

МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ

УДК 621.047: 621.926

ШУЛЯК Виктор Анатольевич

**НАУЧНО- ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
СОЗДАНИЯ КОМБИНИРОВАННЫХ АГРЕГАТОВ ДЛЯ СУШКИ И
МЕХАНОТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПИЩЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.18.12 - процессы и аппараты пищевых производств

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Могилев, 2004

Работа выполнена в Могилевском государственном университете
продовольствия (МГУП).

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор кафедры
машин и аппаратов пищевых производств Могилевского
государственного университета продовольствия
ИВАНОВ Александр Васильевич

Доктор технических наук, профессор, заведующий
кафедрой процессов и аппаратов пищевых производств
С. Петербургского государственного университета
пищевых и низкотемпературных технологий
АЛЕКСЕЕНКО Валентин Геннадьевич

Доктор технических наук, профессор, кафедры
машин и аппаратов химических производств Белорусского
государственного технологического университета
ЛЕВДАНСКИЙ Эдуард Игнатьевич

Ведущая организация:

Национальный университет пищевых технологий
(Украина, г. Киев)

Актуальность темы диссертации. Создание новых продуктов питания обусловлено не только коммерческим интересом производителей, заинтересованных в завоевании новых рынков, но и необходимостью в создании продуктов лечебно-профилактического, диетического питания и для питания людей, работающих в экстремальных условиях. Такие продукты создают с использованием специальных пищевых добавок, и они характеризуются сочетанием определенных свойств: пищевая ценность, длительный срок хранения, компактность и т. д. Наиболее технологичной формой пищевых добавок является высокодисперсная - порошковая. В сухих продуктах замедляются микробиологические процессы, ухудшающие их качество, порошки легко фасуются, дозируются, удобны в хранении и транспортировке.

Республика Беларусь относится к странам с развитой перерабатывающей промышленностью. В связи с этим, разработка новых высокоэкономичных способов и оборудования для производства натуральных высококачественных пищевых порошков, непосредственно из сырья растительного происхождения, является актуальной научной и народнохозяйственной задачей.

Один из путей в этом направлении - комплексная переработка натурального растительного сырья.

Основным фактором, определяющим качество натуральных пищевых добавок, является содержание в них витаминов, и других ценных компонентов. В процессе промышленной, в особенности тепловой, переработки растительного сырья происходит значительная потеря содержащихся в нем биологически ценных веществ.

В связи с этим, интенсификация процессов переработки, сокращение их длительности, повышение равномерности обработки отдельных частиц позволит резко повысить качество готовых порошков в целом.

Анализ современного состояния технологии порошковых материалов позволил нам выбрать пути интенсификации существующих и создания новых методов переработки сырья, сочетающих в себе непрерывное механическое и термическое воздействие при трансформации одного вида энергии в другой. Эта группа методов, применительно к пищевым порошковым и пастообразным материалам, получила название механотермической обработки дисперсных сред и материалов - МТО.

При проведении процессов сушки, термообработки, экстракции, сублимации и многих других, скорость процессов переноса тепла, энергии, массы, импульса прямо пропорциональна удельной поверхности контакта фаз. Анализ существующих методов теплового и механического воздействия на дисперсные материалы и гетерогенные системы позволяет определить основное направление интенсификации многих технологических процессов, протекающих в дисперсных системах, - увеличение межфазной поверхности. Наиболее простой и доступный метод - это механическое измельчение, гидродинамическое взвешивание частиц в дисперсионной среде, проведение процессов в нестационарном режиме.

В большинстве случаев в технологии пищевых производств получение готовых порошковых материалов связано со стадиями подготовки материала (сортировка, очистка), сушки и последующего измельчения. Как правило, в технологической линии стадии подготовки материала и технологической обработки пространственно разнесены. Известно, что совмещение операций или их одновременное выполнение приводит к значительной экономии времени и энергоресурсов. Не все стадии технологического процесса допустимо совмещать друг с другом. Однако, в тех случаях, когда процессы тепло-массо-переноса осуществляются в дисперсных системах, такое совмещение не только целесообразно, но энергетически необходимо. Процессы,

протекающие в одинаковых гидродинамических условиях и требующие близких по физической природе внешних силовых воздействий, должны протекать в едином реакционном пространстве, с использованием единого силового поля.

Настоящая работа посвящена теоретическим и экспериментальным исследованиям процессов сушки и механотермической обработки пищевых материалов, созданию новых комбинированных агрегатов для сушки и измельчения, совмещающих в одном рабочем объеме несколько технологических операций, разработке основ их инженерного расчета и практического применения. Особое внимание уделено вопросам тепловой и низкотемпературной сушки и криогенного измельчения дисперсных материалов.

Связь работы с крупными научными программами, темами. Работа выполнялась в рамках государственных программ прикладных научных исследований «ПЕРЕРАБОТКА», утвержденной Решением Кабинета Министров РБ от 17.01.1997 г. и «СУШКА», утвержденной Постановлением Совета Министров РБ №1218 от 26.09.2003г., а также государственной программы ориентированных фундаментальных исследований «ЭНЕРГИЯ», утвержденной Постановлением Президиума Национальной Академии Наук РБ № 94 от 05.07.2001 г. Отдельные разделы выполнялись по НИР кафедр теплохладотехники с 1985 по 2003 гг. и прикладной механики МГУП с 2003 по 2004 гг., финансируемых из государственного бюджета и из средств заказчиков.

Цель и задачи исследования. Целью работы является разработка теоретических и практических основ создания, расчета и проектирования нового и модернизации существующего оборудования для сушки и механотермической обработки пищевых дисперсных материалов и сред. Для достижения поставленной цели были сформулированы и решены следующие задачи.

Изучение закономерностей протекания механических и тепло- массообменных процессов с участием твердой фазы, приводящих к изменению свойств, структуры или формы дисперсного материала.

Анализ факторов наибольшего влияния на процессы сушки и МТО, выбор путей интенсификации и разработка критериев оптимизации этих процессов.

Системный анализ конструктивных решений и выработка концепции создания нового комбинированного оборудования для конкретного технологического назначения.

Разработка физических моделей и математическое моделирование гидродинамики, тепломассообмена и измельчения частиц в новых комбинированных агрегатах. Развитие теоретических методов расчета этих процессов.

Экспериментальное исследование особенностей гидродинамики, тепломассообмена и механической обработки многофазных сред в новых конструкциях аппаратов для сушки и МТО.

Анализ и обобщение экспериментальных данных, сравнение полученных результатов с теоретическими решениями и определение областей наиболее рационального использования новых типов аппаратов и агрегатов.

Объект и предмет исследования. Объектом исследования являются процессы сушки и МТО в многофазных системах с участием твердой фазы, особенности протекания и аппаратурного оформления этих процессов. В качестве предмета исследований определены закономерности изменения параметров дисперсных систем и эксплуатационные характеристики комбинированных агрегатов в процессе сушки и МТО.

Гипотеза. Предполагалось, что комплексное механическое и термическое воздействие на перерабатываемый материал, активная гидродинамика течения гетерогенных сред и высокая скорость образования новой межфазной поверхности в процессах тепло- и массообмена позволит значительно повысить интенсивность сушки и МТО, при значительном уменьшении энергетических затрат. Проведенные теоретические и экспериментальные исследования высокоэффективных аппаратов для сушки и МТО дисперсных сред полностью подтвердили правильность выдвинутых предположений.

Совмещение в одном рабочем объеме комбинированного агрегата нескольких технологических операций (сушка, измельчение, классификация и сепарация) значительно ускоряет протекание процессов тепломассопереноса, т. к. перенос импульса сопровождается трансформацией механической энергии в тепловую, и использованием этой энергии на транспорт массы или ослабление внутренних связей в обрабатываемом материале.

Методология и методы проведенного исследования. При выполнении диссертационной работы использованы современные методы постановки эксперимента, теоретического анализа гидродинамики двухфазных течений, тепломассообмена и физики разрушения в дисперсных системах, основанные на использовании компьютерной техники на стадии сбора, хранения и математической обработки полученных данных. Численные решения систем дифференциальных уравнений и математический анализ экспериментальных данных выполнялись с помощью пакетов прикладных программ.

Научная новизна и значимость полученных результатов. На основе комплексного анализа процессов переноса в дисперсных системах с участием твердой фазы (дробление, измельчение, тепловая и низкотемпературная сушка, термообработка, смешивание и сепарация частиц), установлено взаимное влияние гидродинамики межфазного контакта, скорости обновления поверхности обмена фаз на интенсивность тепло- и массообменных процессов.

Получены новые теоретические общие и частные решения гидродинамики двухфазных течений в разработанных типах аппаратов для сушки дисперсных материалов.

Получено численное решение задачи сушки частицы переменного радиуса, отвечающей условиям сушки и МТО в аппаратах с интенсивным измельчением.

Разработана физическая и математическая модель сушки и МТО дисперсных материалов при одновременном воздействии тепловых и силовых факторов. Получены аналитические и численные решения дифференциальных уравнений, описывающих изменение энергии связи структурных частиц материала в процессе обработки.

Силовой анализ нагружения частиц дисперсного материала, позволил получить теоретические зависимости изменения разрушающего усилия в процессах МТО.

Получены новые экспериментальные данные по сушке и МТО в новых комбинированных агрегатах, совмещающих в одном рабочем объеме процессы сушки, измельчения, смешивания и выделения готового продукта из зоны обработки.

Разработан новый класс аппаратов и агрегатов для проведения тепло-массообменных, механических и гидромеханических процессов в поле интенсивного механического воздействия на дисперсную фазу. Разработаны новые параметры и критерии сравнительной оценки эффективности различных аппаратов для сушки и МТО.

В работе предложены новые технологические схемы организации процессов вакуумной низкотемпературной, вакуум-сублимационной сушки и криогенного

измельчения пищевых продуктов с использованием нового типа аппаратов с интенсивным механическим измельчением.

Проведен сравнительный анализ существующих и вновь разработанных конструкций по разработанным параметрам влагоэнергетической и технологической эффективности аппаратов, намечены области наиболее рационального их использования.

Новизна полученных теоретических и практических результатов подтверждена 9 авторскими свидетельствами на изобретения СССР, 28 патентами Российской Федерации, включая и патент на новый способ сушки и механотермической обработки, и 8 патентами Республики Беларусь.

Практическая (экономическая, социальная) значимость полученных результатов.

Разработанная методология анализа процессов переноса в дисперсных системах с участием твердой фазы рекомендуется для использования научным работникам и сотрудникам проектных и внедренческих организаций для создания, проектирования и наладки новой высокоэффективной техники сушки, измельчения и сепарации дисперсных материалов. В работе впервые применены нетрадиционные методы теоретического анализа процессов переноса, которые могут найти применение при подготовке инженеров механиков и технологов пищевых производств. Созданы и внедрены в промышленность высокоэффективные комбинированные агрегаты для конвективной и кондуктивной сушки, вентилируемые измельчители и дробилки, совмещенные с пылеулавливающими, сепарирующими и классифицирующими устройствами.

Сушильные агрегаты внедрены на Сопоцкинском, Бродницком, Веселовском, Сновском крахмальных заводах, на Березовском сыркомбинате. Освоен выпуск новых видов продукции и получена экономическая эффективность от внедрения новых видов оборудования. Годовой экономический эффект от внедрения новых сушильных установок составил для крахмальных заводов: Сопоцкинского - 9,64 тыс. рублей (в ценах 1991 г.), для Веселовского -1893 тыс. руб., для Сновского - 1267 тыс. руб. (в ценах 2003 г.), и складывался: из снижения этажности цехов сушки (примерно на - 2...2,5м), занимаемых производственных площадей в 2 раза, повышения производительности на 10-15%, снижения энергопотребления и материалоемкости установок, повышения качества готового продукта.

Кондуктивная низкотемпературная сушилка для пищевых добавок и красителей в 1998 г. прошла производственные испытания на Минском пищевом комбинате «БелКООПСОЮЗ». Ожидаемый экономический эффект от внедрения сушилки в производство пищевых порошков составляет 14 -18 млн. рублей на тонну готовой продукции (в ценах 2004 г.).

Различные смесительные, измельчительные и дробильные аппараты освоены малыми сериями, выпускаются НТК «Млын», ОДО «Гурт» и внедрены более чем на 100 предприятиях РБ, РФ и Украины.

Разработан технологический регламент на производство новых видов продукции: клеевые порошки. На основе технологического регламента разработаны технические условия на производство и налажено новое опытное производство по криогенному измельчению вязкоупругих и пластичных материалов растительного и синтетического происхождения. С 1998 по 2003 гг. в ООО «Микропорошки» выпущено и реализовано более 200 тонн готовой продукции. Годовой экономический эффект от производства за 2003 г. - 5,738 млн. руб. в год.

Теоретические результаты использовались при выработке практических

рекомендаций реконструкции систем пылеочистки на действующей распылительной сушилке на Барановичском пищекомбинате.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

1. Методология сравнительного анализа процессов переноса в дисперсных системах, параметры и критерии оптимизации процессов сушки, измельчения, смешивания и сепарации на основе анализа движущих сил процесса и удельных затрат энергии на единицу объема аппарата (единицу выпускаемой продукции).

2. Классификация методов воздействия на дисперсный материал и основных направлений интенсификации этих воздействий с целью повышения эффективности процессов тепломассообмена.

3. Результаты теоретического анализа и численного эксперимента гидродинамики, тепломассообмена, напряженного состояния и кинетики разрушения частиц дисперсного материала во вновь разработанных аппаратах.

4. Новый способ сушки и новые классы аппаратов для сушки, измельчения, смешивания и механотермической обработки дисперсных материалов и систем.

5. Результаты экспериментальных исследований гидродинамики и тепломассообмена в новых классах комбинированных аппаратов для сушки и МТО и их теоретическое обобщение.

6. Новая криогенная технология и аппаратурное оформление производства порошков из пластичных и вязко-упругих материалов растительного и синтетического происхождения.

7. Области рационального применения новых классов оборудования.

Личный вклад соискателя. Автором диссертации самостоятельно выполнены:

- обобщение и классификация методов силового и теплового воздействия на дисперсный материал в процессах сушки и МТО;

- постановка задач теоретического исследования, формулировка физических моделей аппаратов и процессов;

- проведение численного эксперимента на ЭВМ и анализ полученных решений;

- постановка задач экспериментальных исследований, техническое оснащение эксперимента;

- анализ и математическая обработка полученных экспериментальных результатов;

- разработка новых подходов к созданию и проектированию аппаратов для сушки и механотермической обработки;

- создание основ теории расчета новых типов комбинированных агрегатов;

- проектирование, авторский надзор за изготовлением, монтажом и пусконаладочными работами внедряемых аппаратов;

- подготовка и освоение нового производства тонкоизмельченных порошков.

Теоретические результаты исследования кинетики разрушения частиц в межвитковом пространстве винтовых рабочих органов получены совместно с проф. Сиваченко Л.А., экспериментальные и теоретические результаты исследования процессов МТО в аппаратах с пружинными рабочими органами получены совместно с аспирантом Березюком Д.И.

