальное использование потенциала сушки возможно при влагосодержании сушильного агента  $d_{ca}^{отр} = d_{ca}^{max}$  и максимальной его температуре, равной температуре высушиваемого зерна  $t_{ca}^{отр} = t_3^{max}$ .

Основной целью настоящего исследования поставили выбор оптимальных по затратам энергии и производительности (быстродействию) режимов сушки при заданных ограничениях по качеству высушенного зерна. Решение этой задачи

позволит снизить общие затраты и повысить производительность процесса.

Оптимальные решения можно получить расчетным путем на модели, либо перебором большого количества различных вариантов на объекте. Очевидно, что для решения поставленных задач первый путь более приемлем. В связи с этим в работе рассмотрены возможности использования существующих математических описаний процесса сушки в слое для получения оптимальных решений по затратам энергии и производительности.

Анализируя параметрическую схему и имеющиеся математические описания процесса сушки, можно заключить, что наибольшее число параметров охватывают уравнения материального и энергетического балансов либо уравнения связанного тепло- и массопереноса. Используя уравнения материального и энергетического балансов и принимая ряд упрощающих допущений, приведенных в работах И. П. Баумштейна и Ю. А. Майзеля, составим систему уравнений, описывающих стационарный режим конвективной сушки:

$$\begin{aligned} L_{ca}c_{ct}(t_{ca}-t_{ca}^{отр}) + J(d_{ct}-d_{ca}^{отр}) - \alpha F_3 \left( \frac{t_{ca}-t_{ca}^{отр}}{2} - t_3 \right) &= 0; \\ L_{ca}(d_{ca}-d_{ca}^{отр}) - G_3 \frac{du}{dx} &= 0; \\ G_3 \frac{du}{dx} - KF_3(u-u_p) &= 0; \\ c_3 G_3 \frac{dt_3}{dx} - \alpha F_3 \left( \frac{t_{ca}-t_{ca}^{отр}}{2} - t_3 \right) &= 0; \end{aligned} \quad (2.1)$$

В этой системе уравнений введены дополнительные обозначения:

- $c_3, c_{ca}$  — теплоемкости сушильного агента и зерна;
- $\alpha$  — коэффициент теплоотдачи от сушильного агента к зерну;
- $u_p$  — равновесное влагосодержание зерна;
- $F_3$  — удельная поверхность зерновок;
- $K$  — коэффициент сушки;
- $J$  — энтальпия влаги.

В качестве критерия оптимальности приняли функционал

$$I = \int_0^l t_{ca} dx \quad (2.2)$$

где  $l$  — длина сушильной камеры.

Приведенная система уравнений в таком виде не может

быть использована для поиска оптимальных решений, т. к. не отражает в явном виде зависимость выбранного критерия от определяющих его параметров. В связи с этим их необходимо преобразовать. После преобразований систему уравнений свели к двум обыкновенным дифференциальным уравнениям, обеспечивающим условия необходимости и достаточности, в которых независимой переменной является время  $\tau$  (координата по длине сушильной камеры  $x$ ):

$$\frac{du}{dx} = a_1 u + a_2 t_{ca} + a_3;$$

$$\frac{dt_3}{dx} = a_4 u + a_5 t_3 + a_6 t_{ca} + a_7, \quad (2.3)$$

где  $a_i$  — коэффициенты, полученные в результате преобразования исходных уравнений.

Составили также дополнительную систему дифференциальных уравнений для вспомогательных функций  $\psi_i$ , сопряженных с системой (2.3):

$$\frac{d\psi_1}{dx} = 0; \quad \frac{d\psi_1}{dx} = -a_1 \psi_1; \quad \frac{d\psi_2}{dx} = -a_4 \psi_2; \quad (2.4)$$

Используя теорему о принципе максимума, получили уравнение, позволяющее установить распределение сушильного агента по времени сушки (длине сушильной камеры), обеспечивающее минимальный расход энергии на сушку:

$$\begin{aligned} t_{ca} = \text{sign}(\psi_0 + a_1 \psi_1 + a_5 \psi_2) = \text{sign} \left[ -1 + a_2 \psi_1(1) \exp\{a_1(1-x)\} + \right. \\ \left. + \left( \frac{a_2 a_4}{a_5} + a_6 \right) \psi_2(1) \exp\{a_5(1-x)\} \right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

Решив систему уравнений (2.3), можно аналитически определить распределение температуры сушильного агента, соответствующее распределению влагосодержания зерна и его температуры по времени. В качестве примера приведено решение для нахождения оптимального распределения температуры сушильного агента при сушке пшеницы в шахтной зерносушилке.

Для определения оптимальной производительности (быстродействия) зерносушилок использовали модель процесса сушки зерна в потоке, предложенную А. С. Бомко и В. И. Жидко:

$$\frac{dt_3}{d\tau} + v_3(\tau) \frac{dt_3}{dx} + \frac{A(v_3)}{c_3 \gamma_3} (t_3 - t_{ca}) - \frac{\rho}{c_3} \left( \frac{d\bar{u}}{d\tau} + v_3(\tau) \frac{d\bar{u}}{dx} \right) = 0; \quad (2.6)$$

$$\frac{du}{d\tau} + v_3(\tau) \frac{du}{dx} + a_m(t_3) \left( \frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} \right) = 0;$$

С граничными условиями

$$\frac{du}{dr}(\tau, x, R) = \begin{cases} \frac{B(t_3, v_{ca})}{a_m(t_3, v_{ca})} (u_R - u_p) & u_R \leq u_r \\ \frac{B(t_3, v_{ca})}{a_m(t_3)} (u_r - u_p) & u_R > u_r \end{cases} \quad (2.7)$$

и начальными условиями  $u(0, x, r) = u_0(x, r)$ ;  $t(0, x) = f_2(x)$ .

Здесь введены дополнительные обозначения:  $c_3, \gamma_3$  — теплоемкость и плотность зерновой массы;  $\rho$  — удельная теплота парообразования,  $A$  и  $B$  — постоянные эмпирические коэффициенты,  $u$  — среднее влагосодержание по радиусу зерновки.

Задачу выбора оптимального решения как в предыдущем случае свели к задаче получения такого распределения температуры сушильного агента по длине сушильной камеры, чтобы температура зерна в любой момент времени имела допустимое значение.

Неоднородные условия свели к однородным и методом интегральных преобразований свели задачу к минимизации функционала:

$$I = \int_0^{\tau_3} d\tau, \quad (2.8)$$

где  $\tau_3$  — заданное либо допустимое время сушки.

Применяя теорему о принципе максимума, получили уравнение, позволяющее установить распределение температуры сушильного агента по длине сушильной камеры, обеспечивающее максимальную производительность (минимальное быстроедействие)

$$t_{ca}(\tau) = t^* + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2\rho_1 \lambda_n a_m I(\lambda_n R)}{c_3 R} W_0 \left( \frac{c_3 \gamma_3}{A} \right) \exp(-\lambda_n a_m \tau), \quad (2.9)$$

где  $\lambda_n, A, W_0$  — величины, полученные в результате преобразования исходных уравнений.

Решение этого уравнения дает также прерывистую функцию с одним переключением. Приведенные аналитические методы отличаются большим количеством вычислений и неудобны для инженерных расчетов.

Полученное оптимальное распределение температуры сушильного агента по быстродействию не совпадает с оптимальным распределением по затрате энергии. Оптимальные распределения температуры по принятым критериям определяются теплофизическими и массообменными характеристиками зерна, допустимой температурой его нагрева, принятыми начальными и граничными условиями и имеют вид нисходящих прерывистых функций. Оптимальные по быстродействию режимы примерно соответствуют режимам, осуществляемым в газовых рециркуляционных зерносушилках и в шахтных с предварительным подогревом.

Оптимальное распределение температуры было и внедрено на шахтных зерносушилках с предварительным подогревом зерна при сушке различных культур (пшеницы, подсолнечника, ячменя) в условиях Нарткалинского и Терекского хлебоприемных предприятий Кабардино-Балкарской АССР, Тернопольского предприятия хлебопродуктов в Украинской ССР и Пикетинского хлебоприемного предприятия Омской области. При сушке зерна пшеницы продовольственного назначения температура сушильного агента перед нагревателем составляет 180—200°C, в первой зоне — 120—130°C и во второй — 100—110°C. В условиях Пикетинского хлебоприемного предприятия при сушке семенного зерна пшеницы температура сушильного агента перед нагревателем составляла 110°C, в первой зоне шахты — 75°C, а во второй — 60°. Температура нагрева зерна не превышала 50°C и 38°C.

Производительность сушилок при этом в среднем повышается на 20 ÷ 55%, а годовая экономия составляет 4,6 тыс. руб. на одну сушилку номинальной производительности 24 т/час при сроке окупаемости около 2-х лет.

В сложившейся практике существуют два принципиальных подхода к исследованию и оптимизации процесса сушки. В одном случае весь процесс рассматривается как один элемент (см., например: Методические указания по оптимизации процесса сушки зерна в слое. ВИМ, М., 1972), а в другом — процесс сушки исследуют как систему. Независимо от принципиального подхода к оптимизации определение оптимальных значений производительности и затрат энергии является

необходимым в обоих случаях. Эти две задачи с точки зрения поиска оптимальных решений являются наиболее трудными.

В связи с этим представляется целесообразным свести эти задачи к одной из канонических форм поиска оптимальных решений, которая была бы пригодна для многократного использования при оптимизации процессов сушки, осуществляемых в различных аппаратах при различных режимах. Желательно при этом иметь типовые алгоритмы либо программы поиска оптимальных условий на ЭВМ. При разработке типовых алгоритмов необходимо учитывать возможности замены отдельных блоков, отражающих изменения свойств и характеристик зерна различных культур в процессе сушки, методы сушки и конструктивные особенности сушильных устройств.

