

На правах рукописи

СВИРИДОВ ДМИТРИЙ ПЕТРОВИЧ

**УЛЬТРАЗВУКОВОЕ ИЗМЕЛЬЧЕНИЕ МАТЕРИАЛА
В ПРОИЗВОДСТВЕ МОЛОКА КЕДРОВОГО**

05.17.08 – Процессы и аппараты химических технологий

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Томск - 2011

Работа выполнена в Ангарской государственной технической академии

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Семёнов Иван Александрович

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Коробочкин Валерий Васильевич

кандидат технических наук
Малков Юрий Алексеевич

Ведущая организация: ОАО «ИркутскНИИХИММАШ», г. Иркутск

Защита состоится «___» _____ 20__ г. в ___ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 212.269.08 при Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: 634034, г. Томск, пр. Ленина, 43, корпус 2, ауд 117.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

Автореферат разослан «___» _____ 20__ г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций
доцент, к.т.н.

_____ **Петровская Т.С.**

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Процессы измельчения и диспергирования материалов имеют большое значение в химической, пищевой и других отраслях промышленности. Благодаря диспергированию нерастворимых компонентов удается интенсифицировать ряд химических и массообменных процессов. В пищевой промышленности получают продукты в виде эмульсий и суспензий, что значительно повышает их усвояемость, позволяет хранить и потреблять их в однородном виде.

Процессы измельчения связаны с большими энергетическими затратами, которые трудно поддаются расчету. Твердый материал можно разрушать и измельчать до частиц необходимого размера раздавливанием, раскалыванием, помолом, резанием, истиранием, ударом и различными комбинациями этих способов. Имеющиеся в литературе аналитические зависимости для расчета производительности и потребляемой мощности измельчителей, часто не удовлетворяют необходимым требованиям. Поэтому поиск путей описания этих процессов представляет научный и практический интерес.

Для проведения процессов измельчения промышленность выпускает ряд машин и аппаратов. Однако, поиск более совершенных конструкций продолжается. Это объясняется возрастающей потребностью в тонко измельченных веществах, повышением требований к чистоте продуктов измельчения, стремлением снизить удельный расход энергии и металла.

Одним из перспективных путей тонкого диспергирования является использование ультразвуковой кавитации. Разрушение материала в этом случае происходит под действием ударных волн и микроструек жидкости. Эти процессы применяются в промышленности, однако, данные явления недостаточно изучены. Мало разработана аппаратура для эффективного проведения процессов измельчения.

Исследование процессов диспергирования веществ в условиях акустических воздействий и разработка оборудования для их эффективного проведения, является актуальным.

Диссертационная работа выполнялась в рамках научной темы Министерства образования и науки РФ №0120.0603208 (2005-2010 г.г.) «Исследование интенсификации тепло- и массообмена с помощью кавитации и акустических воздействий».

Цель исследования

Разработка технологии и аппаратуры для получения кинетически устойчивых дисперсных систем в производстве молока кедрового на основе исследования процессов измельчения дисперсной фазы в условиях акустической кавитации.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Определение максимального размера частиц исследуемого материала, отвечающих требованиям кинетической устойчивости дисперсной системы.
2. Разработка способа и устройства для определения гранулометрического состава измельчаемого материала.

3. Исследование процессов измельчения дисперсной фазы в условиях акустической кавитации, структуры измельчаемого материала, определение его механической прочности и выполнение оценки энергетической эффективности процесса измельчения в условиях акустической кавитации.
4. Разработка конструкции ультразвукового диспергатора, метода расчета основных параметров, установление режимов его эффективной работы.
5. Разработка схемы производства нового продукта на основе полученных результатов. Аппаратурное оформление ее основных стадий с использованием ультразвукового диспергирования взвешенной фазы.

Объект исследования

Кавитационному измельчению подвергалась скорлупа кедрового ореха. Исследованиями Института химии им. А.Е. Фаворского СО РАН установлено содержание в этом продукте ценных витаминов, микроэлементов и биологически активных веществ, обуславливающих его лечебно-профилактические свойства. Восточно-Сибирский регион обладает большими запасами этого сырья. В связи с этим осуществление промышленного производства молока кедрового является важной хозяйственной задачей.

Научная новизна

- Установлен диаметр частиц взвешенной фазы, при котором дисперсная система является кинетически устойчивой. На основании предложенной величины значимого перемещения диспергированной частицы, и путем сопоставления скоростей перемещения частиц под действием броуновского движения и седиментации предложено уравнение для расчета максимального диаметра взвешенных частиц, при котором соблюдается условие устойчивости взвеси. Расчет подтвержден экспериментальными измерениями.
- Установлено бимодальное распределение частиц материала при ультразвуковой обработке, характеризующееся появлением моды с максимумом в районе 250 мкм, и факт снижения эффективности кавитационного измельчения для частиц с диапазоном размеров 200÷300 мкм, в связи с их соизмеримостью с резонансным диаметром кавитационного пузыря, который равен 293 мкм. Для определения гранулометрического состава измельчаемого материала разработан эффективный способ исследования распределения взвешенных частиц дисперсных систем по размерам
- Установлено соотношение между амплитудой и частотой акустических колебаний, равное $6,538 \cdot 10^{-2}$ Гц·м, при котором ультразвуковой диспергатор находится в резонансном со средой режиме работы, а критерий эрозийной активности достигает своего максимального значения, равного $1,29 \cdot 10^{-6}$. Рассчитана оптимальная интенсивность ультразвуковой обработки исследованной дисперсной системы, которая составила 125 кВт/м^2 , которая необходима при проектировании ультразвукового измельчителя.

Практическая значимость работы

- Получены исходные данные для проектирования диспергатора, и определена энергетическая эффективность процесса измельчения в условиях акустической кавитации: установлено значение удельной работы измельчения скорлупы ореха кедрового, которая составляет $2425 \pm 181 \text{ Дж/м}^2$ для сухого материала, и $1369 \pm 169 \text{ Дж/м}^2$ для вымоченного.

- Разработана конструкция ультразвукового лабиринтного диспергатора, позволяющая регулировать расход обрабатываемой среды и продолжительность ее облучения. Дан метод расчета его основных параметров.

- На основе гранулометрического анализа измельченного материала установлен максимальный размер частиц, который должен быть достигнут при механическом измельчении перед подачей его на ультразвуковую обработку равный границе устойчивой моды гранулометрического распределения, которая соответствует дисперсности не более 200 мкм.

- Разработана схема производства молока кедрового и предложено аппаратное оформление ее стадий. Для осуществления стадии диспергирования рекомендован ультразвуковой лабиринтный диспергатор (Патент RU 2325231 C2 МПК B02C 19/18), для работы стадии сепарации рекомендована центрифуга с регулируемым отбором продуктов разделения (Патент RU 2322306 C2, МПК B04B 11/00).

На защиту выносятся

- Результаты исследований кинетической устойчивости водной системы в производстве молока кедрового.
- Оценка энергетической эффективности процесса кавитационного измельчения;
- Конструкция лабиринтного ультразвукового диспергатора и режимы его эффективной работы.
- Методика расчета основных параметров лабиринтного ультразвукового диспергатора.
- Способ исследования гранулометрического состава дисперсного материала.
- Схема производства молока кедрового, ее аппаратное оформление.

Реализация работы

Материалы диссертации используются в учебном процессе Ангарской государственной технической академии при изучении курса процессов и аппаратов химической технологии. Результаты работы положены в основу технического проекта производства молока кедрового производительностью 65 тонн готового продукта в год в ООО «Финита» г. Ангарск, Иркутской области.