Апробация результатов работы. Основные результаты теоретических и экспериментальных исследований были доложены на региональных конференциях «Химия пищевых веществ» - Могилев, 1990г., «Ученые и специалисты - народному хозяйству области» - Могилев, 1991,1993 гг., «Совершенствование существующих и создание новых ресурсосберегающих технологий и оборудования в машиностроении,

сварочном производстве и строительстве» - Могилев, 1991г., «Технологические проблемы измельчения и механоактивации» - Могилев, 1992г., «Ресурсосберегающие технологии строительных материалов, изделий и конструкций» - Белгород, 1993г., XIII науч.-техн.конф. МТИ. - Могилев, 1993г., «Экология и ресурсосбережение» - Могилев, 1993г., XXI науч. - техн. конф. в рамках проблемы "Наука и мир" - Брест, 1995г., «Энергоресурсосберегающие технологии переработки сельскохозяйственного сырья» - Минск, 1996г., «Создание ресурсосберегающих машин и технологий» - Могилев, 1996г., Всесоюзных и международных научно-технических конференциях: «Проблемы влияния тепловой обработки на пищевую ценность продуктов питания» - Харьков, 1990г., «Холод - народному хозяйству» - Ленинград, 1991г., «Технологические проблемы измельчения и механоактивации» - Могилев, 1993г., «Криотехнологии и их использование в фармацевтике и пищевой промышленности» - Сумы, 1993г., «I-st international conference of mechanochemistry» - Slovakia, 1993г., «I-ая конференция по сравнению различных видов измельчителей» - Одесса, 1993г., «Комплекс научных и научно-технических мероприятий стран СНГ» (конференция, семинар, школа, выставка).- Одесса, 1993, 1994 гг., «Механохимия и механическая активация. Технологические аспекты» - С.Петербург, 1995г., «Научно-технический прогресс в пищевой промышленности» - Могилев, 1995г., «Развитие строительных машин, механизации и автоматизации строительства и открытых горных работ» - Москва, 1995г., « Минский Междун. Форум "Тепломассообмен" ММФ» - Минск, 1996, 2000г., «Усовершенствование процессов и аппаратов химических, пищевых и нефтехимических производств» - Одесса, 1996г., «Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешения и уплотнения» - Одесса, 1998, 2000г., «Вибротехнология-2000» - Одесса 2000г., Междунар. науч.- техн. конф. «Пищевая промышленность XXI век» - Тольяти, 2001г., Международная научно-техническая конференция «Пища. Экология. Человек», Москва МГУПБ, 2001г., «Физико-химические проблемы керамического производства» - Харьков 2001г., «Сушка и термовлажностная обработка материалов» - Москва, 2002г., «II-Междун. науч.-техн. конф. Техника и технология пищевых производств» - Могилев, 2002 г., «Физико-химия процессов переработки полимеров» - Иваново, 2002 г., «Современные технологии, материалы, машины и оборудование» - Могилев, 2002г. Белорусско-Польский научно практический семинар - Брест 2002 г., «Техника и технология пищевых производств» - Могилев, 1998, 2002, 2003 гг.,

Опубликованность результатов. По теме диссертации опубликовано 124 печатных работы, из них 1 монография, 15 статей в периодических изданиях, 28 статей в трудах и сборниках международных научно-технических конференций, 2 депонированные рукописи, 33 тезисов докладов, 45 патентов и авторских свидетельств на изобретения. Общее количество опубликованных материалов составляет 43 печатных листа.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из общей характеристики работы, четырех глав: анализа основных направлений интенсификации процессов сушки, измельчения и механотермической обработки дисперсных материалов; основных разделов теории расчета аппаратов со встречно вращающимися, встречно-соударяющимися потоками газовой фазы, аппаратов с упруго деформируемыми рабочими органами, вакуумных низкотемпературных и криогенных аппаратов для сушки и МТО, экспериментальных исследований механических и тепло- массообменных процессов в комбинированных агрегатах, анализа опыта промышленной эксплуатации и рациональных областей применения этих аппаратов. Диссертационная работа содержит 263 страниц машинописного текста, 5 таблиц, 180 рисунков и приложения. Список использованных источников – 233 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ. Во вводной части диссертации показана актуальность, научная новизна и практическая значимость работы. Дана характеристика объектов исследования, основной научной гипотезы, целей и задач исследования, а также охарактеризована связь работы с государственными научно-техническими программами, структура и объем диссертации.

ГЛАВА I. В первой главе проведен анализ состояния вопроса и основных направлений интенсификации механической и тепловой обработки пищевых и химических материалов и гетерогенных сред. *Первый раздел* этой главы посвящен механическим и физико-химическим способам увеличения межфазной поверхности при сушке. Дана подробная классификация процессов, приводящих к нарушению сплошности или разрушению материалов и обновлению поверхности испарения влаги. Проведен системный анализ различных механизмов нагружения материалов и синтез принципиально новых, не реализованных в настоящее время способов разрушения и диспергирования. Показаны преимущества импульсных, динамических способов нагружения, преимущества циклических сил переменной амплитуды и частоты и резонансных способов нагружения. Приведены основные конструктивные решения, воплотившие наиболее прогрессивные способы разрушения материалов.

На основе анализа основных статей расхода энергии при разрушении, предложен новый параметр сравнительной оценки помольного и дробильного оборудования: отношение производительности установки по площади вновь образующейся поверхности к занимаемому производственному объему и затратам энергии на процесс измельчения

$$\mathcal{E} = \frac{6 G_M (i-1)}{\rho_M \psi d_3 \cdot V_A \cdot N} \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{с}}{\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кДж}} \right] \text{ или } \left[\frac{1}{\text{м} \cdot \text{кДж}} \right], \quad (1)$$

где G_M – массовая производительность мельницы, кг/с; i – степень измельчения; d_3 – средний эквивалентный диаметр частицы исходного материала, м; ψ – фактор формы частицы; ρ_M – плотность материала, кг/м³; N – потребляемая мощность, кВт; V_A – объем помольной установки, м³.

Либо модификация параметра (1), для случаев сравнения аппаратов измельчающих материалы разной прочности.

$$\mathcal{E}_1 = \frac{G_M}{V_A \cdot N} \frac{(i-1) \sigma^2}{\rho_M 2E}, \left[\frac{\text{м}^2 \cdot \text{с} \cdot \text{кДж}}{\text{с} \cdot \text{м}^3 \cdot \text{кДж} \cdot \text{м}^2} \right] \text{ или } \left[\frac{1}{\text{м}^3} \right], \quad (2)$$

где σ – предел прочности материала, Па; E – модуль Юнга, Па.

По параметру (1) был проведен сравнительный анализ различных типов мельниц и дробилок по имеющимся в литературе техническим характеристикам. Зависимость показателя энергетической эффективности \mathcal{E} от объемной производительности мельницы V_M представлена на рисунке 1.

Зависимости показателя энергетической эффективности \mathcal{E} от производительности мельницы по готовому продукту V_M аппроксимируется степенной функцией вида

$$\mathcal{E} = n V_M^{-1}, \quad (3)$$

где n – численный коэффициент (диапазон изменения от 1 до 1200 м²/кДж).

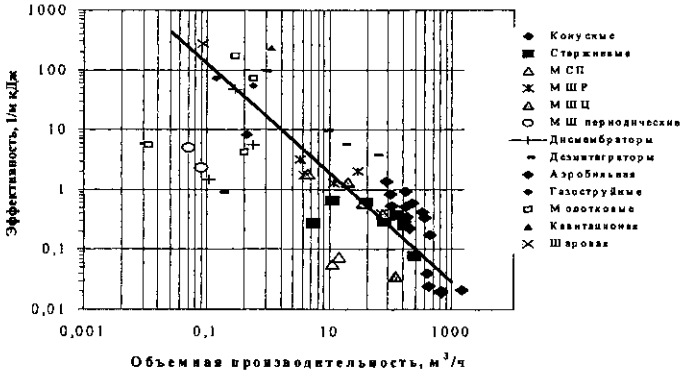


Рисунок 1 – Сравнение различных дробилок и мельниц по показателю энергетической эффективности

Зависимость объема помольного агрегата от объемной производительности, со среднеквадратичным отклонением 0,852, хорошо аппроксимируется функцией вида

$$V_m = 2,42 V_A^{0,92}, \quad (4)$$

то есть, производительность практически прямо пропорциональна объему агрегата. Зависимость показателя энергетической эффективности \mathcal{E} от установленной мощности электродвигателей N аппроксимируется степенной функцией

$$\mathcal{E} = 1608,4 N^{-1,2823}. \quad (5)$$

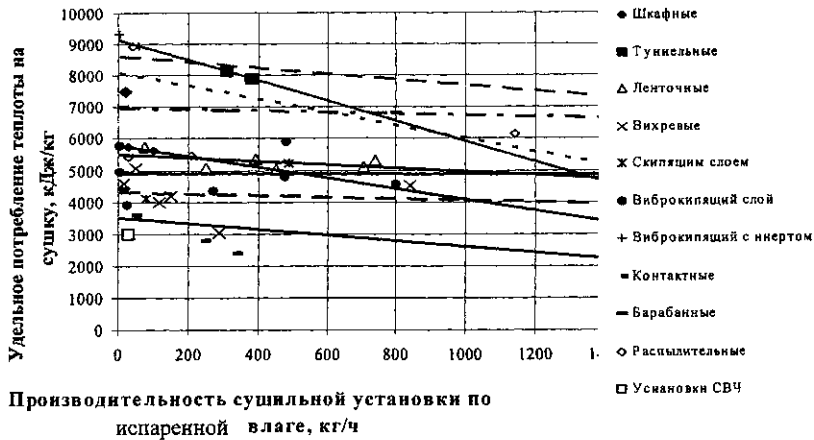
Таким образом, энергетическая эффективность помольных установок падает с увеличением производительности.

Во втором разделе первой главы выполнен анализ методов интенсификации теплового воздействия на материал в процессах сушки и механотермической обработки. Проведен сравнительный анализ сушильных агрегатов по простейшим приведенным показателям: удельное энергопотребление (E_1), удельный расход тепла Q на единицу испаренной влаги W (E_2), удельные затраты электроэнергии на кг испаренной влаги (E_3), удельная материалоемкость (E_4), удельный объем, занимаемый сушильной установкой (E_5). На рисунке 2 представлены результаты сравнения наиболее распространенных типов сушилок по показателю E_2 .

Разработан собственный комплексный параметр сравнения, оптимизации и интенсификации конвективных аппаратов для тепловой сушки и высокотемпературной термообработки дисперсных систем: производительность сушилки по испаренной влаге с 1 м^3 рабочего объема на 1 кВт затрат энергии

$$E = \frac{W}{(Q_{\Sigma} + N)V_{an}}, \quad [\text{кг}/\text{м}^3\text{кДж}], \quad (6)$$

где N – мощность, потребляемая на транспорт теплоносителя, включая рециркуляцию части отработанного сушильного агента, механическое взвешивание и измельчение материала, кВт; V_{an} – объем сушильного агрегата, м^3 .

Рисунок 2 – Удельные затраты тепла на килограмм испаренной влаги (E_2)Рисунок 3 – Зависимость показателя влагоэнергетической эффективности E от производительности сушилки по испаренной влаге W

Анализ графиков зависимости показателя E от W по (Рис. 3) показывает, что функция $E = f(W)$ может быть аппроксимирована простой зависимостью

$$E = AW^{-1}, \quad (7)$$

где A - константа, зависящая от типа сушилки, ее типоразмера и температурного режима сушки, (A изменяется от 1 у барабанных сушилок, до $900 \text{ кг}^2/\text{м}^3 \text{ кВт}$ с у комбинированных сушильных агрегатов со встречно-вращающимися и соударяющимися потоками, типа VСП, ВВП).

В третьем разделе первой главы проанализирована роль сопутствующих процессов (смешивание, сепарация и классификация полидисперсных материалов) при механотермической обработке гетерогенных сред. Приведены собственные конструктивные решения комбинированных агрегатов для осуществления процессов сушки и смешивания, смешивания и термообработки, смешивания и диспергирования. Дан анализ основных направлений интенсификации встроенных в сушильные агрегаты систем пылеочистки и классификации частиц готового продукта, проведен сравнительный анализ различных конструктивных решений. Описаны новые конструкции циклонов и классификаторов.

В четвертом разделе первой главы научно обосновано создание комбинированных агрегатов, совмещающих несколько стадий механотермической обработки (МТО) гетерогенных систем и позволяющих получать порошковые продукты непосредственно из сырьевых материалов. Дан анализ существующих конструкций сушильных аппаратов со встроенными измельчителями и механическими побудителями высушиваемого материала, описан новый способ сушки и МТО на основе аппаратов с упруго-деформируемыми рабочими органами. Показано, что до 10 процентов вводимой энергии на десорбцию влаги может трансформироваться непосредственно путем преобразования части механической энергии в тепловую.

В пятом разделе первой главы приведены результаты исследований и внедрений модернизированных вынесенных и встроенных систем центробежной очистки газов для тонкодисперсных пищевых порошков. При исследовании полей скоростей и давлений модернизированного турбоциклона установлено, что полностью исчезает обратный паразитный вихрь, воздух стекает сплошным потоком по всему сечению выхлопной трубы. В результате, потери энергии на режимах наибольшей эффективности (Рис. 4, 5) снижаются на 30%, а на предельных режимах работы циклона ($w_{\text{кр}} = 3-4$ м/с) – на 50-60%.

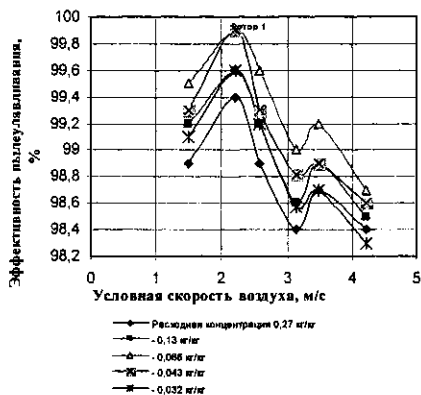


Рисунок 4 – Зависимость эффективности улавливания крахмала в модернизированном турбоциклона от условной скорости газа

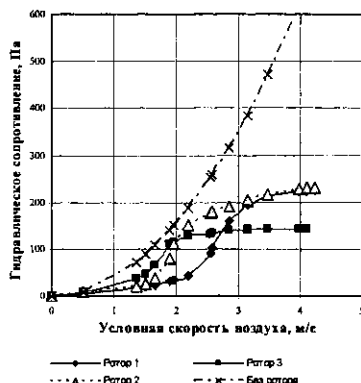


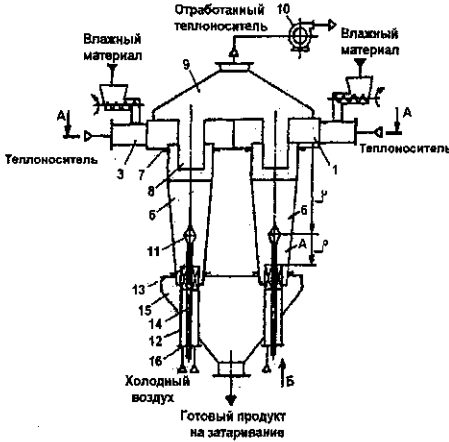
Рисунок 5 – Зависимость гидравлического сопротивления турбоциклона от условной скорости газа

Таким образом, повышение эффективности работы комбинированной установки достигается как за счет интенсификации основного технологического процесса, так и за счет повышения эффективности встроенного вспомогательного оборудования.

ГЛАВА 2. Вторая глава посвящена исследованию процессов сушки пищевых

ГЛАВА 2. Вторая глава посвящена исследованию процессов сушки пищевых материалов, имеющих слабосвязанную структуру и приобретающих сыпучее состояние в процессе сушки, и разработке комбинированных сушильных агрегатов.

В первом разделе второй главы дан обзор новых конструкций сушильных агрегатов со встречно-закрученными и встречно-соударяющимися потоками газозвеси и знакопеременным градиентом давления по периметру крутки. Приведены конструкции установок с выносными и встроенными системами пылеочистки (Рис. 6).



- 1-вихревые камеры;
- 3-разгонные каналы;
- 6-встроенные циклоны;
- 7- пережимной порог;
- 8-выхлопная труба;
- 9-вытяжной коллектор;
- 10-вентилятор;
- 11-выгеснитель;
- 12- патрубок ввода встречного закрученного потока;
- 13-закручиватель;
- 14-штук;
- 15-бункер;
- 16- шиббер.