На основе анализа имеющихся математических описаний процесса сушки пришли к выводу, что для поиска общего метода оптимизации наиболее целесообразной является система уравнений связанного тепло- и массопереноса А. В. Лыкова при отсутствии градиента общего давления:

$$\begin{aligned} \frac{dU}{d\tau} &= k_{11}\nabla^2 U + k_{12}\nabla^2 T \\ \frac{dT}{d\tau} &= k_{21}\nabla^2 U + k_{22}\nabla^2 T \end{aligned} \quad (2.10)$$

где  $U$ ,  $T$  — влагосодержание и температура зерна;

$k_{ij}$  — коэффициенты, определяемые теплофизическими и термодинамическими характеристиками;

$\nabla^2$  — оператор Лапласа.

В качестве краевых условий приняли граничные условия первого рода. Управляемыми параметрами приняли влагосодержание  $U$  и температуру зерна  $T$ . Управляющий параметр — температуру сушильного агента  $\alpha$ , ищем как функцию времени и пространственной координаты  $x$ , изменяющейся в области  $V = [0 \leq x_1 \leq l_1; 0 \leq x_2 \leq l_2; 0 \leq x_3 \leq l_3]$ , являющейся пространством сушильной камеры. Коэффициенты приведенной системы уравнений и краевых условий являются функциями времени, пространственной координаты и входящих в систему параметров:

$$k = k(\tau, x, U, T, \alpha). \quad (2.11)$$

На параметры системы в соответствии с технологическими требованиями накладываются ограничения

$$U \in X, T \in Y, \alpha \in V. \quad (2.12)$$

Критерий оптимальности запишем в наиболее распространенном виде интегрального функционала

$$I = \int_0^{\tau_k} \int_V F\left(\tau, x, U, T, \frac{\partial U}{\partial \tau}, \frac{\partial U}{\partial x}, \frac{\partial T}{\partial \tau}, \frac{\partial T}{\partial x}, \alpha\right) d\tau, dx. \quad (2.13)$$

Пространство сушильной камеры рассечем плоскостями:

$$x_i = P_{i1}, x_i = P_{i2}, \dots, x_i = P_{ir_i};$$

$$0 < P_{i1} < P_{i2} < \dots < P_{ir_i} = l_i \quad (i=1, 2, 3),$$

в результате чего пространство разделится на  $\Gamma_1 \Gamma_2 \Gamma_3 = n$  параллелепипедов. Время сушки  $\tau_k$  разделим на  $k$  частей

$$0 < \tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_k = \tau^*.$$

При этом пространственно-временная область разделится на  $nk$  подобластей  $\Delta G$ .

Задача оптимизации сформулирована следующим образом: среди всех допустимых управлений  $\alpha(\tau, x)$  найти такое, чтобы соответствующее ему решение системы уравнений математического описания 2.10 обеспечивало минимум функционала (2.13) и соблюдались ограничения 2.12. При этом в каждой из областей  $\Delta G$  управляющее воздействие предполагается постоянным, что обеспечивает позонную подачу сушильного агента, температура которого изменяется либо при переходе от одной пространственной области к другой, либо в пределах одной области, по истечении некоторого времени, определенного проведенным разделением на элементы.

Используя различные преобразования и замены, задачу оптимального распределения температуры сушильного агента свели к задаче поиска оптимального управления многостадийным процессом, математическим описанием которой явится система:

$$\left. \begin{aligned} U &= \psi_1^{(s)}(\tau, x, U^{(s-1)}, T^{(s-1)}, \alpha^{(s)}), \\ T &= \psi_2(\tau, x, U^{(s-1)}, T^{(s-1)}, \alpha^{(s)}), \end{aligned} \right\} \quad (k, \tau) \in \Delta G_s, s=1, 2, \dots, nk, \quad (2.14)$$

а критерием оптимальности сумма

$$I = R_N = \sum_{s=1}^N \Gamma_s(U^{(s-1)}, T^{(s-1)}, \alpha^{(s)}),$$

с ограничениями на параметры (2.12).

Для решения этой задачи наиболее удачным является метод динамического программирования. В результате решения этой задачи можно получить позонное распределение температуры сушильного агента  $\alpha_{\text{опт}}^{(s)}$  ( $s = 1, 2, \dots, N$ ). При большом  $N$  метод предполагает большой объем вычислительной работы, что не является препятствием при использовании ЭВМ. Учитывая то обстоятельство, что практическая реализация распределения температуры сушильного агента является дискретной, точность метода вычисления является достаточной. Гораздо большее влияние на точность оказывают численные значения коэффициентов уравнения. В связи с этим значительно возрастает роль методов определения теплофизических и массообменных характеристик зерна.

Разделение осей координат и времени может быть произведено на равные и неравные области. Коэффициенты системы уравнений в каждой области могут быть заданы аналитически, графически или в табличном виде.

В работе приведено решение задачи на ЭВМ «Минск-22» при помощи систем трех программ, которыми предусмотрена замена отдельных блоков, отражающих начальные характеристики зерна и их изменение в процессе сушки, методы сушки и характеристики сушильной камеры.

В третьей главе изучены общие закономерности протекания технологического процесса мойки зерна и очистки мочной воды с целью разработки методов расчета и создания универсальной системы управления для всех способов очистки мочной воды. Структурная и параметрическая схемы составлены на основе анализа исследований В. Я. Гиршсона, Р. О. Шипейтина, Л. И. Котляра, А. Я. Соколова, Н. В. Георги, Ц. Р. Зайчика, П. Г. Демидова, Л. В. Портнова, О. В. Тешителя и предложенных ими способов очистки мочной воды.

Из технологического процесса подготовки зерна к помолу, выделили участок мойки зерна, очистки и рециркуляции мочной воды и представили структурной и параметрическими схемами, которые охватывают все существующие способы мойки зерна и очистки воды независимо от их аппаратного

оформления, методов осветления и обеззараживания отработавшей воды и обезвоживания осадка.

Принципиальная структурная схема технологического процесса мойки зерна представлена элементами: смеситель, мочная машина, зерноуловитель, смеситель реагентов-интенсификаторов осветления, осветлитель, смеситель реагентов для обеззараживания, обеззараживающее устройство, устройство для обезвоживания осадка и насос для рециркулируемого потока воды.

Параметрическая схема учитывает все возможные факторы, влияющие на процесс очистки мочной воды: поток зерна, подаваемого на мойку  $w_z$ , концентрацию загрязнений на его поверхности  $c_z$ , вносимое зерном после мойки, количество отделяемых примесей  $w_{\text{пр}}$  и их концентрацию  $c_i$  пр, количество вводимых реагентов  $G_{\text{ал}}$ ,  $G_{\text{бент}}$ ,  $G_{\text{паа}}$ ,  $D_x$ , необходимый поток мочной воды  $w_r$ , поток добавляемой свежей воды  $w_{\text{п}}$ , ее качество  $c_{\text{п}}$ . Все эти показатели определяются принятым способом мойки зерна, способом осветления воды, способом обеззараживания, способом отведения осадка и др., имеющими чисто случайный характер.

Процесс можно характеризовать также большим числом выходных параметров: количеством рециркулирующего  $w_p$  либо отводимого  $w_0$  потока, количеством  $w_{\text{ос}}$  и характеристикой  $k_{\text{ос}}$  осадка, концентрациями различных веществ во всех видах потоков технологической схемы  $c_{\text{хв}}$ ,  $c_{\text{хз}}$ ,  $c_p$ ,  $c_0$ ,  $c_r$ ,  $c_{\text{п}}$ ,  $G_0$  и  $G_k$  зольностью зерна  $Z$  и ее изменением в процессе мойки  $\Delta Z$ , а также различными коэффициентами превращения характеристик потоков на отдельных стадиях очистки  $a_i$ ,  $b_i$ ,  $c_i$ ,  $c_{i \text{ос}}$ .

Аналитические и экспериментальные исследования позволили установить действительные и допустимые величины концентрации взвешенных примесей, карбонатной и некарбонатной жесткости воды и остаточного активного хлора в главном потоке. Определили также оптимальные дозы реагентов-интенсификаторов осветления для обеспечения максимального эффекта осветления воды. Аналитические исследования позволили составить математические описания изменения концентрации взвешенных и растворенных примесей в рециркулируемых потоках.

При выборе оптимальных дозировок-реагентов использовали экстремальное планирование экспериментов. В качестве независимых факторов были приняты дозы ПАА ( $x_1$ ) и бентонита ( $x_2$ ). В качестве критерия оптимальности  $y$  было выбра-

но содержание взвешенных примесей в осветленной воде. В результате реализации матрицы планирования получено следующее уравнение регрессии, адекватно отражающее процесс осветления:

$$y = 160,5 + 11,5x_1 - 20,5x_2 \quad (3.1)$$

После крутого восхождения определили минимальные значения критерия оптимальности  $y = 130$  мг/дм<sup>3</sup> при величинах дозировок ПАА  $x_1 = 0,5$  г/дм<sup>3</sup> и бентонита  $x_2 = 0,75$  г/дм<sup>3</sup>.