Апробация работы

Основные положения диссертационной работы доложены на Международных научных конференциях «Математические методы в технике и технологии» 2008 – 2010 гг., на Всероссийской конференции «Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России», г. Улан-Удэ, 2008 г. Они обсуждены и получили одобрение на ежегодных научно-технических конференциях «Современные технологии и научно-технический прогресс» Ангарской государственной технической академии, 2003 – 2010 г.г.

Публикации

Основные положения и результаты диссертационной работы изложены в 15 публикациях, в том числе в 3 статьях в журналах, рекомендованных ВАК, и 4 патентах на изобретения.

Структура и объем работы

Диссертационная работа изложена на 148 страницах машинописного текста и состоит из введения, четырех глав, заключения, выводов, списка

литературы, включающего 178 наименований, 5 приложений, 49 рисунков и 20 таблиц.

Автор выражает глубокую благодарность заведующему кафедрой Химической технологии топлива Ангарской государственной технической академии профессору, доктору технических наук Ульянову Борису Александровичу за ценные советы и замечания которые сыграли важную роль при выполнении данной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

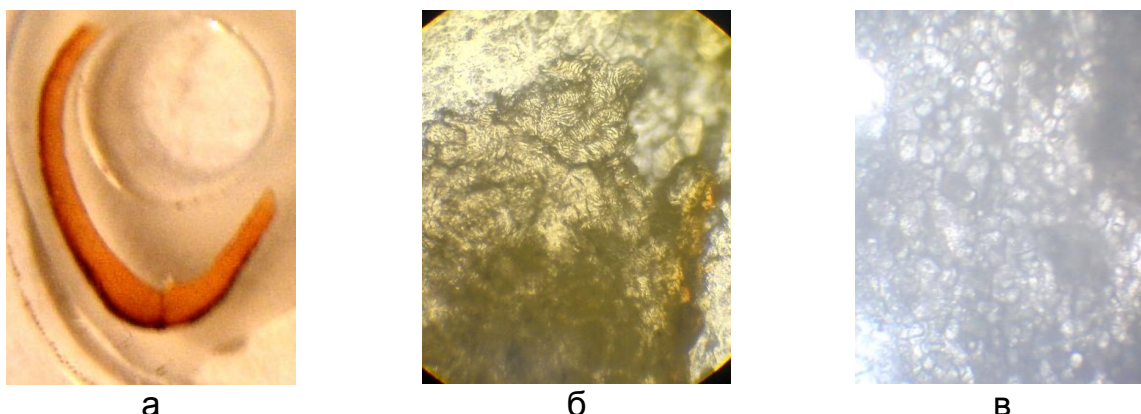
Во введении обоснована актуальность работы, сформулированы задачи исследования и основные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 рассмотрены способы измельчения материала и методы анализа гранулометрического состава продуктов измельчения. Рассмотрены основные конструкции типовых механических измельчителей. Приведен обзор патентов на способы получения мелкодисперсных взвесей и конструкции машин для их реализации. Особое внимание уделено коллоидным измельчителям, обеспечивающим тонкий помол материала. Отмечены недостатки этих машин, такие как периодичность работы, негарантированная обработка всего объема жидкости, низкая скорость движения взвеси по аппарату, которые побудили к разработке новой конструкции диспергатора.

В заключении главы рассмотрены пути переработки ореха кедрового и результаты исследований Института химии им. А.Е. Фаворского СО РАН по химическому составу и биологическим свойствам нового продукта, которые и определили выбор объекта исследования.

На основе анализа литературных данных сформулированы задачи исследования.

В главе 2 изучена микроструктура, физические и механические свойства измельчаемого материала. Микроструктура тканей скорлупы и ядра ореха определялась с помощью оптического микроскопа. Для этого были приготовлены проникаемые для видимого света препараты (рис. 1).



а
б
в
Рис. 1. Препарированная скорлупа (а), микрофотографии скорлупы (б) и ядра (в) кедрового ореха

Установлено, что материал обладает изотропной структурой, клетки имеют форму близкую к сферам, а расположение их в пространстве характеризуется как случайное.

Одним из важнейших требований к продукту - молоку кедровому - является обеспечение кинетической устойчивости его водной взвеси, которая обуславливается воздействием броуновского движения на диспергированные частицы. Для частиц малых размеров хаотические перемещения при

броуновском движении становятся соизмеримыми и даже превышают направленное перемещение под действием силы тяжести. В этом случае частицы становятся трудно оседающими, а взвесь приобретает требуемую кинетическую устойчивость.

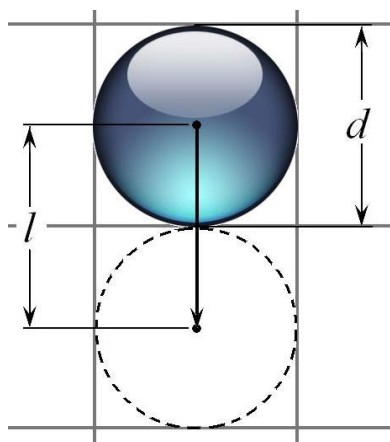


Рис. 2. Схема осаждения частицы в дискретном пространстве

Для оценки диаметра частиц, соответствующих данным требованиям, был рассмотрен процесс осаждения в двумерном дискретном пространстве (рис. 2). Размер элементарной ячейки пространства был принят равным минимально-возможному размеру – диаметру рассматриваемой частицы d . В этом случае значимое перемещение l , при котором частица целиком переходила из одной ячейки в другую, также равнялась диаметру d .

В ламинарном режиме движения скорость осаждения одной частицы определяется формулой Стокса:

$$W_{oc} = \frac{d^2 g}{18\mu_c} \frac{\rho_T - \rho_C}{\rho_C}, \quad (1)$$

где d – диаметр частиц, м; g – ускорение свободного падения, м/с²; ρ_T , ρ_C – плотность частицы и среды, соответственно, кг/м³; μ_c – вязкость среды, Па·с.

Среднеквадратичное перемещение частиц при броуновском движении можно определить по формуле Эйнштейна-Смолуховского:

$$S^2 = \frac{2RT\tau}{6\pi\mu_c N_A d/2}, \quad (2)$$

где R – универсальная газовая постоянная, Дж/моль · К; T – температура, К; N_A – число Авогадро, моль⁻¹; τ – время, с.

В случае соизмеримости броуновских и гравитационных сил за одинаковый промежуток время τ значимое перемещение частицы за счет гравитационного осаждения l соизмеримо ее перемещению под действием броуновского движения S , что характеризуется условием $l^2 \approx S^2$.

Учитывая данное условие соизмеримости и сопоставляя ур. (1) и (2), получено выражение для расчета максимального диаметра частиц, при котором выполняется условие кинетической устойчивости взвеси:

$$d \approx \sqrt[4]{\frac{12 RT}{\pi N_A g (\rho_T - \rho_C)}} \quad (3)$$

Для скорлупы ореха кедрового в воде значение диаметра оказалось равным $d \approx 1,55 \times 10^{-6}$ м.

С целью экспериментальной проверки полученного результата было исследовано поведение частиц на установке, снабженной микроскопом с горизонтальной оптической осью. По шкале окуляра осуществлялось изме-

рение размеров произвольно выбранных частиц, их вертикальное перемещение и время, за которое оно произошло.

Выбор размера частиц, обладающих кинетической устойчивостью, проводился путем сравнения средних скоростей осаждения с нулевым значением. Для этого весь массив опытных измерений разбивался на группы в соответствии с размером частиц и выполнялась статистическая обработка результатов, которая показала, что скорость осаждения частиц размером менее 1,5 мкм не значительно отличается от нуля. Это согласуется с расчетом и подтверждает вывод о дисперсности исследуемого материала, при которой обеспечивается кинетическая устойчивость системы.