Рисунок 6 – Установка для сушки и охлаждения порошковых материалов

Во втором разделе выполнен теоретический анализ процессов циркуляции частиц дисперсного материала во встречно-вращающихся закрученных потоках газозвеси на основе упрощенных уравнений движения жидкости или газа.

$$\begin{cases} \rho \frac{\bar{\omega}^2}{r} = \frac{\partial \bar{P}}{\partial r} - \frac{\rho \bar{\omega}'^2}{r} \\ \bar{v} \frac{\partial \bar{\omega}}{\partial r} + \frac{\bar{v} \bar{\omega}}{r} = - \frac{\partial}{\partial r} (\bar{\omega}' \bar{v}') - 2 \frac{\bar{\omega}' \bar{v}'}{r} \end{cases}; \quad (8)$$

$$r \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial (\bar{v} r)}{\partial r} = 0,$$

где ρ -плотность, кг/м³, ω , v , u , ω' , v' - тангенциальная, радиальная, осевая и их пульсационные составляющие скорости потока газа, м/с; P - давление, Па; r, x - радиальная и осевая координаты, м.

Получены численные решения уравнений (8), реализованные на ЭВМ. Начальными условиями были параметры газового потока на входе в камеру, граничными условиями – геометрия камеры и нулевые значения скорости потока на стенках.

Используя теорему об изменении момента количества движения материальной точки, уравнение движения частицы по угловой координате примет вид

$$\begin{cases} \rho_{\psi} \frac{d(\omega_{\psi} \cdot r)}{dr} = r S f_{\psi}; \\ \rho_{\psi} \frac{d\omega_{\psi}}{dt} + \rho_{\psi} \frac{\omega_{\psi} v_{\psi}}{r} = S f_{\psi}, \\ v_{\psi} \rho_{\psi} \frac{dv_{\psi}}{dr} = \rho_{\psi} \frac{\omega^2}{r} - S f_r, \end{cases} \quad (9)$$

где ω_{ψ} , v_{ψ} - проекции скорости частицы на угловую φ и радиальную r координату соответственно, м/с; S - площадь поверхности частицы, м²; f - напряжение трения на поверхности частицы, Па; ρ_{ψ} - плотность частицы, кг/м³.

При сепарации частицы в закрученном потоке и ламинарном режиме обтекания $Re_{\psi} \leq 1$, $\rho = \text{const}$

$$t = -\frac{1}{B} \ln \left(\frac{\omega^2}{r} - B(v - v_{\psi}) \right); \quad v_{\psi} = v + \frac{1}{B} e^{-Bt} - \frac{\omega^2}{Br}; \quad B = \frac{18 \mu \psi}{\rho_{\psi} \cdot d_{\psi}^2}; \quad (10)$$

$$\omega_{\psi} = \exp \left(-arBt - \frac{e^{-Bt}}{B} \right) + B\omega / \left(a + \frac{1}{Br} e^{-Bt} \right).$$

Для развитого турбулентного режима обтекания частицы, при $Re_{\psi} > 1000$.

$$t = \frac{\sqrt{r}}{2\omega\sqrt{B_1}} \cdot \ln \left(\frac{\omega/\sqrt{r} + (v - v_{\psi})\sqrt{B_1}}{\omega/\sqrt{r} - (v - v_{\psi})\sqrt{B_1}} \right); \quad v_{\psi} = \frac{\left(\omega/\sqrt{r} + v\sqrt{B_1} \right) - \left(\omega/\sqrt{r} - v\sqrt{B_1} \right) e^{\alpha t}}{\sqrt{B_1}(1 + e^{\alpha t})};$$

$$B_1 = \frac{\rho}{\rho_{\psi}} S \cdot 0,042; \quad \omega_{\psi} = \exp(B_1 r - 2B_1 \omega - 1) + B_1 \omega^2 / \left(2B_1 \omega + \frac{1}{r} - B_1 \right). \quad (11)$$

Для движения частицы на участке торможения о стенку вихревой камеры, дифференциальное уравнение (9) примет вид

$$\rho_{\psi} \frac{d\omega_{\psi}}{dt} = \rho_{\psi} \frac{\omega_{\psi}^2}{r} \chi - S f_{\psi}, \quad (12)$$

где χ - коэффициент трения частицы о стенку.

Частные решения для ламинарного режима, $Re_{\psi} \leq 1$

$$t = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{\omega_{\psi} \left(B + \frac{\chi}{r} \cdot \omega_{\psi}^* \right)}{\left(B + \frac{\chi}{r} \cdot \omega_{\psi} \right) \omega_{\psi}^*} \right); \quad \omega_{\psi} = \frac{\omega_{\psi}^* \cdot \left(B e^{Bt} - \frac{\chi}{r} \right)}{B - \frac{\chi}{r} \omega_{\psi}^* e^{Bt}}, \quad (13)$$

где ω_{ψ}^* - начальная скорость движения частицы, м/с.

В третьем разделе второй главы представлены теоретические модели движения частиц дисперсного материала во встречно-соударяющихся потоках газозвеси в конвективных сушилках, выполненных на основе уравнений вида

$$\rho_{\psi} \frac{dV_{\psi}}{dt} = S f_x - \frac{\partial p}{\partial x}, \quad (14)$$

где p - давление, Па; V_{ψ} - скорость частицы, м/с.

Результаты численного расчета уравнения (14) представлены на рисунке 7. Решение получено при начальной скорости газа 35 м/с для частиц соли плотностью $\rho = 2500 \text{ кг/м}^3$, диаметром 0,5, 0,1 и 0,05 мм, для разгонного канала $D_k = 0,1 \text{ м}$.

Частные решения для ламинарного режима обтекания, при условии $x_1 = 0$ и $V_{q1} = V_q^*$ имеют вид:

- для участка разгона

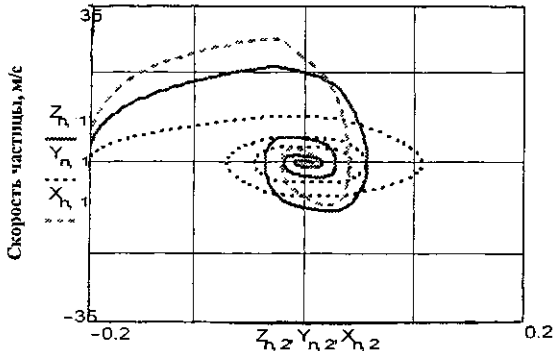
$$x_1 = \frac{V_B}{A} \left[(V_q^* - V_{q1}) + (V - V_B) \ln \frac{V - V_B - V_q^*}{V - V_B - V_{q1}} \right]; \quad t_1 = \frac{V_B}{A} \ln \frac{V - V_B - V_q^*}{V - V_B - V_{q1}};$$

$$V_{q1} = V - V_B - (V - V_B - V_q^*) \exp\left(-At/V_B\right); \quad -A = \frac{4\tau_r}{D_k} (1 + k\mu) + \rho g \mu; \quad (15)$$

- для участка торможения, при начальных условиях $t_2 = 0$, $x_2 = 0$, $V_{q1} = V_{qk1}$, и скорости в конце участка равной нулю

$$x_2 = \frac{1}{B} \left[V_{qk1} + \left(\frac{A}{B} - V \right) \ln \left(\frac{V_{qk1} + V - A/B}{V - A/B} \right) \right]; \quad t_2 = \frac{1}{B} \ln \left(\frac{V - A/B}{V_{qk1} + V - A/B} \right);$$

$$V_{q2} = \frac{A}{B} - V + \exp(Bt) (V_{qk1} + V - A/B); \quad B = \frac{3k_2 \mu S}{\rho_q d_q}. \quad (16)$$



— $d_q = 0,1 \text{ мм}$; ---- $d_q = 0,05 \text{ мм}$; ····· $d_q = 0,5 \text{ мм}$

Рисунок 7 – Изменение скорости частиц вдоль зоны соударения струй

В режиме развитого турбулентного обтекания частицы при $Re_q > 1000$, при тех же допущениях $\varepsilon \geq 0,99$ и $\rho = const$, решения уравнений (14) примут вид:

- для участка разгона, при начальных условиях $x_1 = 0$, $V_{q1} = V_q^*$ и условиях в конце участка разгона, $V_{q1} = V_{qk1}$, будем иметь

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \frac{1}{2C} \left[\ln \frac{V_{\text{чк}_1}^2 - 2VV_{\text{чк}_1} + V^2 - A/C}{V_q^{*2} - 2VV_q^* + V^2 - A/C} \right] - \\
 &- \frac{V}{2C\sqrt{A/C}} \ln \frac{(V_{\text{чк}_1} + V - \sqrt{A/C})(V_q^* + V + \sqrt{A/C})}{(V_{\text{чк}_1} + V + \sqrt{A/C})(V_q^* + V - \sqrt{A/C})}; \\
 t_1 &= \frac{1}{2C\sqrt{A/C}} \ln \frac{(V - V_{\text{чк}_1} + \sqrt{A/C})(V_q^* - V + \sqrt{A/C})}{(V_{\text{чк}_1} - V + \sqrt{A/C})(V - V_q^* + \sqrt{A/C})}; \\
 V_{q_1} &= \frac{(V - \sqrt{A/C}) \cdot \exp(2tC\sqrt{A/C}) + (V + \sqrt{A/C})D}{\exp(2tC\sqrt{A/C}) + D},
 \end{aligned} \tag{17}$$

$$\text{где } D = \frac{(V_q^* - V + \sqrt{A/C})}{(V - V_q^* + \sqrt{A/C}); \quad f_x = 0,042\rho(V - V_q)^2; \quad C = \frac{0,042 S \rho}{\rho_q}.$$

- для участка торможения максимальный заброс частиц в противоположную струю

$$x_2 = \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{A/C - V^2}{A/C - V - V_{\text{чк}_1}} \right) + \frac{1}{\sqrt{A/C}} \ln \left(\frac{(V + \sqrt{A/C})(\sqrt{A/C} - V - V_{\text{чк}_1})}{(\sqrt{A/C} - V)(V + V_{\text{чк}_1} + \sqrt{A/C})} \right) \right], \tag{18}$$

время торможения

$$t_2 = \frac{1}{2C\sqrt{A/C}} \cdot \ln \frac{(V + V_{\text{чк}_1} + \sqrt{A/C})(\sqrt{A/C} - V)}{(V + \sqrt{A/C})(\sqrt{A/C} - V - V_{\text{чк}_1})}; \tag{19}$$

текущая скорость движения частицы

$$V_{q_1} = \frac{(\sqrt{A/C} - V)E - (V - \sqrt{A/C}) \cdot \exp(2tC\sqrt{A/C})}{\exp(2tC\sqrt{A/C}) + E}; \quad E = \frac{(V + V_{\text{чк}_1} + \sqrt{A/C})}{(\sqrt{A/C} - V - V_{\text{чк}_1})}. \tag{20}$$

В четвертом разделе второй главы выполнен анализ механизма разрушения дисперсных частиц во встречно-соударяющихся потоках газовой взвеси на основе уравнения баланса импульсов и закона сохранения энергии. Согласно теории хрупкого разрушения, возникновение трещины и распад исходной частицы на осколки наступает при достижении критического значения коэффициента интенсивности напряжений

$$K_I(t) = \frac{2\rho v_0 C_1 C_2 \tau \sqrt{C_1^2 - C_2^2}}{C_1 \sqrt{\pi} C_1 t} = \frac{2\rho v_0 \tau \sqrt{C_1^3 - C_1 C_2^2}}{2(1+\nu)\sqrt{\pi}} \tag{21}$$

где $C_1 = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ - поперечная скорость распространения волн возмущения, м/с; $C_2 = \frac{C_1}{2(1+\nu)}$ -

продольная скорость распространения волн возмущения, м/с; ν - коэффициент Пуассона; E - модуль упругости Юнга, Па, v_0 - скорость соударения частиц, м/с.

На рисунках 8, 9 представлены графики изменения напряжений в соударяющихся частицах дисперсной фазы при различных эквивалентных диаметрах разгонного канала, различной скорости соударения струй.

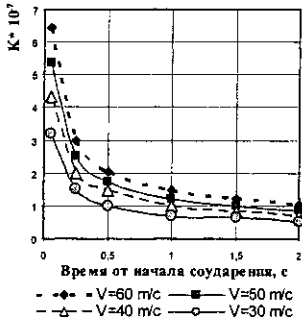


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента интенсивности напряжений в частице от времени начала соударения при различной скорости разгона

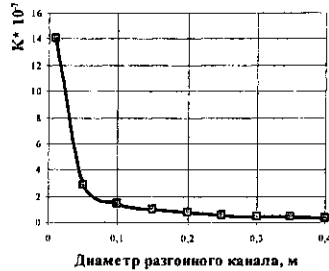


Рисунок 9 – Зависимость коэффициента интенсивности напряжений в частице от диаметра разгонного канала

В пятом разделе второй главы представлены результаты экспериментальных исследований аэродинамических и тепло-массообменных характеристик сушильных агрегатов со встречно-вращающимися и соударяющимися потоками газовой фазы.

На рисунках 10 и 11 представлены кривые распределения статического давления по радиусу и угловой координате для вихревой камеры со встроенным аппаратом со встречными закрученными потоками (ВЗП) для пылеочистки (Рис. 6).

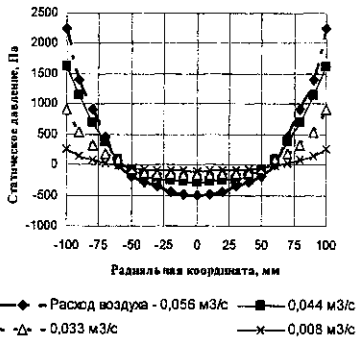


Рисунок 10 – Распределение статического давления по радиальной координате в вихревой камере со встроенным ВЗП, $D_{\text{ан}} = 200$ мм, $D_{\text{ВЗП}}/D_{\text{ан}} = 0,9$

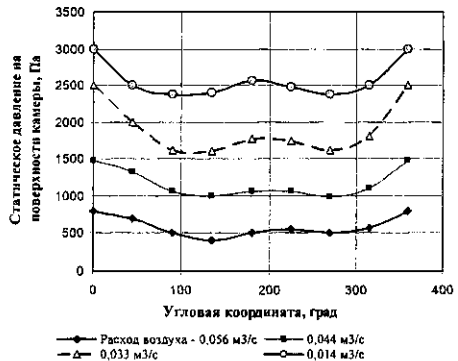


Рисунок 11 – Распределение статического давления по угловой координате в вихревой камере со встроенным ВЗП, $D_{\text{ан}} = 200$ мм, $D_{\text{ВЗП}}/D_{\text{ан}} = 0,9$

Для аппаратов со встречно-вращающимися потоками-ВВП и вынесенной системой пылеочистки коэффициент гидравлического сопротивления может быть определен

$$\xi_{\Sigma} = 8,15 \left(\frac{\sum h}{n D_{an}} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{B-b}{D_{an}} \right)^{0,46} \cdot \left(\frac{d_0}{D_{an}} \right)^{-2,2}, \quad (22)$$

при изменении параметров $\frac{\sum h}{n D_{an}} = 0,04 \dots 0,25$; $\frac{B-b}{D_{an}} = 0,2 \dots 0,6$; $\frac{d_0}{D_{an}} = 0,3 \dots 0,45$, $L/h \geq 0,8$;
 $n = 2 \dots 4$.

Для беззубых сушилок со встречно-соударяющимися потоками-ВСП получена зависимость

$$\xi_{\Sigma} = 6,74 \left(\frac{\sum h}{n D_{an}} \right)^{0,7} \cdot \left(\frac{B-b}{D_{an}} \right)^{0,46} \cdot \left(\frac{d_0}{D_{an}} \right)^{-2,5} \cdot \left(\frac{D_y}{D_{an}} \right)^{-1,1}, \quad (23)$$

при изменении относительных величин в следующих диапазонах $\frac{d_0}{D_y} = 0,3 \dots 0,6$,
 $0,4 < \frac{L}{h} \leq 0,8$:

$$\xi_{\Sigma} = 0,76 \left(\frac{\sum h}{n D_{an}} \right)^{0,35} \cdot \left(\frac{L}{D_{an}} \right)^{-0,45} \cdot \left(\frac{B-b}{D_{an}} \right)^{0,46} \cdot \left(\frac{d_0}{D_{an}} \right)^{-2,5} \cdot \left(\frac{D_y}{D_{an}} \right)^{-1,1} \quad (24)$$

Среднее время пребывания частиц дисперсной фазы в аппаратах со встречно-соударяющимися потоками ВСП-200 в зависимости от расхода воздуха и массовой расходной концентрации твердой фазы, представлено на рисунках 12 - 13.