Используя законы сохранения вещества и энергии, получили математическое описание процесса изменения концентрации взвешенных примесей в рециркулирующем потоке в виде линейного дифференциального уравнения первого порядка:

$$dc_r = \left( \frac{w_p}{w_r} c_p + \frac{w_n}{w_r} c_n - \frac{w_0}{w_r} c_r \right) d\tau. \quad (3.2)$$

Решение этого уравнения позволило получить сравнительно простую модель для определения концентрации взвешенных частиц в главном потоке:

$$c_r = \frac{Q}{P} + \left( c_0 - \frac{Q}{P} \right) e^{-Q\tau} \quad (3.3)$$

где

$$P = \frac{w_0}{w_r} \text{ и } Q = \frac{w_p}{w_r} c_p.$$

Для определения величины карбонатной и некарбонатной жесткости в рециркулируемом потоке воды аналитически получено следующее выражение:

$$G_n = G_0 w_p^n + \frac{(k w_p + G_0 w_n)(1 - w_p^n)}{1 - w_p}, \text{ мг-экв/л.} \quad (3.4)$$

При числе циклов  $n = \infty$  величина некарбонатной жесткости стабилизируется при условии постоянства коэффициента  $k$ , равного разности некарбонатных жесткостей обеззараженной и свежей моечной воды.

Для определения изменения концентрации остаточного хлора в рециркулируемом потоке воды также аналитически получили выражение:

$$c_{x(n)} = [b(D_0 + c_{x(n-1)})w_p + D_b w_n] b_1 b_2 \text{ мг/л.} \quad (3.5)$$

где  $b_i$  — постоянные величины, определяемые экспериментально;

$D_0, D_b$  — вводимые и содержащиеся в свежей воде дозы активного хлора.

Используя законы сохранения веществ, составили уравнение, определяющее изменение величины рециркулирующего потока в зависимости от влияния возмущения по изменению концентрации какого-либо вещества в моечной воде:

$$\Delta w_p = \frac{w_r [(1-a_1)c_m + (a_1-a_2)c_0 + (a_2-a_3)c_d - (1-a_1)c_n - \frac{w_3}{w_r}(c_3 + \Delta c_3)]}{\frac{w_3}{w_r} c_3 + \Delta c_3 + c_1 - (1-a_1) - (a_1-a_2)c_0 - (a_2-a_3)c_d - a_3 c_n} \quad (3.6)$$

где  $a_i, c_i$  — коэффициенты превращения и концентрации компонентов в заданном сечении.

Для исследования процесса рециркуляции средствами вычислительной техники составлена блок-схема алгоритма для решения уравнения на ЭВМ, с помощью которой можно определить изменение величины рециркулирующего потока в зависимости от изменения количества отделившихся примесей при мойке зерна. Решив последнее уравнение относительно интересующей нас величины концентрации какого-либо вещества в заданном месте технологической схемы при  $\Delta w_p = 0$ , можно получить уравнение для ее определения и составить соответствующий алгоритм для решения на ЭВМ.

На основе анализа составленных математических моделей и полученных экспериментальных данных составлена принципиальная схема САУ и предложена одна из возможных ее реализаций, т. к. без автоматической системы управления в технологической схеме мойки зерна и очистки моечной воды практически невозможно предотвратить поступление в воду взвешенных примесей выше допустимой нормы, а также обеспечить постоянство общего потока воды на мойку зерна.

Для реализации системы автоматического регулирования определены статические и динамические характеристики по основному каналу регулирования «выход моечной машины — исполнительный механизм» (концентрация взвешенных частиц — подача свежей воды) и каналу возмущений «концентрация взвешенных частиц в рециркулирующем потоке — концентрация частиц в потоке на выходе из моечной машины». Реализовав полученные характеристики на АВМ, определили величины коэффициентов передачи объекта, погрешности САУ, значение и характер регулируемой величины.

Системный подход к исследованию и математическое моделирование процессов мойки зерна и очистки моечной воды с использованием АВМ и ЭВМ позволило выявить возможно-

сти оптимального использования воды при мойке зерна, оптимальное соотношение реагентов для интенсификации гравитационного способа очистки моечной воды, построить систему автоматического управления процессом рециркуляции воды при мойке зерна на основе стабилизации содержания взвешенных примесей в главном потоке и определить основные статические и динамические характеристики системы управления.

Для гравитационного метода осаждения статическая характеристика по каналу возмущения «концентрация взвешенных частиц в рециркулирующем потоке — концентрация частиц в потоке на выходе из машины» получена экспериментально и является линейной:

$$c_p = 47 + 0,33c_1 \quad (3.7)$$

По каналу регулирования «концентрация взвешенных частиц в главном потоке — подача свежей воды» статическая характеристика является также линейной:

$$c_r = 120 - 10w_{п.} \quad (3.8)$$

Динамические характеристики по этим каналам аппроксимированы элементарными звеньями и представлены передаточными функциями:

$$W_{(p)}^0 = \frac{k_1}{1+T_1p} e^{-p\tau_3}; \quad W_{(p)} = \frac{k_2}{1+T_2p}$$

где  $k_1, k_2$  — коэффициенты передачи объекта, определяемые по статическим характеристикам;

$T_1, T_2$  — постоянные времени;

$\tau_3$  — время запаздывания.

Предложенная методика моделирования была использована при испытании и внедрении гравитационного способа очистки воды на Тростянецком комбинате хлебопродуктов УССР и может быть использована для исследования всех существующих способов мойки зерна и очистки моечной воды. Годовая экономия от внедрения гравитационного способа очистки моечной воды составляет 50 тыс. руб. для мельницы производительностью 200 т/сутки при сроке окупаемости 1,6 года.

В главе четвертой рассмотрены общие принципиальные вопросы моделирования последовательного измельче-

ния зерна при переработке его в муку, выделен и рассмотрен один из важных этапов технологического процесса переработки зерна в муку — участок крупобразования, осуществляемый на первых трех драных системах, и во многом определяющий течение всего процесса. В соответствии с существующей терминологией каждая система состоит из вальцового станка и отсева. Параметры отсева приняты постоянными и считаем их одним элементом. При таком допущении на процесс крупобразования будут оказывать влияние входные параметры: влажность зерна, поступающего на I драную систему  $w$ , время его отволаживания  $\tau$ ; зазоры между вальцами всех трех систем  $\delta_1, \delta_2$  и  $\delta_3$ ; удельные подачи на системы  $q_1, q_2$  и  $q_3$ ; окружные скорости быстрого и медленного вальцов всех систем  $v_б$  и  $v_м$ ; относительная скорость вальцов  $v_0$ ; геометрические размеры и форма вальцов  $k_r$ ; вид и состояние поверхности вальцов  $k_n$ ; определяемые формой, количеством, уклоном и взаимным расположением рифлей; свойства зерна  $k_z$ , определяемые типом, сортом, крупностью, стекловидностью, выравненностью и др. показателями; свойства окружающей среды  $k_{ср}$ , определяемые параметрами воздуха; особенности технологической схемы  $k_{сх}$  и пр.

Выходными параметрами, характеризующими назначение процесса крупобразования, являются единичные показатели: извлечение круподуновых продуктов и муки по системам  $I_1, I_2, \dots, I_n$ , зольностью  $Z_1, Z_2, \dots, Z_n$  и другие показатели формы  $k_f$ , размера  $k_r$  и структуры  $k_{ст}$  извлекаемых частиц. Выходными можно считать и другие показатели качества процесса, расход энергии на измельчение, распорное усилие между вальцами, циркулирующую мощность и пр. В качестве управляемых параметров технологического процесса крупобразования приняты суммарное извлечение круподуновых продуктов и муки со всех трех систем  $I_0$  и их средневзвешенную зольность  $Z_0$ .

Основной задачей исследования поставили выяснение механизма процесса крупобразования с целью возможного на современном уровне знаний о процессе измельчения устранения неопределенности совокупного влияния различных факторов на принятые показатели процесса.

Решить поставленную задачу можно только составлением математической модели, устанавливающей связи между перечисленными параметрами. Анализ существующих теорий и гипотез измельчения твердых материалов и зерна показал, что ни одна из них не устанавливает необходимых количеств

венных связей между параметрами процесса, а только лишь по-разному объясняет энергетическую сторону измельчения и распределения частиц по фракциям.

Для установления необходимых зависимостей между перечисленными параметрами процесса измельчения воспользовались гипотезой А. В. Панченко о вероятности совмещения частиц продукта в рабочей зоне вальцового станка, согласно которой с увеличением подачи продукта к вальцам возрастает вероятность совмещения измельчаемых частиц в рабочей зоне вальцов по линиям, параллельным и близким к межцентровой, что аналогично увеличению начальных размеров частиц и должно увеличить степень измельчения исходного продукта при неизменной величине межвальцового зазора. Это подтверждено исследованиями путем измельчения отдельных и агрегатированных зерновок различной крупности. Используя принципы теории вероятностей, аналитически подтвердили и первое положение о вероятности совмещения частиц. Допуская, что зерновки имеют шарообразную форму, а медленный валец подает частицы в рабочую зону, установили зависимость вероятного совмещения частиц в рабочей зоне вальцового станка от подачи продукта  $q$ , диаметра  $d$  и плотности частиц  $\rho$ , скорости быстрого вальца  $v_6$  и отношения окружающих скоростей вальцов  $k$  в виде

$$P = 1 - e^{-\frac{qk}{600 \rho d v_6}} \quad (4.1)$$

Гипотеза была подтверждена экспериментально при измельчении пшеницы трех групп стекловидности и промежуточных продуктов, поступающих на вальцовые станки первой, второй и третьей драных систем в широком диапазоне изменения кинематических и режимных условий работы жестко установленных вальцов. Получена зависимость общего извлечения от оперативно регулируемых в станке параметров — зазора между вальцами  $\delta$  и подачи к ним продукта  $q$ :

$$I = me^{-n\delta} + Bq, \quad (4.2)$$

где  $B$  — коэффициент, характеризующий интенсивность возрастания общего извлечения при увеличении подачи.