Для определения механической прочности материала была разработана установка (рис. 3), которая состояла из режущей оснастки 1, динамометра 2, устройства регистрации микродвижений с поворотным зеркалом 3 и выносной шкалой 4.

Верхний нож оснастки входил между двумя нижними ножами под собственным весом по скользящей посадке. Усилие от лебедки 5 приводило к движению режущей кромки ножа и повороту зеркала. Динамометр позволял измерять силу, развиваемую лебедкой при разрушении образца 6.

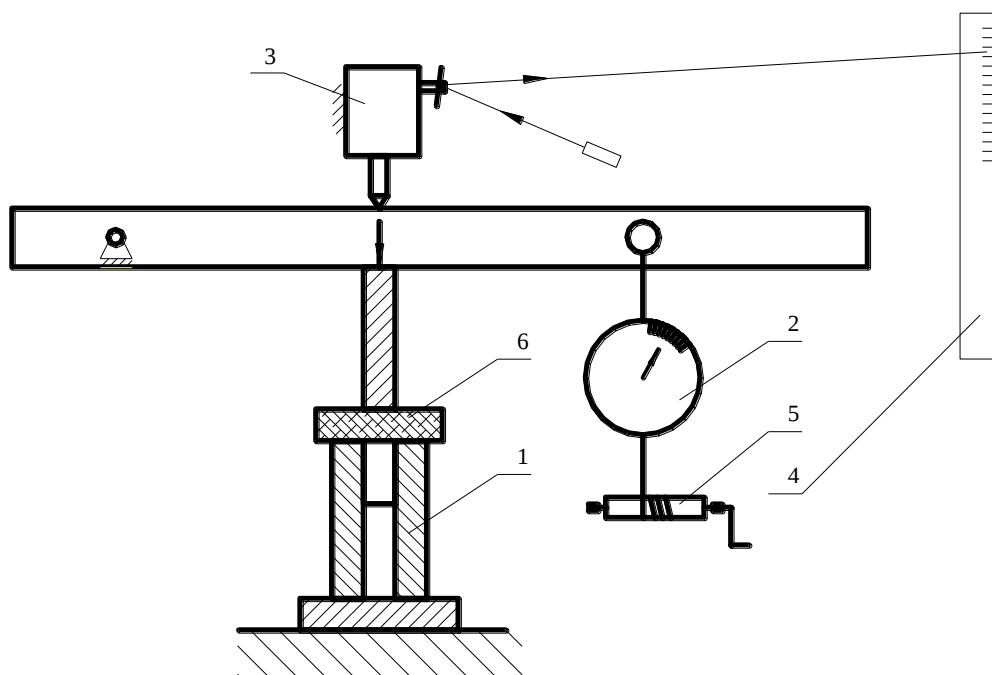


Рис. 3. Схема установки для механических испытаний

В процессе испытаний фиксировалось перемещение ножа в зависимости от приложенной силы F . Характерная зависимость представлена на рис. 4.

Площадь под кривой на рис. 4 представляет собой работу, затраченную на создание новой поверхности. Размеры образовавшегося сечения измерялись с точностью $\pm 0,01$ мм, а величина образовавшейся поверхности вдвое превышала площадь среза, так как срезание образцов происходило одновременно по двум плоскостям.

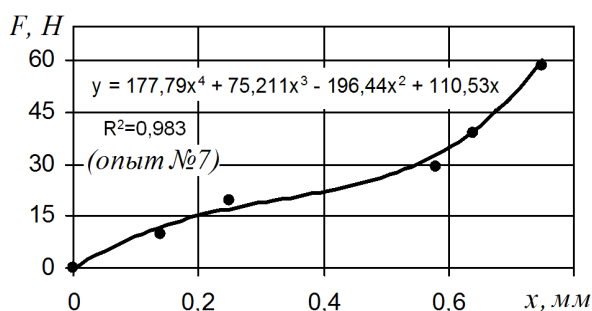


Рис. 4. Зависимость силы приложенной к режущему ножу от его смещения

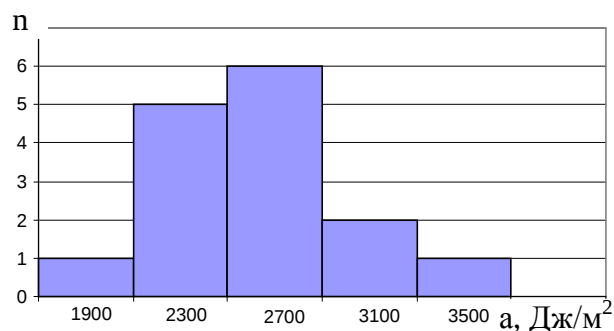


Рис. 5. Гистограмма распределения удельной работы

Было установлено, что экспериментальные кривые хорошо описываются полиномом четвертой степени $y=b_1x^4+b_2x^3+b_3x^2+b_4x$, интегрируя который в пределах от нулевого смещения до точки разрушения образца можно определить затраченную работу. Приведение ее к образующейся поверхности дает величину удельной работы измельчения при сдвиге a , Дж/м².

На рис. 5 приведена гистограмма распределения экспериментальных значений удельной работы, которая близка к нормальному распределению с показателями: среднее значение удельной работы $a \approx 2425$ Дж/м², стандартная ошибка $S_a = 103,2$ Дж/м². Для оценки влияния влаги на прочность измельчаемого материала аналогичные исследования проводились для вымоченной в воде скорлупы. Для нее среднее значение удельной работы составило $a \approx 1200$ Дж/м², стандартная ошибка $S_a = 91,2$ Дж/м².

В главе 3 рассмотрены закономерности ультразвукового кавитационного измельчения и выполнена оценка энергетической эффективности этого процесса.

Исследование процесса измельчения скорлупы ореха в условиях воздействия ультразвука, приводящего к возникновению кавитации, проводилось на

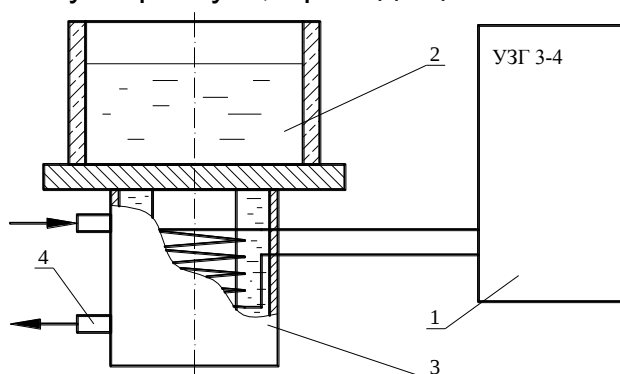


Рис. 6. Схема установки для обработки взвеси ультразвуком

установке, принципиальная схема которой представлена на рис. 6. Установка включала в себя ультразвуковой генератор 1 (УЗГ 3-4), ванну 2, и магнитострикционный преобразователь 3 со звуковой мощностью 1 кВт и номинальной частотой излучения 22 кГц. Для предотвращения нагрева преобразователя было предусмотрено его водяное охлаждение 4.

Скорлупа подвергалась первичному механическому измельчению в роторной мельнице с последующим определением гранулометрического состава образовавшейся взвеси.

