

*Керимов Мухтар Ахмиевич*¹,
профессор, д-р техн. наук, профессор;
*Керимов Мовсар Мухтарович*²,
студент

СИСТЕМНЫЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ ИЗМЕЛЬЧИТЕЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

¹ Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный аграрный университет, martan-rs@yandex.ru;

² Россия, Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), brutus95brutus@gmail.com

Аннотация. Измельчение минерально-органического сырья представляет собой сложный технологический процесс. при его реализации происходит увеличение биологической активности измельчаемых продуктов за счет интенсификации извлечения полезных веществ. В порошкообразных материалах протекают биохимические явления на атомарном и молекулярном уровнях, обеспечивающие синергетический технологический эффект измельчения. Мелкодисперсные измельчительные технологии формируют структуру конечного продукта, обеспечивающего его усвояемость организмом. После проведения широкомасштабных исследований порошки могут использоваться для целевой доставки лекарств в определенные зоны живых организмов. Точная дозировка и смешивание частиц на атомно-молекулярном уровне позволяет диагностировать и уничтожать больные клетки, оставляя здоровые клетки нетронутыми. Рассмотрена динамика функционирования измельчителя дезинтеграторного типа, содержащего цилиндрический корпус, внутри которого расположены два вращающихся в противоположных направлениях ротора в виде дисков с ударными элементами. Представлена методика проведения поисковых экспериментов, позволяющая изучать преобразования в глубоких слоях веществ и микроэлементов. Предложенные схемотехнические решения обеспечивают возможность управления качеством функционирования измельчительных технологий с учетом физико-механических, биологических и химических свойств исходного сырья.

Ключевые слова: конвергентная технология, измельчение, минерально-органическое сырье, эффективность функционирования, дезинтегратор.

*Mukhtar A. Kerimov*¹,
Professor, Dr. of Technical Sciences, Professor;
*Movsar M. Kerimov*²,
Student

SYSTEMIC EFFECTS IN THE OPERATION OF SHREDDING TECHNOLOGIES

¹ St. Petersburg State Agrarian University, St. Petersburg, Russia, martan-rs@yandex.ru; ² St. Petersburg State Electrotechnical University “LETI”, St. Petersburg, Russia, brutus95brutus@gmail.com

Abstract. Grinding of mineral-organic raw materials is a complicated technological process that intensifies the biological activity of crushed products by means of intensifying the extraction of useful substances. Biochemical phenomena occur in powders at atomic

and molecular levels, providing a synergetic technological effect of comminution. Fine grinding technology forms the structure of the final product to ensure its digestibility in the body. Following extensive research, powders can be used for targeted drug delivery to specific areas of living organisms. The precise dosage and mixing of particles on the atomic-molecular level allows diseased cells to be diagnosed and eliminated, leaving healthy cells untouched. The dynamics of a disintegrator-type disintegrator containing a cylindrical body with two rotating disc-shaped rotors with percussion elements rotating in opposite directions inside is considered. A methodology for search experiments is presented, which allows studying transformations in the deep layers of substances and microelements. The proposed schematic-technical solutions provide the possibility of controlling the quality of the grinding technology functioning, taking into account physical-mechanical, biological and chemical properties of the feedstock.

Keywords: convergent technology, grinding, mineral-organic raw material, efficiency of functioning, disintegrator.

Введение

При измельчении до наноразмеров характеристики частиц минерально-органического сырья существенно меняются, приобретая уникальные свойства [3–5]. Предпочтительным при помоле минерально-органического сырья является механический способ измельчения с учетом его относительной экологичности, низкочувствительности и возможности технической реализации.

Анализ научно-технических разработок, а также проведенные поисковые исследования доказывают, что наиболее эффективной измельчительной технологией является микроизмельчение в высокоскоростных мельницах-установках дезинтеграторного типа. При этом скорость удара рабочих органов о компоненты измельчаемого материала составляет от 400 до 600 м/с, а в некоторых образцах приближается к значениям 800...1000 м/с.

Постановка задачи математического моделирования течения двухфазной среды в вихревых аппаратах, к числу которых относятся рассматриваемые конструкции измельчителей, и ее технологическая реализация имеют большое прикладное значение. Однако концептуально-теоретические аспекты эффективного функционирования измельчительных технологий, обеспечивающие получение субстрата с заданными целевыми показателями конечного продукта, в настоящее время не полностью решены, поэтому тема исследования является актуальной.

Цель исследования — обосновать методологические подходы к оптимизации процесса измельчения минерально-органического сырья на основе квантово-механической концепции и выработать рекомендации по конструктивно-технологическому совершенствованию установок дезинтеграторного типа.

1. Объект и методика исследования

Технической проблемой известных конструкций является низкая эффективность процесса измельчителя и недостаточная производительность по готовому продукту.