Проведенное исследование позволило установить совокупное влияние окружных скоростей вальцовых станков, зазора между вальцами, удельной подачи, геометрических размеров и формы измельчаемых частиц на величину извлечения на

уровне качественного анализа. Кроме того, это позволяет считать любое последовательное измельчение на  $n$  вальцовых станках как систему с  $n-1$  отрицательными обратными технологическими связями, так как уменьшение степени измельчения на одной системе приводит к увеличению загрузки вальцов последующей системы и, следовательно, к увеличению степени измельчения.

Количественную оценку совокупного влияния большого числа факторов на процесс измельчения получили многофакторным планированием экспериментов. На первом этапе выделили основные факторы и их взаимодействие по методу случайного баланса. Априори установлено, что основными факторами, влияющими на общее извлечение круподуновых продуктов и муки с первых трех драных систем и их зольность являются независимые факторы: влажность зерна на I драной системе  $w(x_1)$ , основное время отволаживания  $\tau(x_2)$ , рабочие зазоры  $\delta_1(x_3)$ ,  $\delta_2(x_4)$ ,  $\delta_3(x_5)$ , скорости быстро- и медленновращающихся вальцов  $v_6(x_6)$  и  $v_m(x_7)$  и удельные нагрузки на первые драные системы  $q_1(x_8)$ ,  $q_2(x_9)$ ,  $q_3(x_{10})$ .

При таком подходе к составлению плана эксперимента появляется возможность установить совокупное влияние факторов одновременно на всех системах крупобразования. При измельчении пшеницы IV типа III группы стекловидности по результатам случайного баланса выделено 5 значимых факторов. Варьируя этими факторами, на втором этапе реализовали эксперимент по плану  $2^{5-1}$  с генерирующим соотношением  $x_8 = x_1 x_2 x_6 x_7$  и определяющим контрастом  $I = x_1 x_2 x_6 x_7 x_8$ . После обработки результатов получили уравнения регрессии:

$$y_1 = 71,6 - 0,7x_1 + 2,3x_6 - 3,9x_7 - 2,0x_3 - 0,2x_8 - x_6 x_7 - 0,7x_3 x_7 + 0,5x_3 x_6 + 0,4x_1 x_3 + 0,2x_6 x_8 \quad (4.3)$$

$$y_2 = 0,78 - 0,06x_1 - 0,03x_7 - 0,02x_3 - 0,02x_8 - 0,02x_7 x_8 - 0,01x_3 x_8 \quad (4.4)$$

Из уравнений можно установить, что наибольшее влияние на величину извлечения оказывает скорость медленного вальца  $v_m(x_7)$ , а наибольшее влияние на величину зольности — влажность зерна, поступающего на I драную систему  $w(x_1)$ . Первое подтверждает гипотезу об увеличении вероятности совмещения частиц в рабочей зоне и связанного с этим увеличения величины извлечения, поскольку именно скорость медленного вальца при прочих равных условиях определяет

загрузку рабочей зоны вальцов. Второе подтверждает известные теоретические представления и практические данные о влиянии влажности исходного продукта на качество извлекаемых круподуновых продуктов.

Для оценки квадратичных членов в центре поставили ряд опытов. Поскольку полученные значения выходов извлечения и зольности  $u_1$  и  $u_2$  выходов в этих опытах мало отличаются от среднеарифметических значений параметров в предыдущей серии опытов, поставили эксперимент более высокого порядка. Для наглядной интерпретации строили частные сечения гиперповерхности, представленной приведенными уравнениями регрессии, плоскостями  $x_1, x_2, \dots, x_n = 0$ . В результате получили частные уравнения, представляющие поверхности типа «минимум», а при фиксированном  $u_2$  — равностоярные гиперболы. Построили также графики равных выходов извлечения и зольности для сочетаний  $x_6$  и  $x_7$ ,  $x_1$  и  $x_3$ ,  $x_7$  и  $x_5$ , как наиболее интересные для целей управления процессом. При сечении  $Y_{12} = (x_7 x_3)$  установлено, что при движении по склону со значениями  $v_m = 2,1$  м/сек и  $\delta_3 = 0,7$  мм могут быть получены удовлетворительные количественные и качественные показатели процесса крупобразования.

Для проверки выводов провели опыты при  $v_m = 2,0$  м/сек и  $\delta_3 = 0,4$  мм. При этом получено 70% круподуновых продуктов со средневзвешенной зольностью 0,70% на двух системах. При работе согласно правилам выход составил бы 71% со средневзвешенной зольностью 0,78%, т. е. при помощи математической модели установлена возможность расчетным путем добиться повышения количества и улучшения качества извлекаемых продуктов. На основе предложенных математических моделей процесса крупобразования удалось установить режимы на мельнице в г. Кунгуре Пермской области, которые позволили увеличить выход крупок и улучшить их качество. Это дало возможность снизить средневзвешенную зольность муки на 0,11% и за счет этого перейти с односортового 85%-го помола на двухсортный 78%-ный помол пшеницы, что дало экономию 91,5 тыс. руб. в год для мельницы производительностью 150 т зерна.

Приказами министра заготовок СССР № 428 от 30 декабря 1971 г. и № 227 от 11 сентября 1971 г. обобщается опыт Кунгурской мельницы и других предприятий по увеличению выхода муки высоких сортов и рекомендуется для внедрения.

Все возмущающие воздействия на стадии крупобразования определяются изменением свойств зерна, подачи продук-

та на первую драную систему, состояния оборудования и его рабочих органов, состояния окружающей среды и особенностями технологической схемы. Система управления автоматически должна обеспечить компенсацию тех возмущений, которые нецелесообразно поручать оператору. Эти возмущения как правило имеют большую величину либо осуществляются с большой частотой. Очевидно эти возмущения связаны со свойствами зерна и его подачи. При условии стабилизации свойствами зерна на предыдущих этапах, целесообразной является стабилизация только подачи.

Поскольку эффективность системы определяется разностью между затратами на ее создание и полученным экономическим эффектом, то автоматизация выбранных функций управления должна быть экономически обоснована. Выявленные отрицательные обратные технологические связи позволяют установить существующие возможности стабилизации технологического процесса без применения специальных автоматических компенсирующих устройств, что позволит сократить затраты на управление.

В пятой главе изложены принципы подхода к составлению математических моделей процесса гранулирования. Из комбикормового производства выделили и рассмотрели завершающий участок технологической схемы — гранулирование и представили структурной и параметрической схемами. В структурную схему включены все элементы процесса гранулирования: дозирование, смешение и подогрев, прессование, охлаждение и сепарирование. Параметрическая схема, составленная по литературным данным, включает факторы: количество исходного продукта  $Q$ , влажность  $w$  и температуру  $t$  кондиционированного продукта, количество связующего вещества  $G$ , зазор между вальцами и матрицей  $\delta$ , скорость прессования  $v_{пр}$ , диаметр отверстий в матрице  $d_m$  и их длина  $L$ . Кроме перечисленных параметров, которыми в принципе можно управлять, на процесс гранулирования влияют свойства исходного продукта (гранулометрический и химический состав и др.), определяемые общим параметром  $k_{пр}$ , свойства связующего вещества  $k_{св}$ , конструктивные и другие особенности матрицы  $k_m$ , состояние окружающей среды  $k_a$ , режим охлаждения  $k_{охл}$ , режим сепарирования  $k_{сеп}$ , которыми невозможно либо нецелесообразно управлять.

Процесс гранулирования можно характеризовать выходными параметрами, определяющими качество гранулирован-

ного продукта статической  $C_T$  и динамической прочностью  $D_{ин}$ , крошимостью  $K_{po}$ , разбухаемостью в воде  $P_{аз}$ , реологическими свойствами  $P_e$ , цветом  $C_B$ , запахом  $Z_a$ , внешним видом  $B_n$ , плотностью либо насыпной массой  $\rho$ . Процесс можно также характеризовать расходом энергии на образование гранул  $E_э$ , различными другими затратами  $E_i$ , производительностью установки  $Q_{вых}$ , количеством непрогранулированного продукта  $\eta$  и др.

При изучении процесса гранулирования были поставлены четыре задачи: выявление наиболее значимых факторов на процесс гранулирования, исследование возможности гранулирования сухих кормовых дрожжей, поиск оптимальных условий гранулирования комбикормов в производственных условиях, совершенствование системы управления прессом-гранулятором с кольцевой матрицей. В каждом случае были составлены соответствующие модели, при помощи которых решали поставленные задачи.

Анализ существующих теоретических представлений о механизме связывания дисперсных частиц при гранулировании позволил установить, что существующие теории прессования — капиллярная, коллоидная и молекулярная не могут быть приняты за основу при составлении математических моделей, соответствующих поставленным задачам, так как не устанавливают необходимых количественных связей между факторами и оценками процесса.

При решении первой задачи в результате анализа существующих методов связывания порошкообразных материалов, физических свойств и химического состава сухих кормовых дрожжей и комбикормов и проведенных экспериментальных поисковых исследований было установлено, что наиболее подходящим методом гранулирования их является метод прессования, осуществляемый выдавливанием через отверстия.