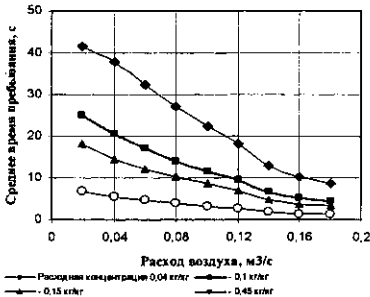


Рисунок 12 – Зависимость среднего времени пребывания частиц в аппаратах ВСП-2х200 от расхода воздуха

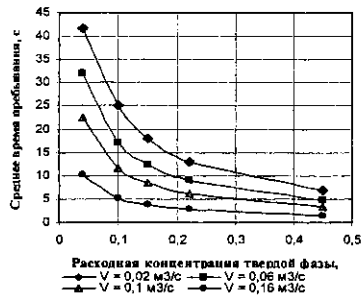


Рисунок 13 – Зависимость среднего времени пребывания частиц в аппаратах ВСП-2х200 от расходной концентрации

Зависимость среднего времени пребывания τ от расхода воздуха в аппаратах ВСП хорошо аппроксимируется формулой

$$\tau = 4,91 \cdot \frac{\exp(-10,97V)}{\mu^{0,8}}. \quad (25)$$

В шестом разделе второй главы описан опыт промышленной реализации установок со встречно-вращающимися и соударяющимися потоками газовзвеси.

Сушильные установки ВСП разработаны и с успехом эксплуатируются при сушке молочного сахара взамен существующих низкопроизводительных барабанных сушилок СКА - 50, СБА - 100 и сушилок кипящего слоя типа РЗ-ОСС. Базовая схема установок ВСП легла в основу создания многих промышленных установок для сушки порошковых

материалов, в частности, для сушки картофельного крахмала на Сопощкинском, Бродницком, Сновском и Веселовском крахмальных заводах были смонтированы и запущены в эксплуатацию установки производительностью 15,18 и 25 тонн в сутки.

ГЛАВА 3. Третья глава посвящена исследованию процессов сушки и измельчения прочных пищевых продуктов, высоковлажных материалов и суспензий, имеющих волокнистую или пастообразную структуру, высокие адгезионные свойства, и разработке комбинированных агрегатов для различных технологических процессов.

В первом разделе третьей главы рассмотрены конструкции конвективных и кондуктивных сушилок и вентилируемых мельниц с упруго-деформируемыми и адаптивными рабочими органами для переработки различных материалов.

Для сушки высоковлажных материалов, приобретающих сыпучие свойства в процессе сушки, с успехом могут применяться роторно-цепные дробилки-сушилки со встроенной системой классификации продуктов сушки (Рис. 14).

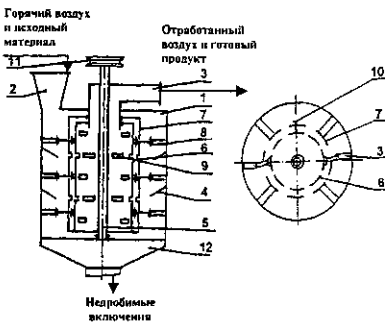


Рисунок 14 – Дробилка-сушилка со встроенной системой классификации

Высокая надежность работы достигается за счет наличия большого числа избыточных подвижных соединений, позволяющих осуществлять высокоскоростной удар и не разрушаться рабочим элементам, при попадании недробиных включений.

Примером комбинированного агрегата может служить мельница-сушилка с соосной вихревой камерой и установленным в ней центробежным классификатором. Данный агрегат позволяет одновременно осуществлять сушку, измельчение и классификацию готового продукта. Все преимущества вихревых камер соединены с преимуществами мельниц с пружинными рабочими органами.

Приведены и другие конструкции агрегатов со встроенными дисковыми, турбинными центробежными проходными классификаторами и адаптивными рабочими органами.

Во втором разделе третьей главы рассмотрены конструкции агрегатов с упруго-деформируемыми рабочими органами для диспергирования, эмульгирования и смешивания. Особенностью переработки жидкотекучих композиций с участием твердой фазы (паст, суспензий) является высокая подвижность перерабатываемой среды и низкая вероятность захвата частичек твердой фазы. Преодоление этих трудностей в традиционных аппаратах достигается за счет тонкослойной переработки (растирание) между быстровращающимися валками, либо за счет значительного увеличения числа зон разрушения, например, путем перехода от шаровой насадки к бисерной насадке.

Нам удалось объединить достоинства всех имеющихся методов воздействия на дисперсный материал, максимально уменьшив недостатки известных способов.

Был разработан целый класс аппаратов с пружинными рабочими органами со встроенной системой классификации или без нее, построенных на следующих принципах:

- измельчение осуществляется в тонкопленочном режиме в сходящихся клиновидных пространствах колеблющейся или быстро вращающейся пружины;
- число зон контакта определяется количеством витков рабочего органа пружины и

- может варьироваться в широких пределах;
- интенсивность процесса разрушения обеспечивается многократным сжатием частиц твердой фазы между упруго деформируемыми витками пружины;
- дополнительная интенсификация обеспечивается за счет турбулентных пульсаций малой амплитуды и большой частоты;
- организация процесса измельчения в прямотоке (по направлению действия центробежного поля), или в противотоке (против действия центробежного поля), в периодическом или непрерывном режимах.

На рисунке 15 представлен комбинированный агрегат для переработки жидкотекучих композиций с участием твердой фазы, позволяющие осуществлять тонкое измельчение и управляемую классификацию частиц. В вязких малоподвижных суспензиях центробежная классификация часто является малоэффективной или же энергетически нецелесообразной. В этих случаях целесообразно применять мельницы с жалюзийными проходными классификаторами (Рис. 15).

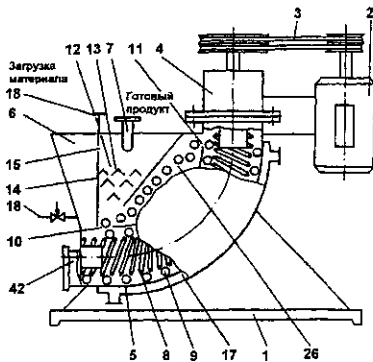


Рисунок 15 – Мельница-классификатор с шаровой мелющей насадкой

Повысить скорость циркуляции малоподвижных сред можно путем введения в объем помольного пространства дополнительных мелющих тел. Благодаря наличию слоя мелющих тел между упруго деформируемым рабочим органом и стенками помольной камеры, винтовая спираль не касается стенок камеры, то есть устраняет трение скольжения. За счет поступательной навивки спирали рабочего органа, осуществляется транспортирование материала и мелющих тел внутри камеры в направлении от входного окна к выходному окну. Интенсификация процесса измельчения достигается за счет увеличения числа зон разрушения и увеличения количества одновременно измельчаемого материала.

В третьем разделе третьей главы представлены результаты математического моделирования процессов циркуляции и сушки дисперсного материала в аппаратах с упруго-деформируемыми рабочими органами.

При моделировании процессов сушки и МТО были сделаны следующие допущения. Весь объем рабочего пространства был условно разделен на две зоны: зону активной гидродинамики 2 и зону пассивной гидродинамики 1. Зона 2 представляет собой полый кольцевой дугообразный канал, непосредственно прилегающий к поверхности пружины, и ограниченный с другой стороны внутренней тороидальной поверхностью корпуса. Зона 1, в зависимости от конструкции аппарата может представлять собой приемный бункер, часть объема камеры или циркуляционную трубу. В зоне 2 активно протекают процессы тепло- и массообмена, перемешивание, а также измельчение материала пружинной и дополнительными мелющими телами. После выхода из зоны 2 материал равномерно заполняет объем помольного пространства в зоне 1, и под действием внутренних градиентов гидростатического давления перетекает к противоположному концу активной зоны. В зоне 1 скорость циркуляции материала и процессов тепломассообмена резко

снижается, так как велика толщина слоя материала и диффузия влаги происходит из глубинных слоев, при незначительном перемешивании в слое. Десорбция влаги происходит только с внешней поверхности слоя материала.

Скорость циркуляции материала определяется насосной подачей пружины G .

$$G = F_p V_{лн} \rho k_0 \psi, \quad (26)$$

где ψ – коэффициент заполнения рабочей камеры; k_0 – коэффициент, учитывающий снижение транспортирующей способности рабочего органа в процессе попутного измельчения материала; ρ – насыпная плотность материала, кг/м³; $V_{лн}$ – линейная скорость перемещения материала, м/с; F_p – площадь поперечного кольцевого сечения зоны 1, м².

Среднее время пребывания материала в зоне 1 составит

$$\tau_1 = V_1 / G = \frac{R\Omega [RD_k - \pi / 4 (D_k^2 - D_{cp}^2 / 2)]}{[(D_k^2 - D_{np}^2) \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \varphi_1) \omega D_k] \delta_1 k_0}, \quad (27)$$

где Ω – центральный угол изгиба пружины; R – радиус угла изгиба пружины, м.

Тогда среднее время пребывания материала в зоне 2 составит

$$\tau_2 = V_2 / G = 4 R\Omega (D_k^2 - D_{cp}^2) / [(D_k^2 - D_{np}^2) \sin \alpha \cos(\alpha + \varphi_1) \omega \cdot D_k] \cdot \delta_1 \cdot k_0. \quad (28)$$

где D_k – внутренний диаметр тороидальной поверхности корпуса, м; D_{np} – наружный диаметр пружины, м; D_{cp} – средний диаметр пружины, м; d – диаметр проволоки пружины, м; φ_1 – угол трения скольжения материала по поверхности рабочего органа, радиан; ω – частота вращения рабочего органа, 1/с; α – угол подъема винтовой линии пружины, радиан.

При переработке материалов, склонных к налипанию на рабочие поверхности в объем материала дополнительно вводятся мелушцы тела, и их доля учитывается коэффициентом a_1 .

В общем случае, в процессе сушки можно выделить три периода: начальный период прогрева или охлаждения материала до температуры мокрого термометра; период постоянной скорости сушки; период падающей скорости сушки. Тогда длительность всего процесса сушки можно определить по следующему выражению

$$\tau = K[(W_0^c - W_{к1}^c) + ((W_{к1}^c - W_p^c) / \Theta)^{1/b}] / N, \quad (29)$$

где K – коэффициент, учитывающий долю начального периода сушки (~1,05 – 1,1); $W_0^c; W_{к1}^c; W_p^c$ – начальная, первая критическая и равновесная влажность материала; N – скорость сушки в первый период, 1/с; Θ и b – эмпирические коэффициенты.

Уточнение теоретической модели и определение численных коэффициентов уравнения (29) получено эмпирическим методом.

В четвертом разделе третьей главы представлены результаты математического моделирования механо- и термонапряженного состояния материала в процессах сушки и МТО. Теоретический анализ процесса нагружения и последующего разрушения упруго-пластического тела с заданной структурой осуществлен с помощью уравнения Гиббса-Гельмгольца.

Согласно первому закону термодинамики, в каждый момент развития напряженного состояния, сопровождающийся изменением сплошности деформируемого тела и выполняется условие

$$\frac{dR}{d\tau} + \frac{\delta Q}{d\tau} = \frac{dL}{d\tau} + \frac{dK}{d\tau} + \frac{dF}{d\tau}, \quad (30)$$

где dR - элементарная работа деформации тела, Дж; $dR/d\tau$ - скорость совершения работы (мощность), Вт; $\delta Q/d\tau$ - скорость подвода (отвода) тепла, Вт; $dL/d\tau$ - скорость изменения энергии деформации, Вт; $dK/d\tau$ - скорость изменения кинетической энергии, Вт; $dF/d\tau$ - скорость поглощения энергии разрушения (образования новой поверхности), Вт.

Работа, совершаемая над деформируемым телом, может быть обусловлена внешними массовыми, поверхностными и внутренними силами и может быть выражена из соотношения

$$dR = \int_{\Omega} (x_i - \rho \ddot{u}_i) \delta u_i dV + \int_A p_i \delta u_i dA, \quad (31)$$

где x_i - тензор массовых сил, Н/м^3 ; u_i - тензор перемещений, м; $\rho \ddot{u}_i$ - инерционная составляющая тела, Н/м^3 ; Ω - объем, м^3 и A - площадь поверхности тела, м^2 ; p_i - давление на поверхности, Па.

Учитывая, что компоненты тензора давления p_i связаны с составляющими p ; тензора напряжений σ_{ij} на поверхности A . и переходя от интеграла по поверхности к интегралу по объему Ω по формуле Остроградского-Гаусса, получаем

$$\frac{dR}{d\tau} = \int_{\Omega} (x_i - \rho \ddot{u}_i + \Delta(c_{ij} \varepsilon_{kl} - \beta_{ij} t) \dot{u}_i) dV. \quad (32)$$

Скорость подвода тепла к открытой термодинамической системе обусловлена как внешними теплопритоками, так и внутренними источниками Q_{BH} , в том числе трансформацией механической энергии в тепловую

$$\delta Q_{BH} = (1 + \tau_r) \int (w_i \dot{t} - \dot{w}_i t) dV \quad (33)$$

где τ_r - время релаксации теплового потока (тепловая инерционность тела), с; t - температура, $^{\circ}\text{C}$; w_i - мощность внутреннего источника тепла.

Работа упруго-пластической деформации складывается из составляющих

$$L = L_{пл} + L_{упр} \Rightarrow \frac{dL}{d\tau} = \frac{d}{d\tau} \left(\int_{\Omega} (\delta \varepsilon_{ij} + \frac{1}{2} c_{ij} \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl}) dV \right). \quad (34)$$

Скорость изменения кинетической энергии осколков разрушения определим из уравнения

$$\frac{dK}{d\tau} = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{d}{d\tau} \left(\int_{\Omega} \dot{u}_i \dot{u}_i dV \right). \quad (35)$$

Скорость изменения энергии разрушения может быть выражена

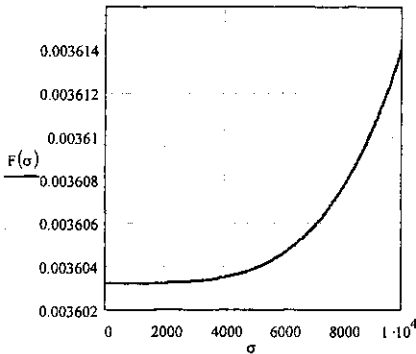
$$\frac{dF}{d\tau} = 2\gamma \int_{\Omega} \frac{da}{d\tau} dV, \quad (36)$$

где γ - удельная работа образования единицы новой поверхности (а), ; $da/d\tau$ - вариация площади вновь образовавшейся поверхности в единицу времени, m^2/c .

Уравнения (30) - (36) образуют полную систему дифференциальных уравнений баланса энергий напряженного тела в неизотермических условиях.

Переходя к интегральному виду, свободная энергия напряженного тела

$$F = \rho \int_{\Omega} \left(\frac{1-2\mu}{2E} \Sigma \sigma_{ii}^2 + \frac{1-2\mu}{6E} (\Sigma (\sigma_{ii} - \sigma_{jj})^2 + 6\Sigma \tau_{ij}^2) + \beta_{ij} T d\varepsilon_{ij} + c_e dT \right)^2 dV + \rho c_e \frac{t}{t_0} + \rho T \int_{\Omega} \beta_{ij} \varepsilon_{ij} dV \quad (37)$$



Замыкание данных интегрально-дифференциальных уравнений (34-37) осуществляется начальными и граничными условиями теплообмена второго или третьего рода.