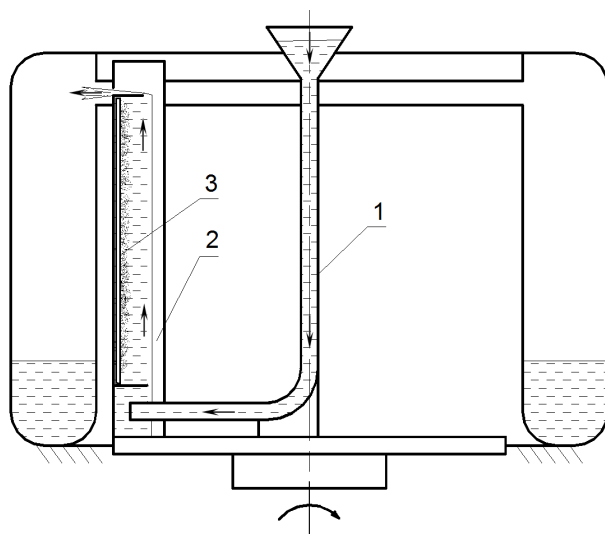


Рис. 7. Принципиальная схема осадителя

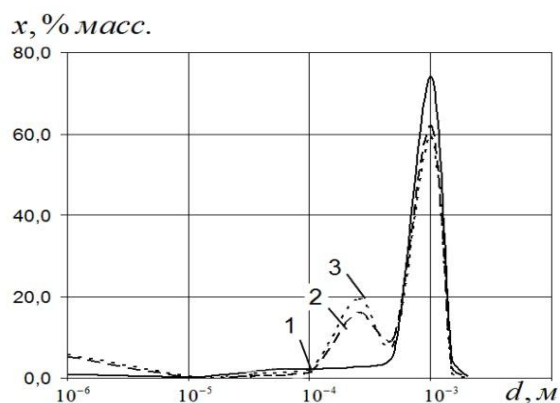


Рис. 8. Распределение частиц по размерам: 1 – исходная проба материала; 2, 3 – после ультразвуковой обработки 10 и 20 минут, соответственно.

Вследствие малых размеров частиц и небольшой разности плотностей среды и материала, использование известных методов анализа гранулометрии оказалось неэффективным. Это обстоятельство побудило к разработке нового способа определения гранулометрического состава измельчаемого материала путем осаждения частиц в поле центробежных сил.

Жидкость, содержащая взвешенные частицы, через канал 1 поступала в успокоительную камеру вращающегося осадителя 2 (рис. 7) и под напором перемещалась вверх к каналу отвода фугата. Частицы под действием центробежных сил осаждались на осадительную пластинку 3. Причем более крупные располагались ближе к входу суспензии, а мелкие – ближе к выходу фугата. После этого осадительную пластину извлекали вместе с осадком, осадок разделяли на фракции. Каждую фракцию взвешивали и измеряли размеры частиц с помощью светового микроскопа. Это позволяло установить распределение частиц по размерам. Способ и устройство для определения

гранулометрического состава защищены патентами РФ.

Было установлено, что распределение частиц по размерам в механически измельченном материале близко нормальному закону (кривая 1 на рис. 8).

После этого пробы материала смешивались с дистиллированной водой, помещались в ультразвуковую ванну, и производился запуск ультразвукового генератора.

В ходе экспериментов исследовалась зависимость эффективности процесса измельчения от продолжительности обработки, которая оценивалась по гранулометрическому составу обработанных ультразвуком проб (кривые 2, 3 на рис. 8).

Было установлено, что с увеличением продолжительности обработки гранулометрический состав постепенно смещается в сторону фракций с меньшим размером частиц. Кроме того, было отмечено, что процесс кавитационного измельчения протекает неравномерно, приводя к постепенному

росту массовой доли фракции со средним размером частиц ~ 250 мкм, что приводит к образованию моды в диапазоне от 200 до 300 мкм.

Устойчивость частиц такого размера можно объяснить, исходя из механизма кавитационного измельчения. Известно, что разрушение частиц при кавитации происходит с помощью ударных волн и микроструек, образующихся при схлопывании пузырьков. Первый из этих эффектов проявляется в том случае, если размер кавитационного пузырька превосходит размеры измельчаемых частиц, а второй – напротив, когда пузырек значительно меньше частицы.

Размеры кавитационного пузырька, до которого он растет под воздействием ультразвука, называется резонансным. Средний резонансный радиус пузырька R_p может быть приближенно оценен из уравнения:

$$f = \frac{1}{2\pi R_p} \sqrt{\frac{3\gamma}{\rho_{\text{ж}}} \left(P_0 + \frac{2\sigma}{R_p} \right)}, \quad (4)$$

где f – частота ультразвука, Гц; R_p – резонансный радиус, м; P_0 – внешнее давление, Па; σ – поверхностное натяжение, Н/м; $\rho_{\text{ж}}$ – плотность жидкости, кг/м³; γ – показатель политропы.

Решение (4) относительно R_p представляет собой кубическое уравнение:

$$\frac{4}{3} \frac{\pi^2 f^2 \rho_{\text{ж}}}{\gamma} R_p^3 - P_0 R_p - 2\sigma = 0. \quad (5)$$

Для расчета резонансного размера пузырька взяты условия эксперимента, а именно $f = 22$ кГц, $\rho_{\text{ж}} = 998$ кг/м³, $P_0 = 1,013 \cdot 10^5$ Па, $\sigma = 72,8 \cdot 10^{-3}$ Н/м. Так как рост и схлопывание пузырька протекает с огромной скоростью. Поэтому можно допустить, что процесс образования и разрушения пузырька протекает адиабатически и принять показатель γ равным показателю адиабаты трехатомного газа ($\gamma = 1,333$).

Решение уравнения 5 для указанных условий имеет три действительных корня R_p : -145,05 мкм; -1,437 мкм; 146,5 мкм. Отрицательные значения радиусов не имеют физического смысла, поэтому в качестве решения принимаем значение радиуса $R_p = 146,5$ мкм и, соответственно $d = 293$ мкм.

Частицы размером $\sim 200 \div 300$ мкм оказываются соизмеримы с размерами генерируемых пузырьков, и оба механизма разрушения становятся малоэффективными. Полученный результат позволяет рекомендовать для ультразвуковой кавитационной обработки взвеси скорлупы ореха кедрового с размерами частиц меньше нижней границы моды, т.е. не более 200 мкм.

Для оценки энергетической эффективности ультразвукового кавитационного измельчения определена полезная работа, затрачиваемая на измельчение материала исходных частиц до размера, обеспечивающего кинетическую устойчивость взвеси:

$$A_{\text{пол}} = \Delta S \cdot a, \quad (6)$$

где ΔS – изменение поверхности частиц, связанное с уменьшением их размера, м²; a – удельная работа, затрачиваемая на образование 1 м² поверхности, Дж/м².

Изменение поверхности частиц ΔS определялось по убыли массы исходной фракции, среднему размеру частиц в исходной смеси и диаметру частиц, обеспечивающих устойчивую взвесь (1,5 мкм). Энергия, затрачи-

ваемая на более тонкое измельчение, считалась непроизводительной и относилась к потерям. Величина удельной работы принималась равной максимальному среднему значению который составил 2606 Дж/м².

Если принять диаметр частиц равный $d_{\infty} = 1,5$ мкм как предел измельчения, то увеличение поверхности ΔS можно представить состоящим из двух составляющих: поверхности образовавшихся частиц размерами 1,5 мкм ΔS_1 и изменения поверхности более крупных частиц ΔS_2 :

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 \quad (7)$$

Поверхность частиц диаметром d_{∞} может быть рассчитана по уравнению:

$$\Delta S_1 = \frac{6m}{d_{\infty}\rho_q}, \quad (8)$$

где ρ_q – плотность измельчаемого материала, кг/м³.

Массу мелких частиц m можно определить как разность массы крупных частиц до измельчения и после измельчения m_2 .