Для выявления наиболее значимых факторов были проведены отсеивающие эксперименты по методу случайного баланса. Для этого составили матрицу планирования, в которую включили девять факторов. По результатам эксперимента построили точечную диаграмму рассеяния, а выделение факторов проводили визуально по разности медиан. В результате выделения получили пять значимых факторов. Для отыскания области оптимума была реализована матрица эксперимента, составляющая полуреплику типа  $2^5$ , а также выполнена программа крутого восхождения. Результаты круто-

го восхождения показали, что выбранный ранее центр планирования находится вблизи оптимума. Для описания области оптимума была составлена матрица по плану Хартли, близкому к Д-оптимальному. Коэффициенты регрессии были вычислены на ЭВМ «Минск-22». В результате реализации этого плана получили математическую модель в виде полинома второй степени

$$y = 110 - 31,6x_1 + 4,0x_2 + 2,1x_3 - 2,6x_4 - 1,5x_5 - 0,3x_1x_2 + 2,0x_1x_3 - 1,5x_1x_4 - 0,8x_1x_5 - 1,0x_2x_3 - 0,4x_2x_4 - \dots$$

Приведенное уравнение выражает зависимость удельной энергоемкости процесса гранулирования от наиболее значимых факторов, выделенных в результате отсеивающих экспериментов: диаметра отверстий в матрице —  $x_1$ , зазора между прессующими роликами и матрицей —  $x_2$ , влажности исходного продукта —  $x_3$ , угла образующей питающего устройства —  $x_4$  и скорости вращения матрицы —  $x_5$ . Анализ модели позволяет установить превалирующее воздействие на энергоемкость процесса перечисленных факторов.

Анализ процесса гранулирования и результатов постановки отсеивающих экспериментов позволил установить, что для второй задачи в качестве варьируемых независимых факторов следует принять температуру  $t(x_1)$  и влажность исходной смеси  $w(x_2)$ , а также диаметр отверстий матрицы  $d(x_3)$ . В качестве оценок приняли удельную энергоемкость процесса  $E_э(y_1)$  и крошимость гранул  $K_{po}(y_2)$ . Скорость гранулирования в опытах поддерживали  $0,1 \pm 0,01$  м/сек при постоянном гранулометрическом составе исходного продукта и естественном охлаждении гранул. Длина канала матриц была выбрана на основании анализа литературных данных. В опытах реализовали полный факторный эксперимент типа  $2^3$ . После реализации матрицы планирования определили значения параметров оптимизации, а по известным формулам определили коэффициенты регрессии, ошибку опыта, ошибку определения коэффициента регрессии и доверительный интервал.

При сравнении абсолютных значений коэффициентов регрессии с абсолютной величиной их доверительного интервала установили, что существенное влияние на удельную энергоемкость и крошимость гранул оказывают линейные эффекты. Значимые эффекты включены в уравнения регрессии, которые имеют следующий вид:

$$y_1 = 155,9 - 7,9x_1 - 16,9x_2 - 4,8x_3 \quad (5.1)$$

$$y_2 = 2,8 - 0,4x_1 - 0,8x_2 - 0,2x_3 \quad (5.2)$$

Так как линейные модели оказались адекватными, перешли к опытам по крутому восхождению. В связи с тем, что в опытах по крутому восхождению один из параметров оптимизации  $y_2$  проходит через минимум, а второй  $y_1$  — уменьшается, остановились на условиях опыта, дающего удовлетворительные результаты  $y_1=118$  и  $y_2=1,1$ , приняв их за нулевую точку следующей серии. При этом интервалы варьирования для  $x_1$  и  $x_2$  уменьшены, а для  $x_3$  сохранены прежними. В результате проведенного планирования эксперимента получены уравнения регрессии, адекватно описывающие область эксперимента:

$$y_1 = 92 + 0,8x_1 - 6,3x_2 - 2,0x_3 - 6,9x_1x_2 - 3,1x_2x_3 + 3,3x_1x_2 \quad (5.3)$$

$$y_2 = 2,32 + 0,27x_1 - 0,50x_2 - 0,35x_3 + 37x_2x_3 + 0,15x_1x_2 \quad (5.4)$$

Для нахождения оптимального решения применили комбинированный алгоритм аналитического покоординатного поиска точек условного экстремума в сочетании с методом последовательных приближений и реализовали на ЭВМ «Раздан-2» в области определения независимых переменных  $(-3, +3)$ . В результате решения получены значения факторов  $x_1 = -3$ ;  $x_2 = -3$ ;  $x_3 = +2$  или соответствующие им натуральные величины  $t = 66^\circ\text{C}$ ,  $w = 13\%$  и  $d = 12$  мм. Удельная энергоемкость и крошимость, рассчитанные на основании этих данных по приведенным уравнениям, равны  $y_1 = 41,0$  кдж/кг и  $y_2 = 0,5\%$ . Экспериментальная проверка на лабораторной установке с диаметром канала матрицы  $\varnothing 12$  мм, при влажности и температуре дрожжей после кондиционирования  $13,2\%$  и  $67^\circ\text{C}$ , показала удовлетворительную сходимость рассчитанных значений ( $y_1 = 42,1$  кдж/кг и  $y_2 = 0,6\%$ ).

Оптимальные режимы процесса гранулирования кормовых дрожжей были реализованы в производственных условиях Давлекановского мельзавода № 13 Башкирской АССР на прессе «Сенчюри-125» при диаметре отверстий в матрице 12,7 мм, влажности и температуре дрожжей после кондиционирования  $13,0\%$  и  $68^\circ\text{C}$ . Удельный расход энергии при этом составил 43,5 кдж/кг при крошимости 1,1%.

Экономический эффект от внедрения технологической схемы гранулирования кормовых дрожжей по заводу биосинтеза производительностью 250000 тонн в год составляет 627,7 тыс. рублей, а соответствующая годовая экономия в комбикормовой промышленности составит 111,2 тыс. рублей.

При решении третьей задачи основными управляющими воздействиями, которые обеспечивают в производственных условиях оптимальные влажность и температуру кондиционированного продукта, приняли независимые параметры: количество подаваемого исходного продукта  $Q(x_1)$ , количество и давление подаваемого пара  $G(x_2)$  и  $P(x_3)$ . В качестве параметров оптимизации были приняты расход энергии  $E_0$  на гранулирование, определяемый по косвенному показателю — величине электрического тока статора  $I(y_1)$ , и статическая прочность гранул  $C_T(y_2)$ . Выбор статической прочности в качестве второго критерия оптимальности обусловлен удобством определения его в производственных условиях и наличием предварительно установленной линейной корреляции с крошимостью.

В результате реализации матрицы планирования, состоящей из ПФЭ типа  $2^3$ , 6-ти «звездных» и 6-ти центральных точек при их общем числе  $N=20$  и величине плеча при «звездных»  $\alpha = 1,682$ , получили уравнения регрессии, адекватно описывающие процесс гранулирования для рецепта «55—3»:

$$y_1 = 131,0 + 3,2x_1 - 2,0x_2 - 2,0x_3 - 1,9x_1^2 - 2,6x_2^2 + 6,2x_3^2 - 0,5x_1x_3 + x_2x_3 + 0,7x_1x_2x_3 \quad (5.5)$$

$$y_2 = 68,4 + 1,3x_1 - 1,8x_2 + x_3 - 0,4x_1^2 - 0,5x_2^2 - 0,9x_3^2 - 0,4x_1x_2 + 0,1x_1x_3 - 0,1x_2x_3 + 0,1x_1x_2x_3 \quad (5.6)$$

Для определения формы поверхности полученные уравнения привели к каноническому виду:

$$y_1 - 133,7 = -2,7x_1^2 - 1,8x_2^2 + 6,3x_3^2 \quad (5.7)$$

$$y_2 - 73,5 = -0,9x_1^2 - 0,6x_2^2 - 0,2x_3^2 \quad (5.8)$$

Применяя метод сечений, получили параметры уровней равного выхода поверхностей отклика процесса гранулирования для обоих критериев оптимальности. Для нахождения оптимального решения применили метод множителей Лагранжа, как наиболее удобный для решения задачи для случая, когда ограничения трудно использовать для исключения свободных параметров. Задавись значением  $y_1 = 133$  А по методу Ньютона, нашли условный экстремум для функции, определяющей  $y_2$ . В результате решения на ЭВМ были получены значения параметров, которые были реализованы в производственных условиях Белгород-Днестровского комбикор-

мового завода  $y_1 = 133 \text{ А}$  и  $y_2 = 0,71 \cdot 10^5 \text{ Па}$ , при  $Q = 6,92 \text{ т/час}$   
 $G = 0,46 \text{ т/час}$  и  $P = 4 \cdot 10^5 \text{ Па}$ .

При реализации полученных оптимальных условий усовершенствованной автоматической системой управления годовая экономия составляет 5210 рублей в год на один пресс. Окупаемость составляет 0,41 года. Создание САУ позволяет повысить производительность прессы ДГ-1 в 1,5 раза, уменьшить расход пара на одну тонну гранулируемого продукта с 60 до 45,7 кг и снизить затраты энергии при этом с 17,3 до 12,35 копеек.