Разработанный технологический процесс измельчения минерально-органического сырья отличается увеличенной до 800 м/с скоростью удара рабочих элементов о частицы перерабатываемого материала. При измельчении материалов с различными физико-механическими свойствами на основе оперативного контроля качества конечного продукта осуществляется управление технологическим процессом с целью оптимизации режимов работы измельчителя-дезинтегратора. Модель функционирования измельчителя представлена на рисунке 1 [6].

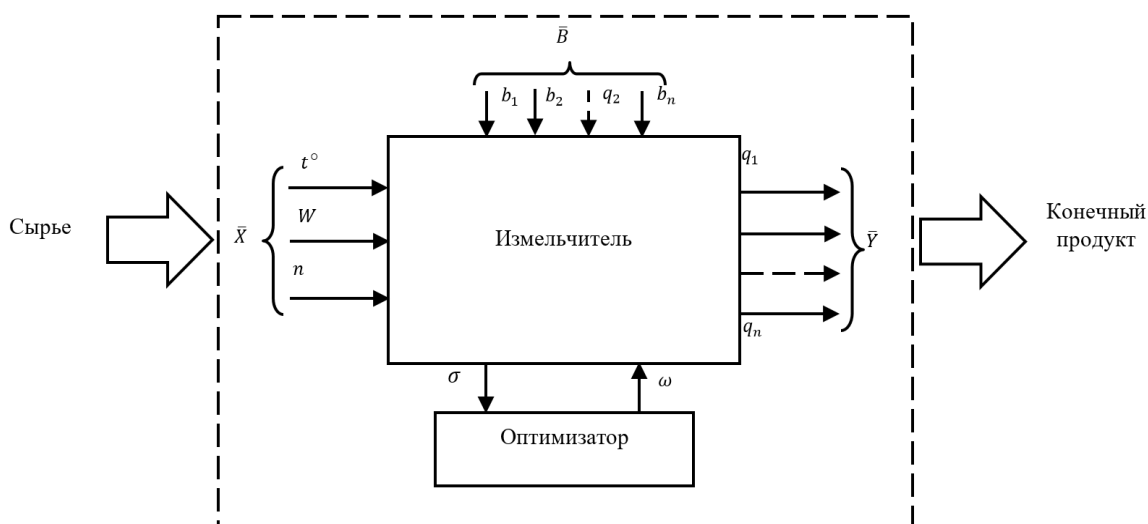


Рис. 1. Модель функционирования измельчителя дезинтеграторного типа:
 \bar{X} — вектор-функция входных параметров; \bar{B} — вектор-функция неуправляемых параметров; \bar{Y} — вектор-функция выходных параметров

Составляющими вектор-функции \bar{X} являются: t — температура сырья (°C); W — влажность сырья, %; n — частота вращения барабана, мин-1; G — гранулометрический состав исходного материала.

Вектор-функция \bar{B} характеризует условия функционирования технологического процесса, а ее составляющими являются температура окружающей среды, влажность наружного воздуха и другие неуправляемые параметры.

Априорной моделью измельчителя дезинтеграторного типа как объекта контроля служит вектор-функция \bar{Y} , компонентами которой являются показатели качества конечного продукта: дисперсность, температура, уровень гомогенизации и др.

Оптимизатор анализирует эффективность функционирования измельчителя по степени дисперсности материала σ и подает управляющий сигнал на систему в виде ω для изменения скорости вращения барабана при выходе значений σ за пределы установленного технологического допуска [1].

Критерий эффективности в общем случае представляет собой оценку качества выполнения системой своих функций.

Измельчение представляет собой сложный процесс, и его кинетика определяется одновременным сочетанием многих факторов.

Для динамики разрушения вещества справедливы фундаментальные положения квантовой механики о природе материи и взаимодействии элементарных частиц. В связи с этим относя структуру ультрадисперсных частиц близкой к молекулярной структуре вещества можно с полной уверенностью применить квантово-механические подходы.

При диспергировании минерально-органических веществ происходит разрушение межмолекулярных связей в структуре частиц, которые определяют прочностные свойства вещества.

Задачей математического описания процесса является установление параметрической взаимосвязи между дисперсностью измельчаемого материала, которому присущи определенные физико-химические свойства, и энергозатратами аппарата с заданными конструктивными и режимными параметрами.

Теоретическая прочность межатомных и межмолекулярных связей в структуре материальных тел определяется по формуле [7–9]:

$$\sigma = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{A_k \cdot E}{\pi l}}, \quad (1)$$

где A_k — свободная поверхностная энергия вещества, Дж · м⁻²; E — модуль упругости (Юнга), Н · м⁻²; l — размеры микротрещины при разрушении, м.