Решение данных интегрально-дифференциальных уравнений осуществлено численными методами на ЭВМ (Рис. 16).

Рисунок 16 – Изменение свободной энергии связи F частицы при МТО от величины напряжения σ

Таким образом, затраты удельные энергии на процесс разрушения увеличиваются с ростом внутренних напряжений и падают с уменьшением температуры тела.

В пятом разделе третьей главы рассмотрены вопросы кинетики разрушения частиц в межвитковом пространстве винтовых рабочих органов.

Анализ выполнен путем расчета прироста напряжений при заклинивании в межвитковом пространстве сферической неразрушаемой частицы диаметром d_* .

При заклинивании одновременно группы частиц в межвитковом пространстве пружины, частицы материала расположатся на различных радиусах ρ_i от центра кривизны рабочего органа, и угловых координатах Q_i в соответствии с величиной зазора между витками.

Рассмотрим увеличение длины геометрической оси упруго деформируемого рабочего органа $\Delta\lambda_2$.

$$\begin{aligned} \Delta\lambda_2 &= \sum_{i=1}^n (d_i^* - x_i) = \sum_{i=1}^n \left(d_i^* - \frac{x_{\max}}{2} \left(1 + \cos \left(\arccos \left(\frac{2d_i^*}{x_{\max}} - 1 \right) + \Delta Q \right) \right) \right) = \\ &= \sum_{i=1}^n \left(d_i^* + m \cdot i - 0.5x_{\max} \left(1 + \cos \left(\arccos \left(\frac{2d_i^*}{x_{\max}} - 1 \right) + \Delta Q \right) \right) \right) = \end{aligned}$$

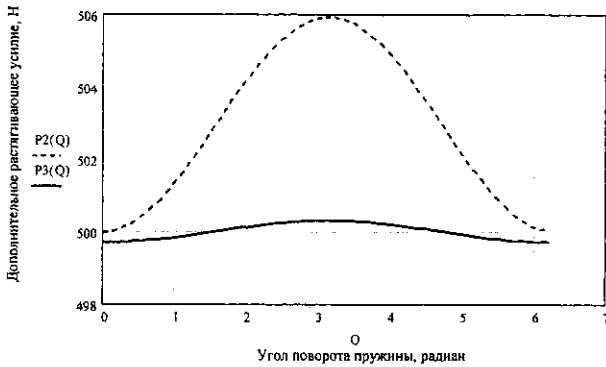
$$= \sum_{i=1}^n \left(d_i^* + \frac{(d_u^* - d_z^*) \cdot i}{z - 1 - 2k} - 0.5 \cdot \lambda_{\max} \left(1 + \cos \left(\arccos \left(\frac{2d_i^*}{x_{\max}} - 1 \right) + \Delta Q \right) \right) \right), \quad (38)$$

Прирост усилия напряжения составит

$$\Delta P = \Delta \lambda_2 \frac{E_c \cdot d^4}{16(1 + \mu) \cdot D^3 \cdot z}. \quad (39)$$

Результаты численного расчета на ЭВМ напряжений в межвитковом пространстве пружинного рабочего органа представлены на рисунке 17.

Данная методика расчета предельных напряжений и предельных деформаций рабочего органа была применена при проектировании рабочих винтовых мельниц-сушилок с упруго-деформируемыми рабочими органами.



- P2(Q) – заклинивание одиночной частицы;
 ————— P3(Q) – заклинивание группы частицы переменного радиуса

Рисунок 17 – Характер изменения дополнительного растягивающего напряжения от заклинивания неразрушаемого материала

В шестом разделе третьей главы рассмотрена кинетика сушки частиц переменного радиуса в процессах МТО.

В основу модели положено известное уравнение массопроводности, которое в обобщенном виде может быть представлено

$$\partial C / \partial \tau = D_s \nabla^2 C, \quad (40)$$

где C – текущая концентрация влаги; D_s – коэффициент молекулярной диффузии влаги в материале; τ – время.

Дополнительным условием является функция, описывающая интенсивность измельчения частиц дисперсного материала, и связывающая текущее значение радиуса частицы R со временем τ . При этом, начальный радиус частицы R_0 есть параметр математической модели, а явный вид функции может быть представлен в виде

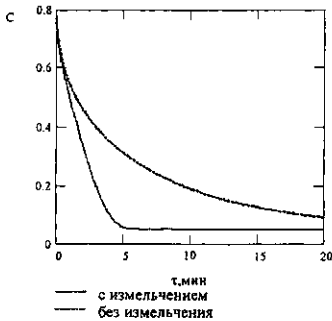
$$R(\tau) = R_0 \cdot \exp(-a \tau), \quad (41)$$

где a - эмпирическая константа, зависящая от интенсивности и частоты механического воздействия на измельчаемый материал, 1/с.

Для решения поставленной задачи было использовано решение, полученное А.В.Лыковым для сферической частицы в обобщенном виде

$$C\left(\frac{r}{R(\tau)}, Fo, Bi\right) = 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{(\sin \mu_n - \mu_n \cos \mu_n) \sin(\mu_n r / R)}{\mu_n (\mu_n - \sin \mu_n \cos \mu_n) r / R} e^{-\mu_n^2 Fo}, \quad (42)$$

где Fo, Bi - массообменные критерии Фурье и Био; r - текущий радиус частицы, м; μ_n - корни трансцендентного характеристического уравнения.



Данная задача была решена численным методом на персональном компьютере с использованием пакета прикладных программ для частиц диаметром 5 мм из сырья растительного происхождения (морковь, при начальной влажности 81,6 %), при сушке под вакуумом (остаточное давление 600 Па, температура стенки камеры 90⁰С), (Рис. 18).

Рисунок 18 – Изменение среднего по объему влагосодержания частицы от времени сушки

Сокращение времени сушки при измельчении и при равных температурных условиях достигается в 4-6 раз. Как показали исследования, это сокращение может достигать и 50 раз по сравнению с вакуум сублимационными сушилками.

Седьмой раздел третьей главы посвящен экспериментальным исследованиям технических характеристик агрегатов с упруго-деформируемыми рабочими органами. Были выполнены экспериментальные исследования процессов измельчения сыпучих дисперсных продуктов. В качестве исследуемых сыпучих дисперсных продуктов были выбраны пшеница, рожь и ячмень. Основными факторами, по которым оценивались эффективность процесса, являлись степень измельчения материала и удельная энергоёмкость. На рисунках 19, 20 представлены результаты рассевов ржи и ячменя измельченных в аппаратах с упруго-деформируемым рабочим органом и дополнительными мелющими телами.

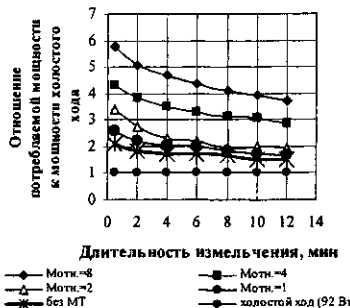


Рисунок 19 – Изменение степени измельчения семян ржи

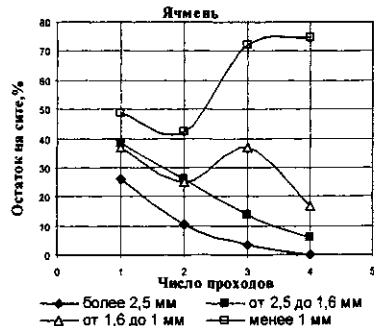


Рисунок 20 – Изменение остатка на сите от числа проходов для семян ячменя

Зависимость степени измельчения злаков I от длительности обработки удовлетворительно аппроксимируется уравнением вида

$$I = A \tau^n, \quad (43)$$

где A – функция, зависящая от количества мелющих тел, $1/c^n$.

$$A = 6,9855(M_{\text{мт}}/M_{\text{пр}})^{0,2031}; \quad (44)$$

n – коэффициент, зависящий от свойств материала, для злаковых культур $n = 0,8$; $M_{\text{мт}}$, $M_{\text{пр}}$ – масса мелющих тел и масса продукта соответственно.

Затраты энергии на проведение процесса измельчения и транспорт продукта через помольный агрегат, представлены на рисунке 21. Данные получены при испытании проточной тороидальной мельницы периодического действия с пружинным рабочим органом и мелющими телами. Установленная мощность электродвигателя 1,1 кВт. Частота вращения рабочего органа 1500 об/мин.

При определении эффективности процессов измельчения сыпучих материалов рассчитывалось удельное энергопотребление E_y , необходимое для достижения контрольной степени измельчения равной 10. По результатам расчетов был построен график зависимости от E_y приведенной массы мелющих тел (МТ) (Рис. 22).

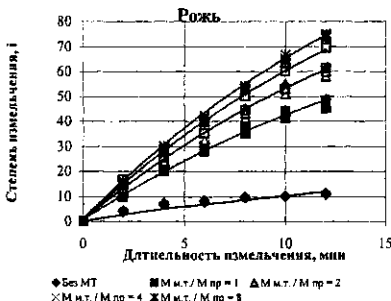


Рисунок 21 – Изменение потребляемой мощности мельницы периодического действия

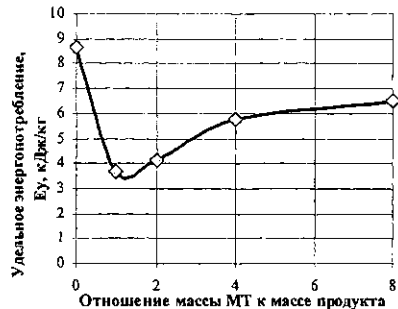


Рисунок 22 – Влияние количества МТ на энергоемкость процесса измельчения ржи

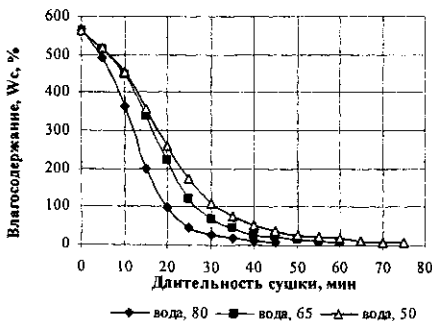


Рисунок 23 – Кривые сушки свеклы при различных режимах

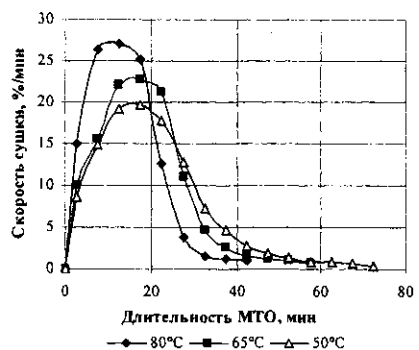


Рисунок 24 – Кривые изменения скорости сушки свеклы

Результаты экспериментальных исследований процессов вакуумной кондуктивной сушки в аппаратах с упруго-деформируемыми рабочими представлены в виде кривых сушки свеклы на различных температурных режимах (Рис. 23), кривых скорости сушки (Рис. 24), и термограмм продукта (Рис. 25).

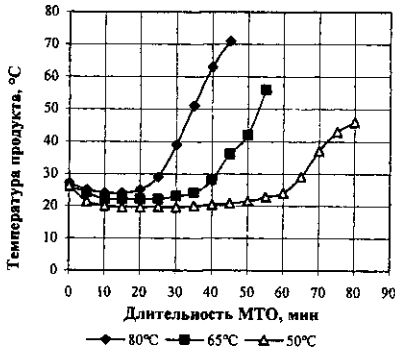


Рисунок 25 – Термограммы сушки свеклы



Рисунок 26 – Обобщенная кривая сушки свеклы

Анализируя кривые скорости сушки, можно сделать вывод, что длительность периода постоянной скорости сушки составляет от 30 до 40% от длительности всего процесса. Это вызвано тем, что в процессе МТО происходит постоянное вскрытие массообменной поверхности материала и движущая сила процесса сушки (разности парциальных давлений воды у поверхности материала и в паровом пространстве) остается довольно значительной. По кривым сушки, полученным на различных температурах теплоносителей была построена обобщенная кривая сушки в координатах $(W_c - W_p^e) - N\tau$ (Рис. 26). S-образная обобщенная кривая сушки хорошо аппроксимируется уравнением

$$(W^c - W_p^c) / (W_n^c - W_p^c) = \exp(-\alpha (N\tau)^b), \quad (44)$$

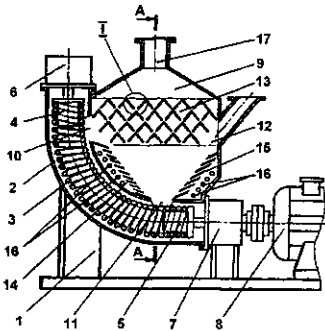
где N - скорость сушки в первый период; τ - текущее время процесса; $W_n^c = 565$, $W_p^c = 8$, W^c - начальное, равновесное и текущее влагосодержание материала; $\alpha = 1,45 \cdot 10^{-3}$; $b = 1,79$.

Проведенные исследования показывают, что использование дополнительных мелющих тел в аппаратах с пружинными рабочими органами, позволяет не только интенсифицировать процесс измельчения, но и снизить удельное энергопотребление, повысить скорость сушки и качество готового продукта.

В восьмом разделе третьей главы рассмотрены вопросы практической реализации результатов теоретических и экспериментальных исследований агрегатов с адаптивными и упруго деформируемыми рабочими органами.

Одним из комбинированных агрегатов для сушки и дробления является установка для получения порошка для полусухого прессования или таблетирования. Установка позволяет осуществлять прямую переработку смеси высоковлажных материалов. При этом происходит измельчение частиц исходного продукта, сушка во взвешенном состоянии и классификация исходного материала и готового продукта.

Установка была спроектирована для украинского производственного объединения «Экостром». Установка имеет габаритные размеры 7,5x5,6x11,2 м, в качестве вентилятора применен дымосос ДН № 12, мощность привода 55 кВт.



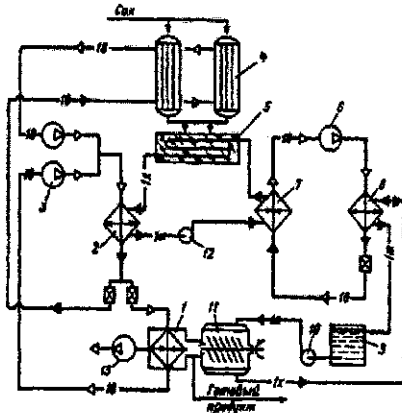
Для тонкого измельчения порошковых материалов наибольшую эффективность имеют аппараты с адаптивными упруго деформируемыми рабочими органами, например, на базе винтовой цилиндрической пружины, с встроенными классификаторами, (Рис. 27).

Отдельные аппараты могут компоноваться в каскады или работать по параллельной схеме.

Рисунок 27 – Мельница сушилка со встроенным проходным классификатором

Таким образом, аппараты с пружинными рабочими органами могут успешно применяться для сушки высокопрочных и пастообразных материалов, склонных к налипанию на рабочие поверхности.

ГЛАВА 4. Четвертая глава посвящена исследованию процессов сушки и измельчения высоковлажных, вязкоупругих и волокнистых материалов при низких или криогенных температурах. В первом разделе четвертой главы рассмотрены аппараты для низкотемпературной вакуумной сушки и термообработки дисперсных материалов. В основу технологии переработки материалов растительного происхождения положена разработанная нами теплонасосная схема, представленная на рисунке 28.



- 1-сушилка-десублиматор;
- 2-конденсатор холодильного контура;
- 3-компрессор холодильного контура;
- 4-криоконцентратор;
- 5-бак-холодоаккумулятор;
- 6-компрессор теплонасосной установки;
- 7-испаритель теплонасосного контура;
- 8-конденсатор теплонасосного контура;
- 9-емкостной теплоаккумулятор;
- 10, 12-насос;
- 11-сублиматор;
- 13-вакуум-насос.