Статические свойства прессы-гранулятора как объекта автоматического регулирования, были определены экспериментально. После соответствующей обработки экспериментальных данных получены коэффициенты передачи по основным и дополнительным каналам регулирования, которые оказались равными:

$$k_{Q1} = 5,0 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{ х.р.о.}; \quad k_{Q\theta} = 1,6 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{ х.р.о.};$$

$$k_{G\theta} = 0,8 \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{ х.р.о.}; \quad k_{G1} = \text{ } ^\circ\text{C}/\% \text{ х.р.о.}$$

Динамические свойства объекта получены обработкой кривых разгона, записанных на ленточных диаграммах самопишущих приборов при ступенчатых изменениях производительности прессы  $Q = \pm 0,5 \text{ т/час}$  и давлении пара перед вентилями  $P \pm 0,5 \text{ кг/см}^2$  от номинальных значений. После аппроксимации динамических характеристик каналов объекта, элементарными динамическими звеньями были получены передаточные функции с учетом полученных ранее коэффициентов передачи

$$W(p)_{Q1} = \frac{5e^{-7p}}{18p+1}; \quad W(p)_{Q\theta} = \frac{1,6e^{-18p}}{32p+1};$$

$$W(p)_{G\theta} = \frac{0,8e^{-11p}}{49p+1}; \quad W(p)_{G1} = \frac{3,3e^{-6p}}{16,7p+1}.$$

В условиях соизмеримости коэффициентов передачи и временных параметров, необходимо учитывать динамические связи основных каналов через дополнительные.

Полученные статические и динамические свойства объекта были использованы при синтезе системы автоматического регулирования. Техническое состояние и конструктивные особенности прессы, характеристика гранулируемого продукта учитываются уставками регуляторов.

В главе шестой изложены вопросы системного подхода к решению задачи улучшения качества хлеба из муки с очень крепкой клейковиной при различных способах тестоведения.

Технология хлебопечения, несмотря на сравнительно простую принципиальную структурную схему производства хлеба, является сложным процессом и определяется большим числом факторов, по-разному и не всегда определенным образом оказывающих влияние на качество готового хлеба на разных стадиях производства. При постановке задачи получения высококачественной готовой продукции критериями оптимальности должны являться принятые стандартные показатели качества хлебобулочных изделий. Качество хлеба в соответствии с требованиями стандартов оценивают различными объективными и субъективными показателями: влажностью  $w$ , кислотностью  $K_n$ , пористостью  $P_0$ , удельным объемом  $V_y$ , отношением высоты к диаметру  $H/D$ , внешним видом изделий  $B_n$ , состоянием мякиша  $C_{oc}$ , вкусом  $B_{ky}$ , запахом  $Z_a$  и пр. Качество технологического процесса можно характеризовать различными показателями эффективности и показателями различных затрат: энергии  $E_s$  и пр.  $E_r$ .

Считая, что соотношение количества муки, воды и поваренной соли строго регламентировано для каждого вида изделий рецептурой, основное влияние на качество хлеба могут оказывать качественные показатели сырья и в первую очередь перерабатываемой муки  $k_m$ . Дрожжи, обогатители и улучшители оказывают влияние на качество хлеба как качественными, так и количественными (соотношением) показателями  $k_d$ ,  $k_o$ ,  $k_y$ ,  $q_d$ ,  $q_o$ ,  $q_y$  и пр. Кроме того, воздействие на качество хлеба оказывают такие факторы, как расход энергии на замес теста, режимы брожения опары и теста, режимы разделки, расстойки и выпечки.

Все эти факторы оказывают различное воздействие на качество хлеба в зависимости от способа тестоведения (опарный, безопарный, непрерывный, порционный и пр.), вида опары (обычная, большая, малая, густая, жидкая) и способа разделки теста и выпечки хлеба.

Способ приготовления теста, его разделки и выпечки хлеба, а также вид опары определяются сортом изделия, наличием оборудования и принятой технологией. Факторы, определяемые количеством и качеством дрожжей, улучшителей и обогатителей, а также параметрами тестоведения, могут

быть изменены непрерывно либо дискретно, что позволяет выявить их влияние на качество хлеба. Характер их влияния может быть либо детерминированным, либо вероятностным.

Существующие теоретические представления о процессе приготовления хлеба не позволяют аналитически установить количественные связи между различными факторами, показателями качества хлеба и показателями качества технологического процесса. При исследовании технологических процессов в хлебопечении задачи получения пшеничного хлеба хорошего качества из муки, отклоняющейся от нормальной по хлебопекарным свойствам (излишне крепкая либо слабая клейковина и пр.), или интенсификация процессов приготовления теста, можно отнести к частным задачам технологии, которые проще можно решить на моделях.

При постановке задачи интенсификации созревания теста с целью улучшения качества пшеничного хлеба при переработке муки с очень крепкой клейковиной и при ускоренном тестоведении путем повышения гидратации теста и воздействия на него восстанавливающими и окисляющими веществами в работе методами многофакторного планирования экспериментов составлено несколько математических моделей.

При решении задачи улучшения качества хлеба из муки с короткорвущейся клейковиной предварительные опыты показали, что из накапливающихся при брожении теста продуктов наиболее препятствуют ослаблению теста кислоты. В связи с этим применили метод набухания муки в бездрожжевом полуфабрикате. Для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на качество хлеба, приготовленного на бездрожжевом полуфабрикате, были поставлены поисковые опыты. При этом установлено, что наибольшее влияние на качество хлеба оказывают количество вносимых дрожжей  $x_1$  (%), количество замешиваемой муки  $x_2$  (%), температура набухания муки в полуфабрикате  $x_3$  (°C), количество фосфатидного концентрата, вносимого в полуфабрикат  $x_4$  (%), длительность брожения теста перед разделкой  $x_5$  (час.) и длительность набухания муки  $x_6$  (час.).

Реализовав матрицу планирования типа  $2^{6-3}$ , получили уравнение регрессии, устанавливающее зависимость удельного объема хлеба ( $y$ ) от перечисленных факторов:

$$y = 239,2 + 4,4x_1 + 4,5x_2 + 4,7x_3 + 14,5x_4 - 2,7x_5 + 4,7x_6 \quad (6.1)$$

Из-за незначимости коэффициента регрессии при  $x_5$  дли-

тельность брожения теста перед разделкой обеспечивали не менее одного часа для определенного созревания теста, которое необходимо для получения хлеба с нормальными вкусовыми свойствами. Из-за реализации реплики высокой степени дробности осталось небольшое число степеней свободы для проверки адекватности линейного приближения. Очевидно, поэтому линейное приближение оказалось неадекватно ( $F_p = 7,6$  при табличном  $F_T = 5,3$ ). Крутое восхождение проводили, исходя из того, что коэффициенты регрессии при линейных членах уравнения оцениваются независимо от парных взаимодействий. Это дает возможность провести крутое восхождение при неадекватности линейной модели. Наибольший удельный объем хлеба получили в 12-м опыте крутого восхождения, равный  $375 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ . Технологические параметры этого опыта были приняты оптимальными и взяты для приготовления теста на бездрожжевом полуфабрикате. При этом замешивали 60% муки, 1,4% фосфатидного концентрата, добавляли всю воду по рецептуре и в течение 1—2 мин. замешивали бездрожжевой полуфабрикат, который выдерживали 3,5 часа при 30°C. После этого в полуфабрикат вносили соль, сахар, 2,3% прессованных дрожжей и перемешивали 1 мин. В последнюю очередь добавляли остальную муку и замешивали тесто при расходе энергии 50 дж/г. Брожение теста перед разделкой составляло 1,5 часа при 32—33°C.

По сравнению с контрольным образцом упругость опытного теста по альвеографу уменьшилась на 22%, а растяжимость увеличилась на 25%. Уменьшились также удельная работа деформации и консистенция по фаринографу и пенетрометру, модули (упругости, эластичности и равновесный) и вязкость, что свидетельствует о большем ослаблении теста, приготовленного на бездрожжевом полуфабрикате по сравнению с опарным.

Для решения задачи подбора рецептуры улучшителей для получения оптимального сочетания газообразующей и газодерживающей способности, обеспечивающих лучшее качество хлеба из образцов муки с короткорвущейся клейковиной и низким газообразованием, были также использованы методы экстремального планирования экспериментов. При подборе оптимальной рецептуры улучшителей качества хлеба был поставлен планируемый эксперимент  $2^{4-1}$  для четырех переменных: количества дрожжей  $x_1$  и цистеина  $x_2$ , количества сахара  $x_3$  и маргарина  $x_4$ , влияющих на газообразование и на газодерживание.

Вычисленный доверительный интервал коэффициентов регрессии показывает их значимость, за исключением коэффициента регрессии при четвертой переменной. Наилучший удельный объем хлеба,  $280 \text{ см}^3/100 \text{ г}$ , получен в опыте № 5 матрицы планирования. Эксперимент, поставленный в центре планирования, дал значение  $y=272$ . Разность ( $U_{\text{ср}} - U_0 = 19,2$ ), что указывает на определенную кривизну поверхности отклика в области постановки эксперимента, так как  $U_{\text{ср}} - U_0$  значительно превышает ошибку опыта ( $19,3 \geq 6,5$ ). Вычисленные коэффициенты регрессии для парных взаимодействий отличаются от нуля и превышают ошибку в их определении, имея тот же порядок, что и коэффициенты при линейных членах уравнения регрессии. Эти данные указывают на явно криволинейный характер поверхности отклика в области постановки эксперимента. Можно полагать, что планирование поставлено в околооптимальной области и для ее описания необходимо применить уравнение второго порядка. Проверка по F-критерию также подтверждает неадекватность линейной модели: вычисленное значение  $F=11,3$ , при табличном — 4,10. Крутое восхождение осуществлено на основании тех же предпосылок, что и в предыдущем случае.

Опыты по крутому восхождению подтвердили предположение о том, что планирование поставлено в околооптимальной области. В данном случае крутое восхождение оказалось излишним. Оптимальными величинами переменных приняли следующие: дрожжи — 2,4%, сахара — 4%, цистеин — 0,01%, маргарин — 1%. В результате проведенного планирования получили уравнение регрессии:

$$y = 252,7 + 7,60x_1 - 9,4x_2 + 5,6x_3 - 1,4x_4 \quad (6.2)$$

Таким образом, из восьми опытов получили оптимальное соотношение факторов, позволившее получить удельный объем хлеба, равный  $280 \text{ см}^3$ . При проверке оптимальных дозировок ингредиентов (без применения жира) с приготовлением теста на жидком полуфабрикате получили увеличение объема хлеба на 33,3%.