Допуская, что крупные частицы так же имеют сферическую форму, изменение их поверхности может быть рассчитано по уравнению:

$$\Delta S_2 = \frac{6}{\rho_q} \left(\frac{m_2}{d_{CP2}} - \frac{m_1}{d_{CP1}} \right), \quad (9)$$

где d_{CP1} и d_{CP2} – средние диаметры крупных частиц до и после кавитационного измельчения, соответственно, м.

Средний энергетический КПД рассчитывался как отношение полезной работы измельчения к энергии, затраченной на обработку среды ультразвуком, т.е. к энергии, потребленной из сети электроснабжения:

$$\eta = A_{\text{пол}} / E. \quad (10)$$

С учетом ур. (6-9) величину η можно выразить следующим уравнением:

$$\eta = \frac{6a}{\rho_q} \left(\frac{m_1 - m_2}{d_q} + \frac{m_2}{d_{CP2}} - \frac{m_1}{d_{CP1}} \right) / E. \quad (11)$$

На рис. 9 показана зависимость полезной работы и КПД от продолжительности ультразвуковой обработки.

Видно, что, длительное воздействие кавитации приводит к резкому снижению КПД.

Снижение эффективности процесса измельчения можно объяснить тем, что в процессе длительной обработки накапливаются частицы с размерами меньше 1,5 мкм, а, по определению, энергия на их образование относится к потерям. Другой причиной снижения КПД является изменение формы, которая в процессе длительной обработки становится более округлой, и приобретает устойчивость к кавитационному воздействию. В этой связи длительное воздействие ультразвука на взвесь с целью диспергирования взвешенной фазы нецелесообразно.

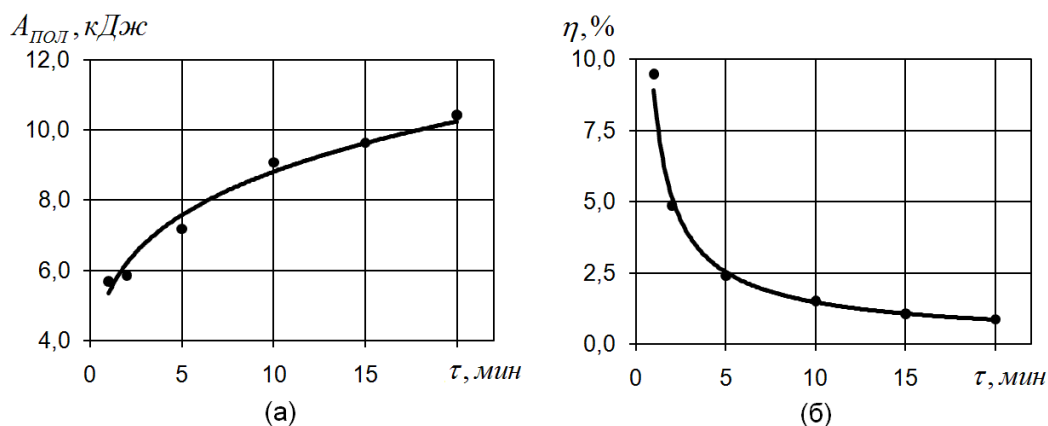


Рис. 9. Зависимость полезной работы (а) и энергетического КПД (б) от продолжительности ультразвуковой обработки материала

Для осуществления процесса диспергирования в условиях акустической кавитации разработан диспергатор, который предусматривает возможность регулирования расхода обрабатываемой среды и времени воздействия облучения. Он состоит из источника излучения 1, корпуса 2, опоры 3, лабиринта 4, крышки 5, штуцеров подвода и отвода обрабатываемой среды 6 и 7 (рис. 10).

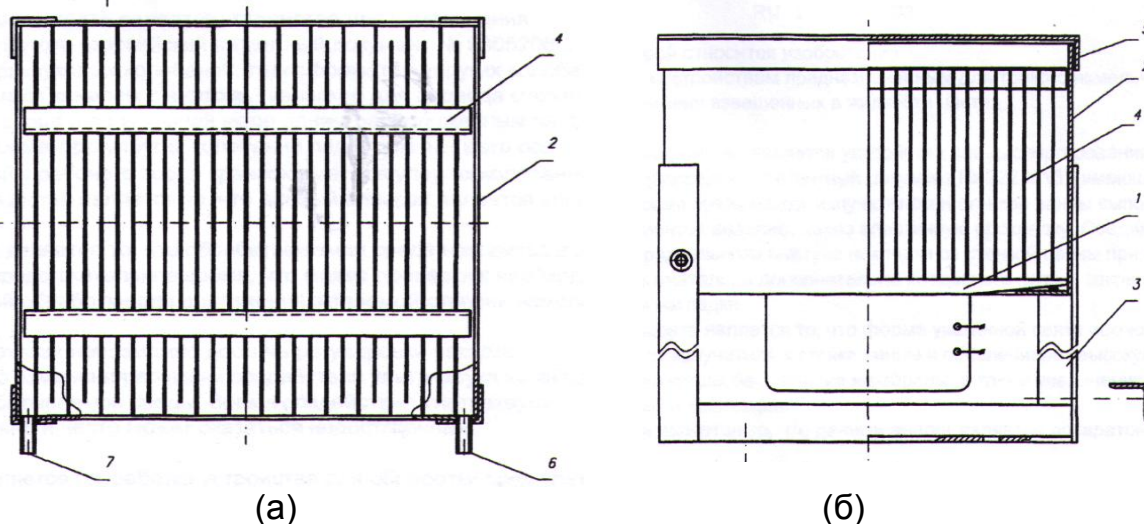


Рис. 10. Диспергатор ультразвуковой лабиринтный:
а - вид сбоку; б - вид сверху

Обрабатываемый продукт, поступает через входной штуцер, начинает движение по каналам, образованным стенками лабиринта и излучающей поверхностью, подвергаясь при этом ультразвуковому облучению на протяжении всего времени нахождения в лабиринте. Опирируя с помощью запорной арматуры высотой слоя продукта и скоростью ее движения, осуществляется регулировка интенсивности обработки при заданном значении расхода. На конструкцию диспергатора получен патент РФ.

При поиске условий работы диспергатора в резонансном режиме нами использован критерий эрозионной активности χ :

$$\chi = \frac{R_{MAX}^3}{R_{MIN}^3 \Delta \tau f}, \quad (12)$$

где R_{MAX} , R_{MIN} – максимальный радиус кавитационного пузырька в фазе роста и минимальный – при схлопывании, соответственно, м; $\Delta\tau$ – продолжительность фазы схлопывания пузырька, с; f – частота ультразвука, Гц.

Величина R_{MAX} определялась путем моделирования фазы роста пузырька с помощью уравнения 13:

$$\left[R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 \right] \rho_{ж} + 4 \frac{\mu}{R} \frac{dR}{d\tau} - \left[\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R} \right)^3 + P_{II} - \frac{2\sigma}{R_0} \right] - P_A \sin 2\pi f \tau + P_0 = 0 \quad (13)$$

Радиус зародыша пузырька R_0 , который служил также начальным условием при решении уравнения 13, определялся по уравнению:

$$R_0 = \frac{4}{3} \frac{\sigma}{0,7 P_A + P_{II} - P_0}, \quad (14)$$

где P_0 и P_{II} – внешнее давление и давление паров воды, Па; μ – коэффициент динамической вязкости, Па·с; σ – поверхностное натяжение, Н/м.

Максимальное акустическое давление рассчитывалось по уравнению:

$$P_A = 2\pi f \rho c A, \quad (15)$$

где c – скорость звука в воде ($c = 1485$ м/с); A – амплитуда зв. волны, м.