Линии: 1х, 1т – холодная и теплая вода; 1б – фреон

Рисунок 28 – Технологическая схема производства натуральных тонкодисперсных пищевых порошков

Предложенная технологическая схема позволяет не только повысить эффективность работы вакуум сушильных установок, но и повысить коэффициент полезного действия холодильной установки в целом.

Данная схема может служить базовой для производства пищевых порошков и лекарственных препаратов из соков и выжимок различных растений.

В основу конструкции аппаратов для сушки и МТО материалов при низких температурах положена пружинная мельница, снабженная устройствами для

вакуумирования сушильного пространства, загрузки и выгрузки материала, конденсатором паров влаги и системой шлюзования. Однако при переработке малоподвижных дисперсных систем с участием твердой фазы аппараты с пружинными рабочими органами периодического и непрерывного принципа действия становятся непригодными из-за налипания материала на стенки корпуса и сводообразования.

Преодолеть эти недостатки удалось при использовании в объеме аппарата дополнительных мелющих тел (шаров), рис. 29.



Рисунок 29 – Сушильный аппарат емкостного типа с пружинным рабочим органом и дополнительными мелющими телами

Данную сушилку можно использовать не только в условиях среднего и глубокого вакуума, но и в режиме сублимационной сушки и низкотемпературного измельчения, что позволяет использовать его для получения порошков из особо термочувствительных и вязких материалов.

Во втором разделе четвертой главы рассмотрены аппараты для криогенной обработки пластичных, вязкоупругих и волокнистых материалов.

На основе анализа различных конструктивных решений была разработана обобщенная технологическая схема, включающая различные технологии

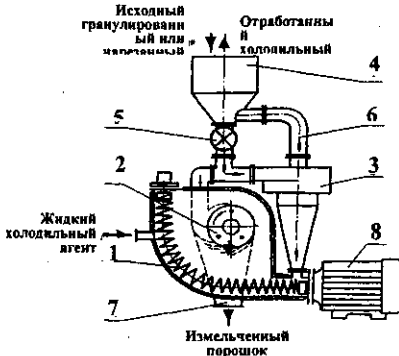


Рисунок 30 – Лабораторная установка для криогенного измельчения материалов в остеклованном состоянии

криоизмельчения ведущих фирм. Схема включает: дозирование исходного сырьевого материала в камеру предварительного охлаждения, его охлаждение отходящими парами холодильного агента, воздухом, с помощью турбохолодильной машины или путем непосредственного контакта с охлаждаемыми поверхностями пароконденсационной холодильной машины. Охлажденный материал поступает в камеру окончательного охлаждения до криогенных температур сжиженными газами.

Далее крупнокусковой материал поступает на стадию предварительного дробления и поверочной классификации. При переработке мелкокусковых материалов может отсутствовать стадия предварительного дробления. Материал, не достигший заданной крупности дробления,

возвращается в камеру доохлаждения и дробления. Мелкая фракция поступает на стадию тонкого помола. Если эти стадии пространственно удалены друг от друга, то перед тонким измельчением предусматривается стадия доохлаждения.

После этого материал подвергается окончательной классификации с выделением целевой фракции готового продукта.

На основе анализа патентной и научно-технической информации нами были разработаны основные направления интенсификации процессов криогенного измельчения продуктов растительного и синтетического происхождения и предложен ряд конструктивных решений криогенных мельниц (Рис. 30).

В третьем разделе четвертой главы рассмотрен общий баланс теплопритоков в криоизмельчительной установке в установившемся рабочем режиме, который может быть представлен уравнением

$$Q_s = Q_{oc} + Q_{po} + Q_{вт} + Q_{из} + Q_{дп} + Q_{мо} - Q_{мк}, \quad (45)$$

где Q_s - суммарные теплопритоки, Вт; Q_{oc} - теплопритоки из окружающей среды через ограждающие поверхности установки; Q_{po} - тепловыделения, обусловленные деформацией и трением рабочего органа измельчителя; $Q_{вт}$ - тепловыделения, обусловленные внутренним трением измельчаемого материала о стенки и рабочий орган мельницы; $Q_{из}$ - тепловыделения, обусловленные непосредственно процессом измельчения, разрывом межмолекулярных связей и образованием новой поверхности, пластической и упругой деформацией; $Q_{дп}$ - теплопритоки, обусловленные дросселированием сжиженных газов или паров холодильного агента при непосредственной его подаче во внутрь помольной камеры; $Q_{мо}, Q_{мк}$ - теплопритоки, обусловленные непрерывной подачей измельчаемого материала и отводом готового продукта из помольного пространства соответственно.

С целью сокращения потерь холодильного агента необходимо максимально приближать технологические аппараты друг к другу, вплоть до их пространственного слияния в едином изолированном объеме. При этом суммарная площадь теплообменной поверхности с окружающей средой F значительно уменьшится, что сократит Q_{oc}

$$Q_{oc} = \alpha_s F (t_{oc} - t_{cm}), \quad (46)$$

где α_s - коэффициент теплоотдачи от окружающей среды к ограждающим поверхностям измельчителя; F - площадь теплообменной поверхности; t_{oc}, t_{cm} - температуры окружающей среды и стенки соответственно.

В четвертом разделе четвертой главы приведены результаты экспериментальных исследований технических характеристик агрегатов для низкотемпературной сушки и МТО, а также свойств пищевых порошков, полученных этими методами.

В качестве сырья для исследования процессов низкотемпературной сушки использовалась свекла, морковь, плоды шиповника крупноплодного и аронии черноплодной. Примечательно, что при сушке плодов с косточкой типа крыжовника, облепихи, рябины получается полностью однородный порошок, с равномерно распределенными включениями оболочковой и косточковой основы. Для исследования процессов низкотемпературного измельчения пастообразных материалов использовалась дробленая в ножевой высокоскоростной дробилке свекла. Результаты

экспериментов по изменению степени измельчения и энергопотребления мельницы при переработке свеклы представлены на рисунках 31, 32.

Зависимость степени измельчения свеклы i от длительности обработки (при частоте вращения 1500 об/мин) удовлетворительно аппроксимируется уравнением вида

$$i = 0,71(M_{\text{мт}}/M_{\text{пр}})^{0,67} \tau^{0,56}, \quad (47)$$

где $M_{\text{мт}}$, $M_{\text{пр}}$ – масса мелющих тел и продукта соответственно; τ – время измельчения.

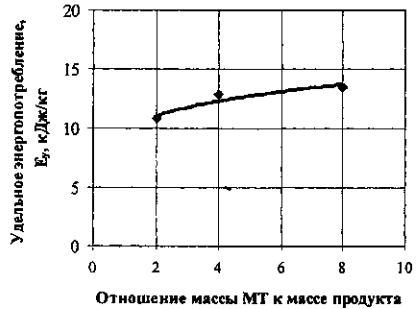
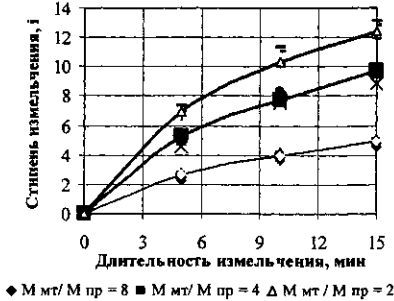


Рисунок 31 – Изменение степени измельчения охлажденной свеклы от времени

Рисунок 32 – Влияние количества МТ на энергоемкость процесса измельчения свеклы

Проведенные исследования позволили также установить, что основными факторами, определяющими скорость протекания низкотемпературной вакуумной сушки, являются температура охлаждающей среды, подаваемой в змеевик конденсатора, и греющей среды, подаваемой в греющую рубашку рабочей камеры (Рис. 33). Давление в камере является величиной самоустанавливающейся и, при бесперебойной работе вакуумного насоса, зависит от интенсивности массоотдачи (скорости десорбции водяных паров).

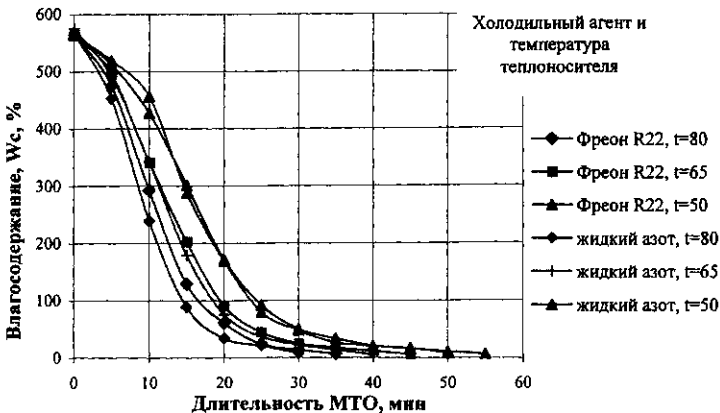


Рис. 33 – Кривые низкотемпературной сушки свеклы при различных режимах

В пятом разделе четвертой главы обобщены результаты внедрения и опытно-промышленной проверки низкотемпературной и криогенной техники для переработки материалов растительного и синтетического происхождения.

На основе сушилки с пружинными рабочими органами и дополнительными мелющими телами (Рис. 29) была разработана и спроектирована совместно с Белорусским научно-исследовательским конструкторско-технологическим институтом мясомолочной промышленности опытно-промышленная установка для получения пищевых порошков из сырья растительного происхождения Я23-АДУ. Производительность по испаренной влаге – 30 кг/ч. Установленная мощность электродвигателей – 2,2 кВт;

С 1997 г. Обществом с ограниченной ответственностью «МИКРОПОРОШКИ», г. Могилев принята в эксплуатацию установка для криогенного измельчения различных волокнистых и вязко-упругих материалов. Производительность – 50...80 кг/ч; степень измельчения – 10...15; исходный размер частиц – не более 6 мм; установленная мощность электродвигателей – 12 кВт. Расход азота – 2...4 кг на кг готового продукта. Масса установки - 400 кг.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Теоретически и экспериментально обоснована возможность существенной интенсификации процессов сушки и механотермической обработки пищевых дисперсных материалов и сред в комбинированных агрегатах, совмещающих в одном рабочем объеме несколько технологических операций, с использованием единого силового поля на транспорт, перемешивание, измельчение, сушку, и классификацию готового продукта [1, 3, 4, 6]. Интенсификация достигается, прежде всего, за счет увеличения удельной поверхности контакта фаз [18] в результате механического измельчения, гидродинамического взвешивания и проведения процессов в нестационарном режиме [3]. Доказано, что при одновременном воздействии температурного и силового полей – МТО возможно получение порошков даже из материалов плохо поддающихся сушке, которые имеют неразвитую поверхность межфазного контакта, образуют крупные агломераты и налипают на стенки сушильных аппаратов [35, 39, 42].

2. Изучены методы силового воздействия на диспергируемый материал [19, 21, 24]. Дана классификация этих методов [26, 30, 31]. Проведен анализ закономерностей протекания и конструктивного оформления процессов механического дробления, измельчения и перемешивания дисперсного материала. Предложен новый параметр сравнительной оценки эффективности механических измельчителей [1, 32] и проведен сравнительный анализ дробильно-помольных агрегатов [1]. Установлены закономерности изменения нового критерия от производительности, объема и массы агрегата, потребляемой мощности и т. д. [1]. Дан анализ основных направлений интенсификация процессов сушки и МТО [45, 46]. Показаны преимущества совмещения механических и тепло- массообменных процессов с участием твердой фазы в одном рабочем пространстве. Проведен анализ энерго- технологической эффективности различных направлений интенсификации. Предложен новый показатель сравнительной оценки [1, 18] и проведены сравнения существующих и вновь разработанных сушильных агрегатов [1,18]. Найдены аппроксимационные зависимости показателя эффективности от различных конструктивных и режимных параметров сушилки [42].

3. Доказано значительное влияние сопутствующих процессов (смешивание,

сепарация и классификация полидисперсных материалов) [1, 3, 25]. Предложены новые конструктивные решения смесителей, классификаторов и циклонов [3,10, 13,23, 60-62, 66-69, 88]. Проведен сравнительный анализ различных конструктивных решений циклонов-пылеуловителей по разработанному критерию эффективности [1, 33].

4. Разработан и запатентован в РБ и РФ новый способ сушки и МТО дисперсных материалов с прямой трансформацией механической энергии в тепловую, используемую на разрыв связей влаги с материалом и ее десорбцию [86, 88]. Систематизированы знания по новым конструкциям аппаратов для сушки и МТО тонкодисперсных пищевых материалов [50-57, 85, 88, 93, 94]. Дан анализ особенностей гидродинамики и принципа действия этих сушильных аппаратов [1, 2].

5. На основании упрощенных уравнений движения жидкости или газа, получены общие и ряд частных решений для распределений полей скоростей, давлений в аппаратах со встречно-закрученными соударяющимися потоками газозвеси. Получены общие и частные решения движения частиц дисперсной фазы во встречно – закрученных потоках и во встречно-соударяющихся потоках газозвеси [2, 34, 49], среднего времени пребывания частиц в зоне МТО. Получены теоретические решения для критического значения коэффициента интенсивности напряжений. Путем компьютерного моделирования изучены основные факторы, приводящие к разрушению частиц во встречных струях газозвеси [2].

6. На основе комплексных экспериментальных исследований получены новые данные по гидродинамике, тепло- массообмену и диспергированию частиц пищевых материалов во встречно-закрученных соударяющихся потоках газозвеси [34, 42, 45]. Полученные результаты математически обработаны и систематизированы. Обобщен опыт промышленного внедрения и эксплуатации сушильных агрегатов со встречно-вращающимися, соударяющимися потоками газозвеси и встроенной или выносной системой пылеочистки [6, 17, 33, 50-57]. Описаны основные конструкции и принцип действия внедренных агрегатов [1].

7. Теоретически и экспериментально показана эффективность использования комбинированных агрегатов для сушки и измельчения с адаптивными и упруго-деформируемыми рабочими органами [5, 38-41, 43,44,58,59,63-65, 70-76,78,80-84, 93]. Показаны преимущества этих типов аппаратов для переработки высоковлажных малоподвижных сред, налипающих на рабочие поверхности сушильной камеры [8, 9, 15]. Сушильные агрегаты, включающие классификации порошков в рабочем объеме отличаются компактностью и позволяют получать готовые порошки высокого качества [3, 17, 35, 36, 47, 48]. Высокая локальная турбулентность способствует эффективному использованию упруго-деформируемых рабочих органов при проведении различных технологических процессов с участием твердой или жидкой дисперсных фаз (эмульгирования, растворения, взбивания, гомогенизации) [13]. При этом качество получаемых жидкотекучих дисперсий отличается высокими технологическими показателями [13, 36]. Показана их эффективность при переработке сыпучих зерновых материалов и при переработке высоковлажных сырьевых материалов [21, 27, 38- 44].

8. На основе анализа геометрии и гидродинамики внутренних циркуляционных течений, выполнен теоретический анализ циркуляции частиц высушиваемого материала в объеме вакуумной сушильной камеры с упруго-деформируемым рабочим органом [12, 22, 23]. Получены зависимости, позволяющие рассчитать изменение поверхности испарения и общее время сушки материала. Разработана математическая модель МТО дисперсных материалов при одновременном воздействии температурных и силовых факторов. Получены уравнения и их теоретические численные решения,

описывающие изменение энергии связи структурных частиц исходного материала, а также энергии связи влаги с материалом в процессе МТО [14, 16, 20, 28]. Силовой анализ работы упруго-деформируемых рабочих органов, позволил получить теоретические зависимости изменения разрушающего усилия в процессах МТО [22].

9. На основе уравнения массопроводности получено численное решение задачи сушки частицы переменного радиуса, в наибольшей степени отвечающей условиям сушки и МТО в аппаратах с интенсивным измельчением [14, 20]. Экспериментальные исследования изменения дисперсного состава материала, удельного энергопотребления и температуры высушиваемого материала, позволили получить численные эмпирические коэффициенты для замыкания теоретических уравнений кинетики измельчения и сушки пищевых дисперсных материалов в процессе МТО [5, 8, 15].