При подборе рецептуры улучшителей качества хлеба выбрали:  $x_1$  — дрожжи и ферментный препарат авамозин —  $x_3$ , влияющие на газообразующую,  $x_2$  — цистеин и фосфатидный концентрат (ПАВ) —  $x_4$  на газодерживающую способность теста. В результате реализации матрицы типа  $2^{4-1}$  получили значимые коэффициенты регрессии, за исключением коэффициента при  $x_4$ . Линейное приближение оказалось

адекватным ( $F_p = 3,8 < F_t = 4,1$ ), а процесс описывается уравнением регрессии:

$$y = 306 + 8,7x_1 + 20,0x_2 + 11,2x_3 + 2,5x_4 \quad (6.3)$$

В результате крутого восхождения получили оптимальный удельный объем хлеба  $V_y = 385 \text{ см}^3$  при следующих дозировках: дрожжи — 2,2%, цистеин — 0,015%, авамозин — 0,005% и фосфатидный концентрат — 0,4%.

Исследовали возможности ускоренного приготовления высококачественного хлеба при переработке отечественного сырья с применением цистеина и бромата калия, а также молочной сыворотки без усиленной механической обработки теста и органических кислот. Хлеб готовили из образца муки средней силы и образца сильной высокобелковой муки. Переменными факторами в рецептуре хлеба были улучшители, способствующие ускоренному созреванию теста: дрожжи —  $x_1$ , цистеин —  $x_2$ , фосфатидный концентрат —  $x_3$ , бромат калия —  $x_4$ , ферментный препарат —  $x_5$ , сахар —  $x_6$ , а также удельный расход энергии на замешивание теста —  $x_7$ . Мука (100%), вода (57%), соль (1,3%), растительное масло (5%), сухая молочная сыворотка (4%) были приняты постоянными факторами. После замешивания тесто формовали, ставили в расстойку и выпекали хлеб обычным способом.

Реализация матрицы планирования показала незначимость коэффициентов регрессии при переменных  $x_3$  и  $x_5$ , что может быть объяснено влиянием постоянных факторов рецептуры — растительного масла и сахара. Поэтому следующую матрицу планирования составили, исключив из рецептуры сахар и жир. Реализовав вторую матрицу планирования, получили значимые коэффициенты регрессии, но фосфатидный концентрат и ферментный препарат не показали положительного влияния на удельный объем хлеба. В результате процесс описывали уравнением регрессии:

$$y = 444,5 + 25x_1 + 113x_2 + 1,5x_3 + 2,6x_4 - 14x_5 - 32x_7 \quad (6.4)$$

Проведенные по четырем переменным опыты по крутому восхождению дали незначительное увеличение выхода оптимизируемой величины. Высокий удельный объем хлеба в опытах и незначительное увеличение выхода при крутом восхождении дают основания полагать, что эксперименты были поставлены в околооптимальной области. Учитывая, что результаты опытов матрицы планирования обеспечивают достаточно высокий выход при небольшом расходе энергии на замес, опти-

малым значением переменных были взяты результаты опыта, в котором расход энергии на замес был наименьшим. Получена следующая оптимальная рецептура приготовления хлеба ускоренным способом: (% к массе муки) — мука — 100, вода — 57, дрожжи — 2,5, соль — 1,3, фосфатидный концентрат — 0,5, сухая молочная сыворотка — 3,2, цистеин — 0,004, бромат калия — 0,004. Расход энергии на замес теста при этом составляет 27 дж/г. Расстойка теста длится 49—50 мин. Режим выпечки — обычный. Удельный объем хлеба получен равным 500 см<sup>3</sup>.

В соответствии с разработанными рецептурой и параметрами технологического процесса готовили тесто ускоренным способом и выпекали формовой хлеб. Физические свойства теста, ряд его биохимических показателей, а также качество хлеба сравнивали с соответствующими показателями теста и хлеба, приготовленными по опарному способу тестоведения. При этом существенного отличия в физических свойствах теста, приготовленного ускоренным и опарным способами, не наблюдалось.

Предложенные математические модели описывают отдельные стороны процесса тестоведения, представляют в более компактном виде информацию о весьма сложных процессах производства хлеба. Тем не менее математические модели, полученные методами экстремального планирования экспериментов, позволили при сравнительно небольшом количестве опытов и с меньшими затратами получить все необходимые данные для анализа отдельных сторон процесса и выбора решения. Они позволили также с большей надежностью реализовать переход от лабораторных опытов к производственным условиям. Так, в течение одного года были решены и внедрены в производство мероприятия по улучшению качества хлеба из нестандартной муки и ускоренному приготовлению на опытном хлебозаводе ВНИИХПа в г. Москве, хлебозаводе № 1 в г. Барнауле и хлебозаводе № 2 в г. Одессе. В результате исследования разработана инструкция по улучшению качества хлеба, вырабатываемого из муки с крепкой и короткорвущейся клейковиной.

По расчетам годовая экономия при внедрении ускоренного способа тестоведения (с применением молочной сыворотки), а также для выработки сдобных изделий (без органических веществ) составит 0,2—0,5 руб. на 1 т изделий, если не учитывать стоимость цистеина и уменьшение расхода энергии

на замес теста. При выработке хлеба ускоренным способом из муки пониженного качества экономический эффект может быть повышен за счет увеличения выхода хлебобулочных изделий.

## Выводы

1. На основе анализа существующих методов исследования технологических процессов показана возможность и целесообразность применения системного подхода к исследованию технологических процессов переработки зерна и продуктов этой переработки, позволяющего применить наиболее общие методы и средства описания объектов исследования, унифицированные формы сбора, обработки и представления информации о протекании технологических процессов, а также решить задачи по совершенствованию и частичному устранению неопределенности путем комплексного использования существующих методов исследования технологических процессов.

2. В результате исследования разработаны средства описания отдельных участков технологических процессов зерноперерабатывающих предприятий и хлебозаводов, представляющие в математической форме связи между входными и выходными параметрами, а также средства перехода от исходной формы уравнений к форме, пригодной для решения задач: а) поиска оптимальных режимов сушки зерна; б) раскрытия механизма взаимодействия отдельных параметров при последовательном измельчении зернопродуктов и поиска оптимальных режимов крупобразования; в) установления некоторых общих закономерностей протекания процесса мойки зерна и очистки моечной воды; г) поиска оптимальных режимов процесса гранулирования; д) поиска оптимальных условий приготовления хлеба при разработке некоторых способов улучшения его качества и интенсификации процессов тестоведения.

3. Разработанные средства и методы описания являются общими для приближенного поиска оптимальных режимов сушки зерна различных культур в наиболее распространенных типах зерносушилок, для математического описания изменения концентрации различных примесей во всех существующих технологических схемах мойки зерна и очистки моечной воды, для описания взаимного влияния параметров при последовательном измельчении зернопродуктов и поиска оптималь-

ных условий процессов измельчения, для поиска оптимальных режимов гранулирования различных продуктов и оптимальных условий тестоведения.

4. Составленные различными способами, математические модели участков технологических зерноперерабатывающих предприятий и хлебозаводов процессов нашли применение:

- а) при разработке оптимальных режимов сушки зерна в шахтных зерносушилках с предварительным подогревом;
- б) при разработке гравитационного способа очистки мочечной воды и совершенствовании универсальной системы управления, пригодной для всех способов очистки мочечной воды;
- в) при выяснении взаимного и совокупного влияния различных параметров вальцового станка на процесс измельчения и поиска оптимальных режимов процесса крупобразования;
- г) при исследовании возможности гранулирования сухих кормовых дрожжей, при поиске оптимальных условий гранулирования комбикормов и при совершенствовании систем управления прессом-гранулятором; д) при разработке способов улучшения качества хлеба из муки с крепкой и короткорвущейся клейковиной.

5. Системный анализ и составленные математические модели отдельных участков технологических процессов позволили значительно сократить, упростить и унифицировать формы сбора, представления и переработки информации путем построения наиболее общих и простых структур исследуемых участков, одновременного учета влияния только необходимого количества факторов на процесс, установлением и упрощением математических связей между факторами, установлением функции соответствия между отдельными параметрами, а также частично устранить неопределенность путем рассмотрения и анализа всех возможных входных и выходных параметров участка, путем выявления и организации обратных отрицательных технологических связей и совершенствованием систем управления участками.

Результаты исследования прошли производственные испытания, внедрены в производство и позволили повысить технико-экономические показатели следующих технологических процессов.

Оптимальные режимы сушки зерна реализованы методом предварительного подогрева на шахтных зерносушилках при сушке различных культур на Пикетинской реалбазе Омского управления хлебопродуктов, Нарткалинском и Терекском

хлебоприемных предприятиях Кабардино-Балкарской АССР и Тернопольской реалбазе хлебопродуктов УССР. Производительность зерносушилок при применении рекомендованных режимов повышается на 20—65%. Годовая экономия составляет 4,6 тыс. руб. на одну сушилку нормальной производительности 24 т/час при сроке окупаемости около 2-х лет.

Гравитационный способ очистки мочечной воды испытан на Ясиновском комбинате хлебопродуктов, а также испытан и внедрен на Тростянецком мелькомбинате Украинской ССР. Экономия от внедрения способа составила 50 тыс. руб. при сроке окупаемости 1,7 года для мельниц производительностью 200 т/сутки.