Фаза схлопывания кавитационного пузырька моделировалась с помощью уравнения 16:

$$\left[R \frac{d^2 R}{d\tau^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR}{d\tau} \right)^2 \right] \rho_{ж} + 4 \frac{\mu}{R} \frac{dR}{d\tau} - \left[\left(P_0 - P_{II} + \frac{2\sigma}{R_0} \right) \left(\frac{R_0}{R_{MAX}} \right)^3 + P_{II} \left(\frac{R_{MAX}}{R} \right)^{3\gamma} + \frac{2\sigma}{R} - P_A \sin 2\pi f \tau + P_0 = 0, \quad (16)$$

Начальными условиями для уравнения 16 были:

$$\tau = \tau_{MAX}; R = R_{MAX}; dR/d\tau = 0.$$

Решение осуществлялось в математическом пакете MathCAD методом Рунге-Кутты 4-го порядка с автоматическим изменением шага интегрирования.

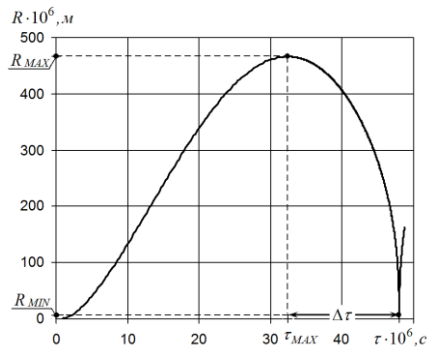


Рис. 11. Изменение радиуса кавитационного пузырька во времени

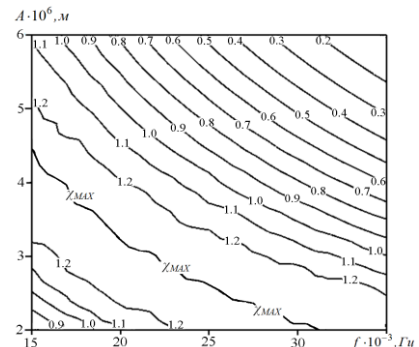


Рис. 12. Уровни критерия $\chi \cdot 10^{-6}$ при различных частотах и амплитудах колебаний

На рис. 11 представлен график изменения радиуса кавитационного пузырька во времени при $f = 22 \cdot 10^3$ Гц и $A = 4 \cdot 10^{-6}$ м ($R_{MAX} = 456,8$ мкм, $R_{MIN} = 6,3$ мкм, $\Delta\tau = 15,1$ мкс). Значение критерия эрозийной активности, рассчитанное по ур. (12): $\chi = 1,159 \cdot 10^{-6}$.

Аналогичные расчеты были выполнены для других частот и амплитуд колебаний. При этом были получены различные уровни критерия χ (рис. 12). Полученные данные позволили определить соотношение между амплитудой и частотой колебаний, при котором критерий эрозийной активности достигает максимального значения.

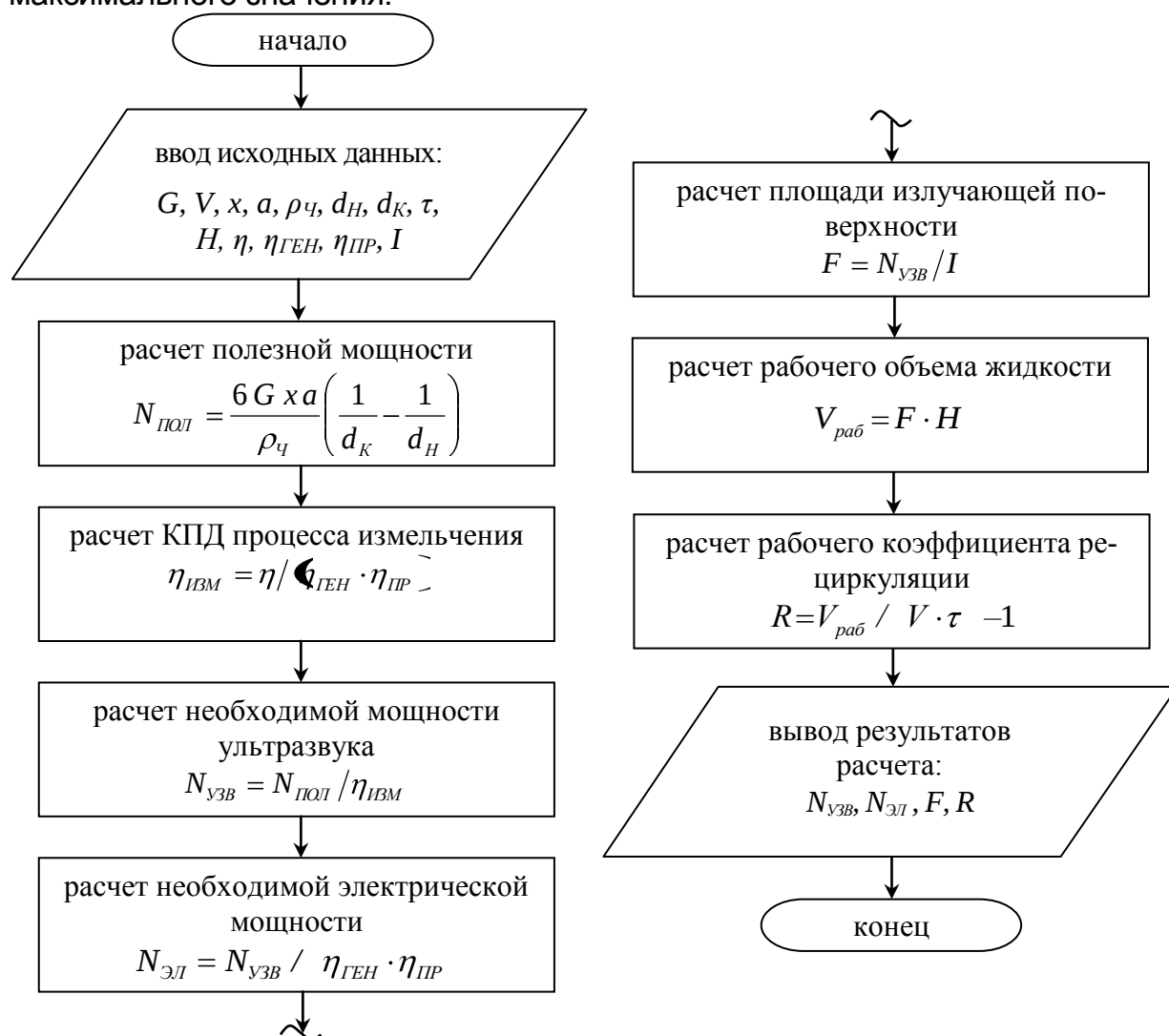


Рис. 13. Блок-схема проектного расчета ультразвукового кавитационного диспергатора

На рис. 13 представлена блок-схема проектного расчета ультразвукового кавитационного диспергатора. Исходные данные к расчету представлены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные для расчета ультразвукового диспергатора

Наименование параметра	Значение	Наименование параметра	Значение
Конечный средний размер частиц d_K , мкм	1,5	Интенсивность ультразвука I , кВт/м ²	125
Массовый расход суспензии G , кг/с	$2,36 \cdot 10^{-3}$	Высота слоя жидкости в диспергаторе H , м	0,03

Объемный расход суспензии V , м ³ /с	$2,32 \cdot 10^{-6}$	Продолжительность обработки τ , с	60
Содержание твердых частиц в суспензии x , % масс.	10	КПД диспергатора η	0,1
Плотность твердых частиц $\rho_{\text{ч}}$, кг/м ³	1267	КПД генератора ультразвука $\eta_{\text{ГЕН}}$	0,5
Удельная работа измельчения a , Дж/м ²	2606	КПД преобразователя ультразвука $\eta_{\text{ПР}}$	0,5

Результаты расчета излучающей поверхности и затрачиваемой мощности на производительность по продукту (кедровому молоку) $V = 200$ л/сут представлены в таблице 2.