10. Предложены новые технологические схемы организации процессов вакуумной низкотемпературной и вакуум-сублимационной сушки пищевых продуктов с использованием нового типа аппаратов с интенсивным механическим измельчением [35, 37]. Показано, что прямое использование упруго-деформируемых рабочих органов для переработки высокоадгезионных продуктов невозможно, т.к. происходит сводообразование и налипание на рабочие поверхности. Предложено использовать дополнительные мелющие тела, например шарики, для увлечения материала в меридиональную циркуляцию по всему объему аппарата [88, 92].

11. Особенностью переработки высокоэластичных материалов является невозможность их дробления и измельчения при нормальных условиях. В связи с чем, были проанализированы методы низкотемпературного и криогенного охрупчения [11, 28, 29] материалов при МТО, составлена обобщенная технологическая схема переработки волокнистых и вязко-упругих материалов растительного и синтетического происхождения, а также намечены пути интенсификации этих процессов [11]. Выполнен анализ баланса энергий при низкотемпературной и криогенной обработке дисперсных материалов [11]. Приведены собственные конструктивные решения аппаратов для криоизмельчения [77, 78, 90]. Экспериментальные исследования процессов низкотемпературной вакуумной сушки пластичных высоковлажных материалов при кондуктивном энергоподводе и криогенном или фреоновом охлаждении конденсатора сушильного агрегата, позволили получить новые эмпирические зависимости для описания текущей влажности, температуры и дисперсного состава материала [8, 12]. Дан сравнительный анализ характеристик качества готовых порошковых красителей, полученных различными методами сушки [36, 47, 87].

12. На основе теоретических и экспериментальных исследований решена важная инженерная, научная и народно-хозяйственная проблема прямого получения пищевых порошков из грубодисперсного сырья, разработан ряд новых высокоэффективных аппаратов для сушки и МТО, которые прошли опытно-промышленные испытания и внедрены в различных отраслях промышленности. Полученные результаты могут найти применение при проектировании новых агрегатов для сушки, измельчения и МТО различных дисперсных материалов и сред, при подготовке инженеров-механиков и инженеров-исследователей, а также аспирантов и научных работников, занимающихся разработкой новых способов переработки пищевых материалов, теоретическим анализом гидродинамики, тепло- и массообмена, напряженного состояния и физики разрушения в пищевых дисперсных материалах и средах.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Монография

1. Шуляк В.А. Сушка и механотермическая обработка дисперсных материалов и сред. Минск: Изд. центр БГУ, 2003.- 240с.

Статья в сборниках трудов

2. Шуляк В.А. Моделирование динамики движения частиц дисперсного материала во встречно соударяющихся закрученных потоках газозвеси //Техника и технология пищевых производств: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Могилев, 26-28 марта 2003 г.- Могилев, 2003.- Ч.1.- С.294-296.

3. Шуляк В.А., Киркор М.А. Разработка высокоэффективных аппаратов для механической и механотермической обработки дисперсных материалов //К 30-летию Могилевского государственного университета продовольствия: Сб. науч. тр.- Мн., 2003.- С. 165-172.

4. Шуляк В.А., Довидович Д.В. Кинетика сушки пряноароматических трав в лабораторных условиях //Техника и технология пищевых производств: Материалы IV Международной научно-технической конф., Могилев, 26-28 марта 2003 г.- Могилев, 2003.- Ч.1.- С.302-304.

5. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Исследование процессов измельчения в аппаратах с винтовыми рабочими органами //Техника и технология пищевых производств: Материалы IV Международной научно-технической конференции, Могилев, 26-28 марта 2003 г.- Могилев, 2003.- Ч.1.- С.304-306.

6. Шуляк В.А. Разработка установок со встречно вращающимися соударяющимися потоками газозвесей для сушки дисперсных материалов //Новые технологии в химической промышленности: Мат. Междунар. научно-технической конф., Минск, 20-22 ноября 2002г.- Минск, 2002.- Ч1.-С. 204-207.

7. Шуляк В.А. Численное моделирование процессов криогенного измельчения полимеров //Техника и технология пищевых производств: Материалы III Междун. науч.-техн. конф., Могилев, 24-26 апреля 2002 г.-Могилев, 2002.-С. 240-241.

8. Шуляк В.А., Березюк Д.И. Экспериментальные исследования процессов низкотемпературной сушки и механотермической обработки материалов растительного происхождения //Современные энергосберегающие тепловые технологии (Сушка и термовлажностная обработка материалов): Труды 1-ой Междун. научно-практ. конф. СЭТТ-2002, Москва, 28-31 мая 2002г. – Москва, 2002.-Том 3.-С.159-162.

9. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Аппроксимация экспериментальных данных по низкотемпературной сушке пищевых продуктов //Техника и технология пищевых производств: Материалы III Междун. науч.-техн. конф., Могилев, 24-26 апреля 2002 г.- Могилев, 2002.- С. 244-245.

10. Шуляк В.А., Киркор М.А. Процесс разделения пищевых порошков в центробежном классификаторе //Новые технологии в химической промышленности: Мат. Междунар. научно-технической конф., Минск, 20-22 ноября 2002г.- Минск, 2002.- Ч1.-С. 243-245.

11. Шуляк В.А. Анализ факторов, определяющих интенсивность процессов криогенного измельчения полимерных материалов //Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешения и уплотнения: Сб. науч. тр. – Одесса, 2000. – Вып. 8.- С.199-205.

12. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Моделирование процессов вакуумной сушки с измельчением //Техника и технология пищевых производств: Мат. II-Междун. науч.-техн. конф., Могилев, 22-24 ноября 2000г.-Могилев, 2000.- С.217-218.

13. Шуляк В.А. Исследование процессов получения пищевых эмульсий в винтовых пружинных эмульсаторах //Обработка дисперсных материалов и сред: Периодический сб. науч. трудов.- Одесса, 2000. – Вып.10.- С.40-43.

14. Шуляк В.А., Егоров А.Г. Математическое моделирование процессов

механотермической обработки дисперсных материалов //Мат. IV Минского Междуна. форума "Тепломассообмен" ММФ-2000, 22-26 мая 200г. - Минск, 2000. - Том 9. - С.136-140.

15. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Экспериментальное исследование процессов низкотемпературной сушки и измельчения в аппаратах с пружинными рабочими органами //Теория и практика процессов измельчения, разделения, смешения и уплотнения: Труды 6 Междуна. конф., Одесса, 25-29 августа 1998г. - Одесса, 1998. - С.78-82.

16. Шуляк В.А. Термодинамика процессов механотермической обработки дисперсных материалов //Мат. III Минского междуна. форума "Тепломассообмен" ММФ-96, Минск, 20-24 мая 1996г. - Минск, 1996. - Том V. - С.172-177.

17. Федоров Г.С., Шуляк В.А. Установка для сушки крахмала. Оборудование для продовольственных отраслей промышленности. Экспресс-информация. Вып.3. - М.: ВНИИСлепшесмаш, 1988. - 4 с.

18. Федоров Г.С., Акулич А.В., Шуляк В.А. Оценка сушилок взвешенного слоя по показателю влагоэнергетической эффективности //Повышение эффективности тепло-массообменных и гидродинамических процессов в текстильной промышленности и производстве химических волокон: Междуз. сб. науч. тр. - М.: МТИ, 1985. С.113-115.

19. Шуляк В.А. Системный анализ природных и искусственных процессов разрушения и измельчения //Тез. докл. XIII науч.-техн. конф. МТИ, Могилев 15-16 апреля 1993г. - Могилев, 1993. - С.118-119.

20. Шуляк В.А., Егоров А.Г., Березюк Д.И. Математическое моделирование процессов механотермической обработки дисперсных материалов //Техника и технология пищевых производств: Тез. докл. Междуна. науч.-техн. конф., Могилев, 25-27 марта 1998г. - Могилев, 1998. - С.141-142.

21. Шуляк В.А. Механотермическая обработка строительных материалов //Развитие строительных машин, механизации и автоматизации строительства и открытых горных работ: Материалы междуна. науч.-техн. конф. / под ред. Д.П.Волкова, Москва 1995г. - 1995, С.251-252.

22. Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г., Кургузинов А.М., Гаврюшин С.С., Шуляк В.А. Основы теоретического расчета винтовых мельниц //Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г. - Могилев, 1993. - С.184-191.

23. Сиваченко Л.А., Рыбаков А.Н., Селезнев Н.Г., Шуляк В.А. К расчету гидродинамики вихревых потоков в винтовых мельницах//Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г. - Могилев, 1993. - С.192-198.

24. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А. Анализ резервов интенсификации процессов измельчения //Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г. - Могилев, 1993. - С.245-253.

25. Сиваченко Л.А., Шуляк В.А. О проблемах и путях развития смесительных машин //Материалы комплекса научных и научно-технических мероприятий стран СНГ (конференция, семинар, школа, выставка), Одесса сентябрь 1993г. - Одесса, 1993. - С.333-336.

26. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А. Классификация способов разрушения и диспергирования твердых тел и дисперсных сред //Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г. - Могилев, 1993. - С.260-269.

27. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А., Березюк Д.И. Мельница для тонкого измельчения зерна //Современное состояние мукомольно-крупяного производства и перспективы его развития: Сб. тр. Междуна. науч.-техн. конф. «Мельница-97», Москва, 2-6 июня 1997г. - Москва, 1997. - С.132.

28. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А., Лопатин А.Т. Криоизмельчение полимеров в винтовых мельницах //Механохимия и механическая активация: Доклады междуна. научн. семинара, С.Петербург, 22-26 мая 1995г. - С.Петербург, 1995. - 4с.

29. Шуляк В.А. Теоретический анализ процессов криообработки полимерных материалов //Механохимия и механическая активация: Доклады междуна. научн. семинара, С.Петербург, 22-26 мая 1995г. - С.Петербург, 1995. - 4с.

30. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А. Классификация механических методов измельчения и дробления дисперсных материалов //Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г.- Могилев, 1993.- С.254-259.

31. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А. Классификация способов разрушения и диспергирования твердых тел и дисперсных сред //Технологические проблемы измельчения и механоактивации: Материалы науч.-техн. семинара стран содружества, Могилев, 21-23 октября 1992г.- Могилев, 1993.- С.260-269.

32. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А. Универсальные критерии сравнительной оценки измельчителей //Тезисы и доклады 1-ой конференции по сравнению различных видов измельчителей, Одесса сентябрь 1993г.- Одесса, 1993.- Ч. I.- С.7-10.

33. Федоров Г.С., Шуляк В.А. Прогнозирование эксплуатационных свойств циклона/ Процессы и аппараты пищевых производств, их интенсификация и управление / Межвуз.сб. науч. тр. - Л.: ЛТИХП, 1988.- С. 75-78.

Статьи в периодических изданиях

34. Шуляк В.А., Березюк Д.И. Исследование процессов механотермической обработки пищевых дисперсных материалов //Инженерно-физический журнал.- 1999.- Том 72, № 4.- С. 614-617.

35. Шуляк В.А., Березюк Д.И. Низкотемпературная технология производства натуральных пищевых красителей //Холодильная техника.- 1998.- №9.- С. 28-29.

36. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Натуральный пищевой краситель //Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья.- 1998.-№2.- С.33.

37. Березюк Д.И., Шуляк В.А. Применение тепловых насосов в низкотемпературной технологии производства натуральных пищевых красителей //Известия Академии аграрных наук Республики Беларусь.- 1998.-№1.- С.81-84.

38. Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г., Шуляк В.А. Роторно-цепные дробилки-мельницы //Строительные и дорожные машины, 1996.- №5.- С. 21-22.

39. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г. Измельчители с адаптивными рабочими органами в технологии мукомольного и комбикормового производства //Известия вузов. Пищевая технология, 1996.- №3-4.- С.52-54.

40. Шуляк В.А., Селезнев Н.Г., Сиваченко Л.А. Адаптивная дезинтеграция в технологиях рудоподготовки и подготовки проб к анализу //Обогащение руд.- 1996.- № 1.- С. 45-50.

41. Шуляк В.А., Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г. Адаптивные роторно-цепные дробилки //Обогащение руд.- 1994.- № 3.- С. 40-44

42. Шуляк В.А., Федоров Г.С., Березюк Д.И. Аппараты для сушки и механотермической обработки высоковлажных материалов //Инженерно-физический журнал/- 1997.- Том 70, №5.- С. 840-841.

43. Сиваченко Л.А., Селезнев Н.Г., Шуляк В.А. Проблема износа рабочего оборудования дробильно-размольных машин //Трение и износ.- 1995.- Том 16, № 3.- С. 599-609.

44. Сиваченко Л.А., Шуляк В.А., Бочков С.С. Поставьте пружину – и все развалится// Наука и жизнь.- 1993.- № 4.- С. 46-47.

45. V. Shulyak, G. Fedorov, D. Berezuk Apparatus for Drying and Mechanical-Thermal Treatment of high density Materials//Journal of engineering physics and thermophysics. February 1999. P. 487-488

46. V. Shulyak, D. Berezuk Study of Processes of Mechanical-Thermal Treatment of Food Dispersed Materials //Journal of engineering physics and thermophysics. February 2000. P. 586-614.

47. Шуляк В.А., Доброскок Л.П., Болухова М.Е. Технологические аспекты влияния различных добавок на сохранность красящих пигментов свеклы //Известия вузов. Пищевая технология.-2001.-№4.-С.26-29.

48. Шуляк В.А., Довидович Д.В. Проблемы сушки пряноароматических трав //Хранение и переработка сельскохозяйственного сырья.-2004.-№3.- С.29-32.

Депонированные рукописи

49. Динамика движения частиц твердой фазы во встречных потоках газозвеси/ Г.С. Федоров, В.Н. Лепилин, В.А. Шуляк / Могилев. технол. ин-т.- Могилев, 1988.– 10с.- Деп. в ВНИИС легищемаш 24.05.1988.- № 842-мл 88// Указатель ВИНТИ: Депонированные научные работы. Естественные и точные науки, техника.- 1988.- №7.- С.58.