Разработанная методика моделирования процессов крупобразования была использована при переходе с односортового 85%-ного помола на двухсортовый 78%-ный мельницы в г. Кунгуре Пермской области, что позволило наряду с другими мероприятиями увеличить выход муки первого сорта при сохранении производительности и дало экономию 91,5 тыс. руб. для мельницы производительностью 150 т/сутки зерна. Опыт этой мельницы приказами министра заготовок СССР № 428 от 30 декабря 1972 г. и № 277 от 11 сентября 1972 г. обобщается и рекомендуется для внедрения.

Режимы гранулирования сухих кормовых дрожжей и комбикормов проверены в производственных условиях Давлекановского мельзавода Башкирской АССР, Кишиневского, Кировоградского и Белгород-Днестровского комбикормовых заводов. Совершенствованная автоматическая система управления испытана и внедрена на Белгород-Днестровском комбикормовом заводе. Экономический эффект от внедрения процесса гранулирования сухих кормовых дрожжей по заводу биосинтеза производительностью 250000 тонн в год составляет 627,7 рубля, а соответствующая годовая экономия в комбикормовой промышленности составит 111,2 тыс. руб. Годовая экономия от внедрения системы автоматического управления одним прессом-гранулятором составляет 5210 руб.

Предложенные способы улучшения качества хлеба и интенсификации технологического процесса прошли производственную проверку на хлебозаводах № 2 в г. Одессе и № 1 в г. Барнауле. В результате исследований разработана инструкция по улучшению качества пшеничного хлеба, вырабатываемого из сортовой муки с крепкой и короткорвущейся клейковиной, которая в 1969 г. была утверждена Главным управлением хле-

бопекарной, макаронной и дрожжевой промышленности Министерства пищевой промышленности СССР. Рекомендованные способы улучшения качества хлеба и интенсификации процессов тестоведения позволяют снизить затраты на выработку изделий. Применение бездрожжевого полуфабриката снижает затраты на 1,42 руб., и ускоренного тестоведения — на 0,2—0,5 руб. при выработке 1 т изделий.

Основное содержание работы опубликовано в следующих работах:

1. Производительность вальцового станка в зависимости от величины подачи продукта к вальцам. Труды ОТИ, т. XI, Одесса, 1959.
2. Интенсивность измельчения зернопродуктов в зависимости от загрузки вальцового станка. Известия вузов «Пищевая технология», № 4, 1959 (в соавторстве с А. В. Панченко и Л. И. Котляром).
3. Влияние подачи продукта на показатели работы вальцового станка. Известия вузов «Пищевая технология», № 5, 1959.
4. Энергосиловые показатели процесса измельчения в вальцовом станке. Бюллетень «Пищевое машиностроение», № 13, М., 1960.
5. Обезвоживание осадков при химико-механической очистке вод после мойки зерна. Известия вузов «Пищевая технология», № 4, 1968 (соавтор О. В. Тешитель).
6. Планирование многофакторных экспериментов в хлебопечении, «Хлебопекарская и кондитерская промышленность», № 8, 1968 (соавторы: Г. Ф. Козлов, В. В. Щербатенко и др.).
7. Интенсификация процесса созревания теста. «Хлебопекарная и кондитерская промышленность», № 7, 1969 (соавторы: Г. Ф. Козлов, В. В. Щербатенко и др.).
8. Оптимизация процесса осветления при рециркуляции вод после мойки зерна. Сборник «Пищевая промышленность», № 10, Киев, 1969 (соавтор О. В. Тешитель).
9. Влияние цистеина на формоудерживающую способность теста и ее оптимизацию. Известия вузов «Пищевая технология», № 5, 1969 (соавторы: Г. Ф. Козлов, В. В. Щербатенко и др.).
10. Влияние влажности и давления прессования на реологические свойства сухих кормовых дрожжей. Сборник трудов «ВНИИСинтезбелок», «Транспортировка и хранение кормовых дрожжей», М., 1970 (соавторы: А. Д. Чмырь, А. И. Шиянов, И. А. Настагунин, А. И. Рыбак).
11. Упруго-вязкие свойства гранул кормовых дрожжей. Сборник трудов «ВНИИСинтезбелок», «Транспортировка и хранение кормовых дрожжей», М., 1970 (соавторы: А. Д. Чмырь, А. И. Шиянов, И. В. Настагунин).
12. К вопросу о математическом моделировании процессов сушки зерна. Известия вузов «Пищевая технология», № 6, 1971.
13. Резервы экономии воды в процессе мойки зерна. Брошюра ЦНИИТЭИ Минзага СССР, М., 1971 (соавтор О. В. Тешитель).
14. Оптимизация процесса гранулирования сыпучих смесей. Материалы II Всесоюзной конференции «Механика сыпучих материалов», Одесса, 1971 (соавторы: И. И. Игнатенко, А. И. Рыбак).
15. Исследование структурно-механических свойств гранулирования комбикормов. Материалы II Всесоюзной конференции «Механика сыпучих

материалов», Одесса, 1971 (соавторы: И. И. Игнатенко, А. И. Рыбак, А. Д. Чмырь).

16. Способ получения дрожжей. Авторское свидетельство № 315719. «Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки», № 29, 1971 (соавторы: А. Д. Чмырь, А. И. Шиянов и др.).

17. Приготовление ускоренным способом булочных изделий, содержащих в рецептуре сахар и жир. Известия вузов «Пищевая технология», № 2, 1972 (соавторы: Г. Ф. Козлов, В. В. Щербатенко и др.).

18. Определение оптимальных условий гранулирования комбикормов. Сборник «Хранение и переработка зерна», № 1, М., 1972. ЦНИИТЭИ Минзага СССР (соавторы: А. И. Рыбак, И. И. Игнатенко).

19. Применение экстремального эксперимента для оптимизации процесса гранулирования кормовых дрожжей. Сб. «Хранение и переработка зерна», М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, вып. 3, 1972 (соавторы: А. Д. Чмырь, А. Д. Дятлов).

20. Эффективность обеззараживания рециркулируемой воды после мойки зерна при очистке ее химико-механическим способом. Известия вузов «Пищевая технология», № 2, 1972 (соавтор О. В. Тешитель).

21. Исследование влияния исходных характеристик сыпучего продукта на прочностные свойства гранул при гранулировании. Сборник «Хранение и переработка зерна», № 2, ЦНИИТЭИ Минзага СССР, 1972 (соавторы: А. И. Рыбак, А. Д. Чмырь, И. И. Игнатенко).

22. Использование метода многофакторного эксперимента при исследовании драного процесса. М., Труды ВНИИЗ, № 74, 1972 (соавторы: П. П. Тарутин, А. И. Кондратьев, П. Г. Черныш).

23. Эффективность работы мельничного вальцового станка на первых драных системах. Сб. «Хранение и переработка зерна», М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, вып. 3, 1972 (соавторы: П. П. Тарутин, П. Г. Черныш).

24. Сушка кукурузы с предварительным подогревом. «Кукуруза», № 11, 1972 (соавторы: В. И. Алейников, Г. Н. Станкевич).

25. К оптимизации сушки зерна. Сб. «Актуальные вопросы послеуборочной обработки и хранения зерна». Тезисы докладов II Всесоюзного научно-технического совещания. М., 1973 (соавтор В. А. Одинокоев).

26. Предварительный подогрев зерна повышает производительность зерносушилки. «Мукомольно-элеваторная и комбикормовая промышленность», № 6, 1973 (соавторы: В. И. Алейников, М. Г. Спиридонова).

27. Эффективность осветления рециркулируемых вод после мойки зерна, при очистке ее химико-механическим способом. Сб. «Пищевая промышленность», вып. 16, «Техніка», Киев, 1973 (соавтор О. В. Тешитель).

28. Математическое описание динамики очистки и рециркуляции воды при мойке зерна. Известия вузов «Пищевая технология», № 3, 1973 (соавторы: О. В. Тешитель, Л. Я. Дяченко, И. И. Игнатенко).

29. Системный анализ приемных устройств элеватора. Сб. «Хранение и переработка зерна», М., ЦНИИТЭИ Минзага СССР, вып. 2, 1973. (соавторы: В. Е. Комов, В. Б. Фасман, В. Г. Лебединский).

30. Многофакторное планирование в области технологии хлебопечения. «Хлебопекарная и кондитерская промышленность», № 7, 1973» соавторы: Г. Ф. Козлов, В. А. Патт, В. В. Щербатенко и др.).

#### Материалы диссертации доложены:

1. На научных конференциях ОТИПП им. М. В. Ломоносова в 1958—1973 гг.

2. На заседаниях технических советов Министерств заготовок РСФСР и УССР в 1967—1973 гг.

3. На Всесоюзной межвузовской конференции по использованию новых физических методов в пищевой промышленности (Москва, июнь, 1967 г.).

4. На Всесоюзной научной конференции по физико-химической механике в пищевых производствах (Москва, июнь, 1969 г.).

5. На заседании ученого совета ВНИИКП (Воронеж, март, 1969).

6. На научной конференции ВНИИКП (Воронеж, апрель, 1970).

7. На заседании технического совета Кабардино-Балкарского управления хлебопродуктов (Нальчик, июнь, 1971).

8. На II Всесоюзной конференции по механике сыпучих материалов (г. Одесса, ноябрь, 1971).

9. На научной конференции ВНИИКП (г. Воронеж ноябрь, 1972).

10. На II Всесоюзном научно-техническом совещании по актуальным вопросам послеуборочной обработки зерна (Москва, апрель, 1973).