Таблица 2

Параметры ультразвукового диспергатора при измельчении скорлупы ореха кедрового до размера частиц $d_{\infty} = 1,5$ мкм

Размер частиц исходного материала d_H , мкм	10	20	40	60	100
Мощность ультразвука $N_{\text{УЗВ}}$, кВт	4,4	4,7	4,9	5,0	5,1
Затрачиваемая мощность $N_{\text{эл}}$, кВт	17,4	18,9	19,7	20,0	20,1
Излучающая поверхность F , м ²	0,035	0,038	0,039	0,04	0,04
Коэффициент рециркуляции R	6,5	7,2	7,5	7,6	7,7

Видно, что при увеличении размера частиц исходного материала с 10 мкм до 100 мкм величина излучающей поверхности возрастает с 700 см² до 810 см², а затрачиваемая мощность – с 17,4 кВт до 20,1 кВт.

В главе 4 рассмотрена принципиальная схема получения молока кедрового с использованием кавитационного измельчения и предложено ее аппаратное оформление.

Основными стадиями получения продукта являются:

- **Дробление** исходного материала до частиц размером 1,0 – 1,5 мм. Эту стадию можно осуществлять с помощью стандартных, изготавливаемых пищевой промышленностью, измельчителей. Например, мельницы серии УИМ-2 – это аппараты для измельчения широкого ассортимента продуктов и материалов с различными свойствами: прочность, хрупкость, вязкость, жирность, волокнистость. Фракции измельчения составляют, в среднем, от 20 до 8000 мкм (0,02 ÷ 8 мм), в зависимости от характера продукта.
- **Помол** целесообразно осуществлять в водной среде, которая обеспечивает транспортировку смеси. Для осуществления данной стадии могут быть использованы серийно выпускаемые промышленностью измельчители.

- **Ультразвуковая обработка** взвеси служит для дальнейшего измельчения частиц материала в условиях акустической кавитации и получения кинетически устойчивой системы.
- **Сепарация** взвеси служит для отделения частиц размером более 1,5 мкм и возврата их на повторное измельчение.
- **Стерилизация и упаковка** необходимы для транспортировки готового продукта, соблюдения санитарных норм и обеспечения продолжительного срока хранения продукта.

С учетом этих стадий схема непрерывного процесса производства кедрового молока с измельчением твердой фазы в присутствии воды представлена на рис. 14.

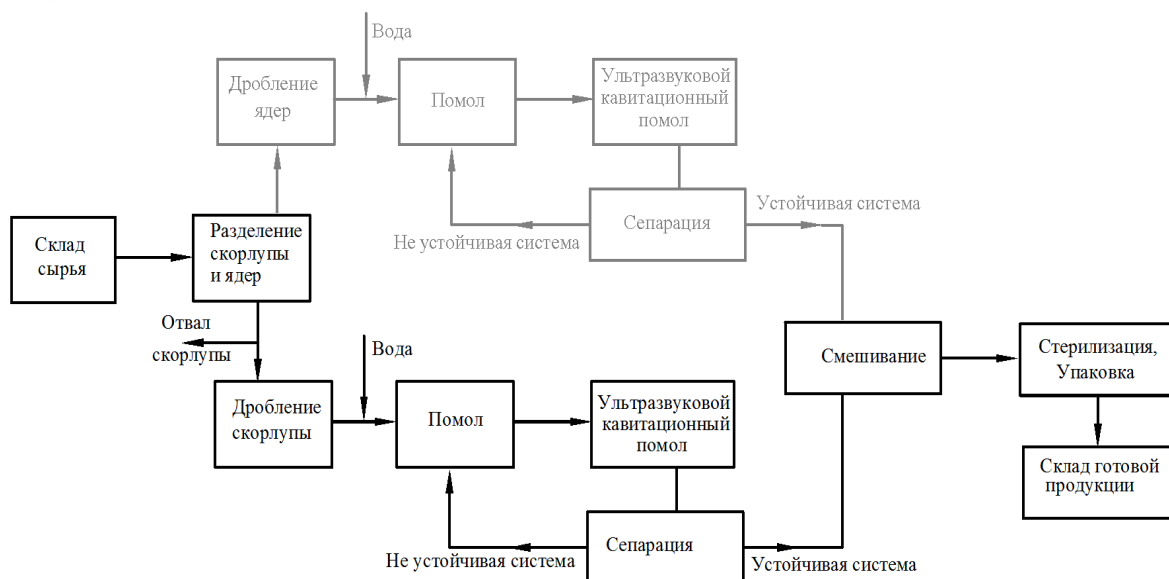


Рис. 14. Схема получения молока кедрового с дроблением и помолом в присутствии воды

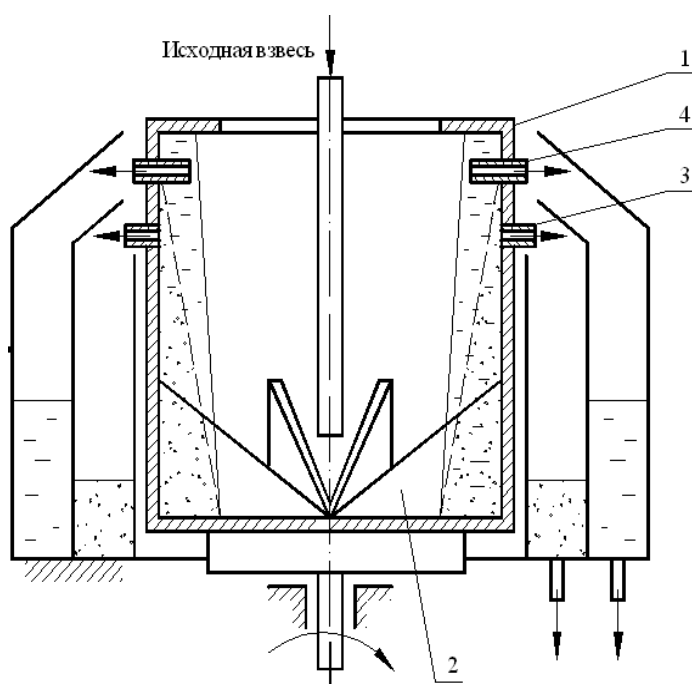


Рис. 16. Схема центрифуги с регулируемым отбором продуктов разделения

Наиболее сложной и энергоемкой стадией является измельчение твердых частиц и получение кинетически устойчивой системы. Эта стадия осуществляется в разработанном нами ультразвуковом лабиринтном диспергаторе (рис. 10). Измельчение частиц до размеров меньше заданных связано с потерями энергии. Поэтому частицы, размер которых превышает 1,5 мкм, отделяются на стадии сепарации в предложенной нами центрифуге (рис. 16) и возвращаются на стадию помола.