Значит, чтобы разрушить материал, необходимо приложить внешнее воздействие, эквивалентное структурной прочности связей в веществе.

Для обеспечения экстремальных условий течения процесса разрушения необходимо, чтобы измельчающий аппарат настраивался на условие и режимы работы, обеспечивающие разрушение с минимальными энергозатратами. При этом скорость контактных эффектов между рабочими органами и объемом разрушения должна быть соизмерима с 1/3 скорости распространения упругих деформаций в веществе [10].

Эффект разрушения повышается при совпадении дебаевской частоты колебаний кристаллической структуры кластерного блока со скоростью релаксации напряжений.

Известно, что скорость удара $v_{уд}$, при котором происходит разрушение материала, эквивалентна $1/3$ скорости распространения упругих деформаций (a) в кристаллической решетке блока. Тогда оптимальная скорость удара рабочего органа на единичную дисперсную частицу будет равна [11]:

$$v_{уд} = \frac{K_m \cdot \rho^* \cdot T \cdot l \cdot i}{0,42 N_r \cdot \frac{t}{T}}, \quad (2)$$

где K_m — молярная концентрация вещества; ρ^* — удельная плотность дислокаций на единицу поверхности; T — абсолютная температура среды; J — удельная поверхность вещества; l — средний размер микрочастицы; i — степень измельчения; t — длительность процесса; N_r — теоретически потребная энергия для разрушения частицы по Гриффитсу, действительная работа разрушения вещества.

Для определения производительности мельниц ударного действия в качестве базовой принята гипотеза Бонда, которая учитывает степень измельчения материалов в зависимости от прироста вновь образованной поверхности в виде энергетического коэффициента K [12].

2. Результаты исследования

По разработанной технологии произведена кормовая добавка «Кедрокорм», представляющая собой комплекс дополнительного питания из скорлупы ореха кедра. «Кедрокорм» — это мелкодисперсный субстрат для сельскохозяйственных животных и птицы (табл. 1).

Рекомендации по ее использованию в составе комбикормов разработаны учеными Санкт-Петербургского государственного аграрного университета [1].

Проведенными лабораторными исследованиями установлено, что основной состав кормовой добавки сформирован содержанием углеводов (54 % — пищевые волокна) и белков, а по части макроэлементов обеспечивается наличием калия и фосфора. Показатели энергетической ценности продукта «Кедрокорм» представлены в таблице 2 [1].

Таблица 1

Результаты применения кормовой добавки Кедрокорм

Объект	Период использования \ доза	Промежуточный результат	Контрольный результат
Телята	От 10 дней \ 100 мг на 1 кг живой массы в день	Восстановление функций желудочно-кишечного тракта; Уменьшение сроков выздоровления больных телят на 2–3 дня	Активация подвижности, улучшение роста и развития; эффективность добавки при желудочно-кишечных болезнях новорожденных телят с симптомокомплексом диареи составила 90,0 %, против 60,0 – 80,0 % в сравнении с известными средствами (пектосорбин, антидиарин), также растительного происхождения
Цыплята	От 10 дней \ 100 мг на 1 кг живой массы в день	Профилактика желудочно-кишечных болезней	Нормализация обменных процессов, ускорение их роста и развития до 7 % по сравнению с контрольной группой
Коровы	От 10 дней \ 100 мг на 1 кг живой массы в день		Повышение суточного надоя молока до 1,5 литров и жирность, а также улучшала его вкусовые качества
Куры	От 10 дней \ 200 мг на 1 кг живой массы в день		Положительное влияние на саму птицу; возрастание массы яйца на 8,0 %, толщины скорлупы на 7,9 %

Таблица 2

Пищевая и энергетическая ценность продукта Кедрокорм (100 г)

Калорийность, ккал	225
Белки, г	20,3
Жиры, г	2,1
Углеводы, г	68,4, в т.ч. гемицеллюлоз (пищевых волокон) – 37,2
Микро- и макро-элементы:	
Калий	670.0 мг
Фосфор	300.0 мг
Марганец	2700.0 мкг
Медь	900.0 мкг
Цинк	6800.0 мкг
Натрий	10.0 мг
Железо	4.29 мг

Наиболее ценным продуктом, получаемым при измельчении яичной скорлупы, является кормовая мука, предназначенная для кур-несушек. Она хорошо усваивается птицей и, являясь минеральным кормом, повышает не только продуктивность несушек, но также и качество яиц.