Авторские работы

50. А.с. 1216599 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов / Г.С.Федоров, Б.С. Сажин, А.В. Акулич, В.А. Шуляк, П.В. Акулич. - Оpubл. 07.03.86, Бюл. №9.
51. А.с.1331205 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов/ Федоров Г.С., Сажин Б.С., Шуляк В.А., Ринг А.В. Заявка ДСП 392757/24-06 Полож. решение ВНИИГПЭ от 17.06.86.
52. А.с. 1400216 СССР. Устройство для термообработки дисперсных материалов/ Г.С. Федоров, В.А. Шуляк - Заявка ДСП 4011604/31; Положительное решение ВНИИГПЭ от 17.04.87.
53. А.с. 1571377 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов / Г.С. Федоров, Б.С. Сажин, А.В. Акулич, В.А. Шуляк. - Оpubл. 15.06.90, Бюл. № 22.
54. А.с. 1767303 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов / Г.С.Федоров, В.А. Шуляк, А.В. Ринг и др. - Оpubл. 07.10.92, Бюл. № 37.
55. А.с. 1768897 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов /Федоров Г.С., Шуляк В.А. - Оpubл. 15.10.92, Бюл. № 38.
56. А.с. 1767304 СССР. Установка для сушки дисперсных материалов / Г.С.Федоров, В.А. Шуляк.- Оpubл.07.10.92, Бюл. № 37.
57. А.с. 1786924 СССР. Сушилка для сыпучих материалов / Г.С.Федоров, В.А Шуляк. – Заявка ДСП №4011591/31; Полож. решение ВНИИГПЭ от 25.07.86.
58. А.с. 1812689 СССР Винтовая мельница / Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк, А.М. Кургузиков и др. - Заявка ДСП № 4922709/33; Полож. решение ВНИИГПЭ от 29.07.91.
59. Пат. 2000839 РФ. Устройство для измельчения /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, В.Н. Башаримова, Н.Г. Селезнев, А.Н. Рыбаков. - Оpubл. 15.10.93, Бюл. № 37-38.
60. Пат. 2001764 РФ Диспергатор для жидкотекучих композиций /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. /Оpubл. 30.10.93. Бюл. № 39-40.
61. Пат. 2001765 РФ. Рабочий орган смесителя /А.К. Шмагилев, Л.А. Сиваченко, В.А. Шуляк и др. - Оpubл. 01.07.91.- Бюл. №39-40.
62. Пат. 2012419 РФ Способ обогащения полезных минералов /Л.А. Сиваченко, Н.Г.Селезнев, А.М. Кургузиков, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова.- Оpubл.15.05.94.-Бюл. № 9.
63. Пат. 2012412 РФ. Мельница /В.А. Шуляк, А.А. Дудкин, В.Н. Башаримова и др. - Оpubл.15.05.94.- Бюл. № 9.
64. Пат. 2018364 РФ. Мельница для тонкого измельчения /Л.А. Сиваченко, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова. - Оpubл.30.08.94.- Бюл. № 16.
65. Пат. 2018365 РФ. Измельчитель-активатор /Л.А. Сиваченко, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова. - Оpubл. 30.08.94.- Бюл. №16.
66. Пат. 2018366 РФ. Диспергатор /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл. 30.08.94.- Бюл. №16.
67. Пат. 2018446 РФ. Мельница-смеситель /Л.А. Сиваченко, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова. - Оpubл.30.08.94.- Бюл. №16.
68. Пат. 2018448 РФ. Устройство для смешивания и диспергирования / В.А. Шуляк, Н.Г.Селезнев, В.Н. Башаримова, Л.А. Сиваченко. - Оpubл. 30.08.94.- Бюл. №16.
69. Пат. 2019311 РФ. Устройство для просеивания сыпучих материалов / Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл.15.09.94.- Бюл. № 17.
70. Пат. 2024314 РФ. Мельница для сыпучих материалов / Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл.15.12.94.- Бюл. №23.

71. Пат. 2024316 РФ Мельница-смеситель /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл. 15.12.94.-Бюл. № 23.
72. Пат. 2028822 РФ. Винтовая мельница / Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл.20.02.95.- Бюл. № 5.
73. Пат. 2028823 РФ. Устройство для измельчения /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, В.Н. Башаримова и др. - Оpubл.20.02.95.- Бюл. № 5.
74. Пат. 2028824 РФ. Устройство для диспергирования /Л.А. Сиваченко, В.А., Шуляк, П.А. Орлов и др. - Оpubл. 20.02.95.- Бюл. № 5.
75. Пат. 2034658 РФ. Рабочий орган измельчителя / Л.А. Сиваченко, Н.Г.Селезнев, В.А. Шуляк, А.Н.Рыбаков, В.Н. Башаримова. - Оpubл. 10.05.95. -Бюл. № 13.
76. Пат. 2038152 РФ. Устройство для измельчения /Л.А. Сиваченко, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова и др. - Оpubл.27.06.95.- Бюл. № 18.
77. Пат. 2040334 РФ Шексовая дробилка / Л.А. Сиваченко, Н.Г.Селезнев, В.А. Шуляк, А.Н.Рыбаков, В.Н. Башаримова. - Оpubл. 27.07.95. -Бюл. № 21.
78. Пат. 2052291 РФ. Измельчитель /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк, В.Н. Башаримова.- Оpubл. 20.01.96.- Бюл. № 2.
79. Пат. 2057584 РФ. Дробилка /Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, В.Н. Башаримова. - Оpubл.10.04.96.- Бюл. №10.
80. Пат. 2057589 РФ. Мельница /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, В.Н. Башаримова. - Оpubл.10.04.96.- Бюл. № 10.
81. Пат. 2057590 РФ. Установка для диспергирования /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев и др. - Оpubл.10.04.96.- Бюл. №10.
82. Пат. 2058825 РФ. Измельчитель /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл.27.04.96.- Бюл. № 12.
83. Пат. 2070095 РФ. Мельница для тонкого помола /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев и др. - Оpubл. 10.12.96.- Бюл. № 34.
84. Пат. 2072262 РФ. Измельчитель /Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.А. Шуляк и др. - Оpubл. 27.01.97.- Бюл. №3.
85. Пат. 2073183 РФ. Установка для сушки дисперсных материалов /В.А. Шуляк, Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.Н. Башаримова.- Оpubл.10.02.97.-Бюл. № 4.
86. Пат. 2110025 РФ. Способ сушки термолабильных материалов /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк. - Оpubл. 27.04.98.- Бюл. №12.
87. Пат. 1817 РБ. Способ производства мучных изделий /В.А. Васькина, Е.С. Новожилова, В.А. Шуляк, и др. - Оpubл. 23.03.97. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 1997.- №1-2.- С.40.
88. Пат. 2818 РБ. Устройство для получения тонкодисперсных порошков /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк. - Оpubл. 30.06. 99. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 1999.- №3-4.- С.4.
89. Пат. 2857 РБ. Устройство для измельчения /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк. - Оpubл. 30.06. 99. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 1997.- №3-4.- С.8.
90. Пат. 2653 РБ. Дробилка / М.П. Никитенко, Л.А. Сиваченко, Н.Г. Селезнев, В.Е. Головнев, В.А. Шуляк. Оpubл. 25.09.1998. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 1998.- №3-4.- С.12.
91. Пат. 3598 РБ. Дробилка /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк, В.Н. Башаримова. Оpubл. 22.06.2000. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 2000.- №3-4.- С.28.
92. Пат. 3762 РБ. Измельчитель /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк, В.Н. Башаримова. - Оpubл. 30.12. 2000. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 2000.- №5-6.- С.36.
93. Пат. 4370 РБ. Роторный тонкопленочный испаритель /В.А. Шуляк, Д.И. Березюк, В.Н. Башаримова. - Оpubл. 30.03.2002. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 2002.- №1-2.- С.29.
94. Пат. 6310 РБ. Устройство для сушки жидких и пастообразных материалов/В.А. Шуляк, Левандовский С.Р., Башаримова В.Н. - Оpubл. 20.12.2003. //Афицыйны бюлетэнь /ДПВРБ.- 2002.- №5-6.- С.29.

РЕЗЮМЕ

Шуляк Виктор Анатольевич

Теоретические и практические основы создания комбинированных агрегатов для сушки и механотермической обработки пищевых материалов

СУШИЛКИ, МЕЛЬНИЦЫ, ДРОБИЛКИ, ЦИКЛОНЫ, КЛАССИФИКАТОРЫ, ПИЩЕВЫЕ ПОРОШКИ, ДВУХФАЗНЫЕ ТЕЧЕНИЯ, ЗАКРУЧЕННЫЕ ПОТОКИ, ВСТРЕЧНО-СОУДАРЯЮЩИЕСЯ ПОТОКИ, КРИОГЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Объектом исследования явились новые высокоэффективные аппараты для сушки и механотермической обработки пищевых дисперсных материалов и сред, совмещающие в одном рабочем объеме несколько технологических операций: сушку, измельчение, классификацию и сепарацию готовых порошковых материалов.

Целью работы является разработка теоретических основ анализа, проектирования и расчета нового, а также модернизации существующего оборудования для сушки и механотермической обработки дисперсных материалов и сред.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи.

Изучены закономерности протекания механических и тепло-массообменных процессов с участием твердой фазы, приводящих к изменению свойств, структуры или формы дисперсного материала.

Проведен анализ факторов наибольшего влияния на процесс и намечены пути интенсификации и критерии оптимизации этих процессов.

Выполнен системный анализ конструктивных решений и выработаны подходы и методы создания нового оборудования для конкретного технологического назначения.

Проведен теоретический анализ отдельных наиболее значимых этапов технологической обработки пищевых дисперсных материалов, в частных конкретных случаях их конструктивного оформления.

Выполнены экспериментальные исследования особенностей гидродинамики, теплообмена и механотермической обработки многофазных сред в новых конструкциях аппаратов для сушки и механотермической обработки.

Проведен анализ и обобщение экспериментальных данных, сравнение полученных результатов с теоретическими решениями и намечены области наиболее рационального использования новых типов аппаратов и агрегатов и опыт их практического использования.

Доказано значительное влияние сопутствующих процессов (предварительная подготовка материала к сушке, смешивание, измельчение, классификация и сепарирование готового продукта из отработанного теплоносителя). Предложены новые конструктивные решения вспомогательных аппаратов для смешивания, классификации и сепарации.

Анализ опыта промышленных испытаний низкотемпературной вакуумной сушилки-диспергатора и промышленной эксплуатации криогенных мельниц позволил доказать высокую эффективность этих агрегатов при переработке волокнистых, вязкоупругих материалов и материалов с высокой неоднородностью исходного состава, например косточковых плодов, ягод и фруктов.

Полученные теоретические, экспериментальные и практические результаты могут найти применение при проектировании новых агрегатов для сушки, измельчения и МТО различных дисперсных материалов и сред. При подготовке инженеров-механиков и инженеров-исследователей, а также для аспирантов и научных работников, занимающихся разработкой новых способов переработки пищевых материалов, теоретическим анализом гидродинамики, тепло- и массообмена, напряженного состояния и физики разрушения в пищевых дисперсных материалах и средах.

РЭЗЮМЕ

Шуляк Віктар Анатольевіч

Тэарэтычныя і практычныя асновы стварэння камбінаваных аграгатаў для сушкі і механатэрмічнай апрацоўкі харчовых матэрыялаў

СУШЫЛКІ, МЛЫНЫ, ДРАБЛКІ, ЦЫКЛОНЫ, КЛАСІФКАТАРЫ, ХАРЧОВЫЯ ПАРАШКІ, ДВУХФАЗНЫЯ ЦЯЧЭННІ, ЗАКРУЧАННЯ ПАТОКІ, СУСТРЭЧНА-СУТЫКНЯЛЬНЫЯ ПАТОКІ, КРЫАГЕННЫЯ ТЭХНАЛОГІІ

Аб'ектам даследвання з'явіліся новыя высокаэфектыўныя апараты для сушкі і механатэрмічнай апрацоўкі харчовых дысперсных матэрыялаў і асяроддзя, аб'ядноўваючыя ў адным рабочым аб'еме некалькі тэхналагічных аперацый: сушку, драбленне, класіфікацыю і сепарацыю парашковых матэрыялаў.

Мэтай работы з'яўляецца распрацоўка аналізу, праектавання і разліку новага, а таксама мадэрнізацыі існуючага абсталявання для сушкі і механатэрмічнай апрацоўкі харчовых дысперсных матэрыялаў і асяроддзя.

Для дасягнення пастаўленай мэты былі вырашаны наступныя задачы.

Вывучаны заканамернасці працякання механічных і цепла-масаабменных працэсаў з удзелам цвёрдай фазы, прыводзячых да змянення ўласцівасцей, структуры або формы дысперснага матэрыяла.

Праведзены аналіз фактараў найбольшага ўплыву на працэс і намечаны шляхі інтэнсіфікацыі і крытэрыі аптымізацыі гэтых працэсаў.

Выкананы сістэмны аналіз канструктыўных рашэнняў і вырабатаны подыходы і метады стварэння новага абсталявання для канкрэтнага тэхналагічнага прызначэння.

Праведзены тэарэтычны аналіз асобных, найбольш значных этапаў тэхналагічнай апрацоўкі харчовых дысперсных матэрыялаў, у прыватных канкрэтных выпадках іх канструктыўнага афармлення.

Выкананы эксперыментальныя даследванні асаблівасцей гідрадынамікі, цепламасаабмена і механічнай апрацоўкі мнагафазных асяроддзяў у новых канструкцыйных апаратаў для сушкі і механатэрмічнай апрацоўкі.

Праведзены аналіз і абагульненне эксперыментальных даных, параўнанне атрыманых вынікаў з тэарэтычнымі рашэннямі і намечаны галіны найбольш рацыянальнага выкарыстоўвання новых тыпаў апаратаў і аграгатаў.

Даказаны значны ўплыў спадарожнічаючых працэсаў (папярэдня падрыхтоўка матэрыяла да сушкі, змешванне, змяльчэнне, класіфікацыя і сепарыраванне гатовага прадукта з адпрацаванага цепланосьбіта). Прапанаваны новыя канструктыўныя рашэнні дапаможных апаратаў для змешвання, класіфікацыі і сепарацыі.

Аналіз вопыта прамысловых выпрабаванняў нізкатэмпературнай вакуумнай сушылкі-дыспергатора і прамысловай эксплуатацыі крыягенных млыноў дазволілі даказаць высокую эфектыўнасць гэтых аграгатаў пры перапрацоўцы валакністых, вязкапрутковых матэрыялаў і матэрыялаў з высокай неаднароднасцю зыходнага састава, напрыклад, костачкавых пладоў, ягад і фруктаў.

Атрыманыя тэарэтычныя, эксперыментальныя і практычныя вынікі могуць знайсці прымяненне пры праектаванні новых аграгатаў для сушкі, змяльчэння і механатэрмічнай апрацоўкі розных дысперсных матэрыялаў і асяроддзя. Пры падрыхтоўцы інжынераў-механікаў і інжынераў-даследчыкаў, а таксама для аспірантаў і навуковых работнікаў, займаючыхся распрацоўкай новых спосабаў перапрацоўкі харчовых матэрыялаў, тэарэтычным аналізам гідрадынамікі, цепла- і масаабмена, напружанага стану і фізікі разбурэння ў харчовых дысперсных матэрыялах і асяроддях.

ABSTRACT

Victor A. Shulyak

Theoretical and practical bases of creation the combined units for drying, mechanical and thermal processing of food materials

DRYERS, MILLS, CRUSHERS, CYCLONES, QUALIFIERS, FOOD POWDERS, THE BIPHASE CURRENTS, THE TWIRLED STREAMS, COUNTER STRIKELY MERGING STREAMS, CRYOGENIC TECHNOLOGIES

New highly effective devices for drying, mechanical and thermal processing of food disperse materials and systems, combining in one working volume some technological operations: drying, crushing, classification and separation of ready powder materials was an object of the research.

The purpose of the work was of bases of the analysis, designing and calculation new equipment for drying, mechanical and thermal processing of disperse materials and systems and modernization of the existing one.

For achievement of the object following problems were solved.

Laws of mechanical, heat and mass transfer processes with participation of the solid phase, resulting in change of properties, structures or forms of a disperse material were investigated.

The analysis of factors of the greatest influence on the process was carried out and ways of intensification and criteria of optimization of these processes were planned.

The system analysis of constructive decisions is executed and approaches and methods of creation of the new equipment for concrete technological purpose are produced.

The theoretical analysis of separate, the most significant stages of technological processing of food disperse materials, in individual concrete cases of their constructive registration was carried out.

Experimental researches of features of hydrodynamics, heat and mass transfer and machining of multiphase systems in new designs of devices for drying and mechanical thermal processing were executed.

The analysis and generalization of experimental data, comparison of the received results with theoretical decisions was carried out and areas of the most rational using a new types of devices and units were determined.

Significant influence of accompanying processes (preliminary preparation of material for drying, mixing, crushing, classification and allocation of a ready product from the fulfilled heat-carrier) was proved. New constructive decisions of auxiliary devices for mixing, classification and separation were offered.

The analysis of experience of industrial tests a low-temperature vacuum dryer -dispensator and commercial operation of cryogenic mills allowed to prove high efficiency of these installations at processing fibrous, viscoelastic materials and materials with high heterogeneity of initial structure, for example fruits with seed, berries and fruit.

The received theoretical, experimental and practical results can find application at designing new units for drying; crushing and thermal processing various disperse materials and systems. By preparation of engineers - mechanics and engineers - researchers, and also for post-graduate students and the science officers engaged in development of new ways of processing of food materials, the theoretical analysis of hydrodynamics, heat and mass transfer, an intense condition and physics of destruction in food disperse materials and systems.