Принцип действия центрифуги следующий. Водная взвесь из гомогенизатора подается к центру днища рабочего барабана 1 и попадает на ребра 2, посредством которых вовлекается во вращательное движение и прижимается центробежными силами к обечайке барабана. Далее она движется к верхней части барабана вдоль образующих цилиндра. При этом происходит разделение взвешенных частиц. В верхней части барабана расположены штуцеры отбора тяжелых 3 и легких 4 фракций. Регулируя высоту штуцеров и их проходное сечение устанавливают требуемый расход и дисперсность отбираемых фракций. Конструкция центрифуги с регулируемым отбором продуктов разделения защищена патентом РФ на изобретение.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Получение молока кедрового необходимо проводить отдельным измельчением скорлупы и ядра методом ультразвукового кавитационного диспергирования этих материалов в водной среде, что обеспечивает необходимое качество продукта. При этом в состав продукта необходимо включать $\frac{1}{4}$ часть скорлупы.
2. Ультразвуковое измельчение скорлупы ореха кедрового обеспечивает получение кинетически устойчивой водной системы. Диаметр этих частиц, рассчитанный путем сопоставления скорости осаждения частиц под действием сил тяжести и среднеквадратичного перемещения их под воздействием броуновского движения, не должен превышать 1,5 мкм.
3. Структура измельчаемого материала (тканей ореха кедрового) изотропна, и ориентирование измельчаемого тела в пространстве относительно разрушающего фактора не влияет на эффективность процесса измельчения.
4. Механическая прочность скорлупы ореха кедрового позволяет установить значение удельной работы ее измельчения, которая составляет 2425 ± 181 Дж/м² для сухого материала, и 1369 ± 169 Дж/м² для вымоченного.
5. Максимальное среднее значение удельной работы, равное 2606 Дж/м² обеспечивает оценку энергетического КПД и расчет основных параметров ультразвукового диспергатора в наиболее жестких условиях работы.
6. Способ и устройство для определения гранулометрического состава дисперсных систем (Патенты RU 2386949 C1 МПК G01N 15/02, RU 2416078 C2 МПК G01N 1/18) основанные на ротационной сепарации, обеспечивают исследование распределения частиц по размерам, с помощью которого установлено, что в процессе ультразвуковой кавитационной обработки скорлупы ореха кедрового наблюдается бимодальное распределение этого материала по размерам.
7. Акустической кавитации необходимо подвергать взвесь скорлупы ореха кедрового с размерами частиц не более 200 мкм, в связи с образованием из частиц более крупного размера устойчивых к кавитации фракций.
8. Длительное воздействие кавитации на диспергируемые частицы (более 2 минут) нецелесообразно, т.к. приводит к существенному снижению энергетического КПД, вследствие накопления частиц диспергированных мельче заданного размера и стремления поверхности грубых частиц к сферической форме, которая устойчива к кавитационному воздействию.
9. Предложенная конструкция ультразвукового лабиринтного диспергатора (Патент RU 2325231 C2 МПК B02C 19/18), обеспечивает регулирование расхода обрабатываемой среды и времени воздействия ультразвука. Соот-

ношение между амплитудой и частотой акустических колебаний, при котором диспергатор находится в резонансном режиме с обрабатываемой средой, должно составлять $6,538 \cdot 10^{-2}$ Гц·м, в этом случае эффективность кавитационного измельчения достигает своего максимального значения. Алгоритм расчета диспергатора обеспечивает получение основных параметров, необходимых при его проектировании.

10. Предложенная схема промышленного производства кедрового молока обеспечивает непрерывное производство продукта с гарантированной кинетической устойчивостью дисперсной фазы, за счет предусмотренных широких диапазонов регулирования режимов работы разработанных аппаратов осуществляющих основные стадии производства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНО В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Свиридов, Д.П.** Оценка энергетической эффективности процесса кавитационного измельчения / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, Д.Н. Сучков, Б.А. Ульянов // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. – 2009. – Т. 52. – № 3. – С. 103-105.
2. **Свиридов, Д.П.** Использование кавитационного измельчения в производстве молока кедрового / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, Б.А. Ульянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 1(29). – С. 199- 211.
3. **Свиридов, Д.П.** Закономерности и энергетическая эффективность кавитационного измельчения / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, Б.А. Ульянов // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2011. – № 1(29). – С. 76-81.

Патенты:

4. Патент RU 2325231 С2 МПК В02С 19/18 Гомогенизатор ультразвуковой лабиринтный / **Свиридов Д.П.**, Ульянов Б.А., Сучков Д.Н., Кущин А.А. – 2008. – Бюл. № 11.
5. Патент RU 2322306 С2, МПК В04В 11/00 Центрифуга с регулируемым отбором продуктов разделения / **Свиридов Д.П.**, Ульянов Б.А., Сучков Д.Н., Кущин А.А. – 2008. – Бюл. № 11.
6. Патент RU 2386949 С1 МПК G01N 15/02 Способ исследования гранулометрического состава взвесей / **Свиридов Д.П.**, Семенов И.А., Бадеников А.В., Ульянов Б.А. – 2010. – Бюл. № 11.
7. Патент RU 2416078 С2 МПК G01N 1/18 Устройство для исследования гранулометрического состава взвесей универсальное / **Свиридов Д.П.**, Семенов И.А., Бадеников А.В., Ульянов Б.А. – 2011. – Бюл. № 10.

Статьи в сборниках трудов, другие публикации:

8. **Свиридов, Д.П.** Размер твердых частиц в устойчивой водной взвеси / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, Д.Н. Сучков, Б.А. Ульянов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-22: сб. трудов XXII междунар. науч. Конф.: в 10 т. / Под общей редакцией В.С. Балакирева. – Псков: изд-во Псков. гос. политехн. ин-та. – 2009. – Т. 9. – С. 156-158.
9. **Свиридов, Д.П.** Десорбция растворенных газов в условиях кавитации / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, А.А. Быстрицкий, Б.А. Ульянов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-21: сб. трудов XXI ме-

- ждунар. науч. Конф.: в 10 т. / Под общей редакцией В.С. Балакирева. – Саратов: Саратов. гос. политехн. ун-та. – 2008. – Т. 5. – С. 167-170.
10. **Свиридов, Д.П.** Глубокая переработка кедрового ореха с получение кедрового молока // Д.П. Свиридов, Д.Н. Сучков, И.А. Семенов, Б.А. Ульянов // Актуальные вопросы защиты окружающей среды и безопасность территорий регионов России: Материалы V Всероссийской конференции. – Улан-Уде: Издательство ВСГТУ.– 2008. – С. 53-55.
 11. **Свиридов, Д.П.** Определение гранулометрического распределения частиц во взвесах / Д.П. Свиридов, И.А. Семенов, Б.А. Ульянов, Д.Н. Сучков // Сборник научных трудов: Химия химические технологии. Техническая кибернетика. – Ангарск: АГТА. – 2008. – С. 97-101.
 12. **Свиридов, Д.П.** Кавитация в плоском сопле с препятствием и без него и ее воздействие на микроорганизмы / Д.П. Свиридов, Б.А. Ульянов, Б.И. Щелкунов, А.А. Быстрицкий // Сборник научных трудов. Химическая технология. Техническая кибернетика. – Ангарск: АГТА. – 2005. – С. 54-57.
 13. **Свиридов, Д.П.** Кавитация в плоском сопле с препятствием и без него / Д.П.Свиридов, Б.А. Ульянов // Тезисы докладов научно технической конференции. – Ангарск: АГТА. – 2004. – С. 12-14.
 14. **Свиридов, Д.П.** Влияние состава кедрового молока на производительность кавитационного диспергатора / Д.П. Свиридов, Д.Н. Сучков, Б.А. Ульянов // Современные технологии и научно-технический прогресс. Тезисы докладов. Техническая кибернетика и физико-математические науки. Химия и химическая технология. – Ангарск: АГТА. – 2007. – С. 41-43.
 15. **Свиридов, Д.П.** Получение устойчивых дисперсных взвесей при помощи кавитации / Д.П. Свиридов, Д.Н. Сучков, Б.А. Ульянов, Д.Н. Ситников // Современные технологии и научно-технический прогресс. Тезисы докладов. Техническая кибернетика и физико-математические науки. Химия и химическая технология. – Ангарск: АГТА. – 2008. –С. 24-28.