Добавление измельченной скорлупы куриных яиц в пищу различным категориям населения свидетельствует о ее высокой терапевтической активности. Скорлупотерапия как профилактическая мера рекомендуется к использованию в очагах радиационного заражения, т. к. такой порошок служит средством, способствующим выведению из организма радионуклидов [12, 13]. Результаты испытаний разработанного технологического процесса измельчения скорлупы куриных яиц представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты испытаний технологического процесса измельчения скорлупы куриных яиц

Наименование показателей	Нормативные документы на методики (методы) испытаний	Значения, допустимые по нормативным документам	Фактические значения
Массовая доля металломагнитной примеси (частиц не более 0,3 мм в наибольшем линейном измерении), %	ГОСТ 15113.2-77	–	Не обнаружено
Органолептические показатели	ГОСТ 5897-90	–	Внешний вид: порошок бело-серого цвета Вкус и запах: собственные скорлупе куриных яиц, без посторонних привкусов и запахов
БГКП (колиформы) (бактерии группы кишечных палочек (колиформных бактерий))	ГОСТ 30518-97/Р 50474-93	В 0,01 г продукта не допускаются	Не обнаружены
Дрожжи, КОЕ/г (колониобразующих единиц/г)	ГОСТ 10444.12-88, ГОСТ 26670-91	Не более 100	Менее 10
КМАФАнМ, КОЕ/г (количество мезофильных аэробных и факультативно-анаэробных микроорганизмов (бактерий, дрожжей и плесневых грибов))	ГОСТ 10444.15-94, ГОСТ 26670-91	Не более 1,0 x 10 ⁴	2,0 x 10 ³
Патогенные, в т. ч. сальмонеллы	ГОСТ 30519-97/Р 50480-93	В 25,0 г продукта не допускается	Не обнаружены
Плесени, КОЕ/г	ГОСТ 10444.12-88, ГОСТ 26670-91	Не более 100	Менее 10

Заключение

Измельчение минерально-органического сырья представляет собой сложный технологический процесс. Его кинетика определяется одновременным сочетанием многих факторов. Крупность измельчаемой массы как статистической совокупности частиц оценивают по содержанию в ней фракций определенных размеров.

1. Установлено, что для описания динамики процесса измельчения компонентов сельскохозяйственного сырья справедливы фундаментальные положения квантовой механики о природе материи и взаимодействии элементарных частиц. В связи с этим, относя структуру ультрадисперсных частиц близкой к молекулярной структуре вещества, следует применить квантово-механические подходы к оптимизации параметров функционирования измельчительных технологий, адаптированных и реализуемых в агробиологических и технических приложениях.

2. Предложенная численная модель движения двухфазной среды в пространстве дезинтегратора позволяет раскрыть сложный характер распределения поля скоростей воздушно-материальной смеси и обеспечить рациональные траектории движения частиц измельчаемого материала в помольной камере.

3. Результаты, полученные при испытаниях технологических процессов измельчения скорлупы куриных яиц, показывают соответствие фактических показателей конечного продукта значениям, допускаемым по нормативным документам. Относительное содержание макроэлементов в порошке (дисперсность 0,01...0,02 мм) составляет, %:

- кальций – 79,56;
- фосфор – 10,44;
- магний – 2,93;
- калий – 0,52;
- кремний – 0,12;
- натрий – 0,03;
- белок – 3,50;
- железо, сера, алюминий – следы;
- вода – 1,50;
- аминокислоты, в т. ч.:
 - метионин – 0,28;
 - цистин – 0,41;
 - лизин – 0,37;
 - изолейцин – 0,32.

4. Обоснованы оптимальные конструктивно-технологические параметры роторно-центробежных мельниц, которые позволяют адаптировать конструкции исследуемых дезинтеграторов к различным стадиям измельчения вторичных сырьевых ресурсов: от мелкого дробления до сверхтонкого помола.

Эффективность разработанных технологических процессов подтверждена при изготовлении кормовой добавки «Кедрокорм» из скорлупы ореха кедра. Практическая ценность исследований заключается в разработке патентнозащищенной конструкции дезинтегратора и оформлении полученных результатов в виде инженерных рекомендаций.

Список литературы

1. Керимов М.А. Измельчительные технологии: от микроразмерных фракций до наночастиц // Известия Санкт-Петербургского государственного аграрного университета. – 2020. – № 1(58). – С.166–171.
2. Мельников С.В. Технологическое оборудование животноводческих ферм и комплексов. – Л.: Агропромиздат, 1985. – 640 с.
3. Куликов А.Г., Благов А.Е., Марченков Н.В., Ломонов В.А., Виноградов А.В., Писаревский Ю.А., Ковальчук М.В. Перестройка структуры кристаллов парателлурита в приповерхностном слое, вызванная миграцией носителей заряда во внешнем электрическом поле // Письма в ЖЭТФ. – 2018. – 107:10. – С. 646–650.
4. Бойко К.М., Попов В.О., Ковальчук М.В. Перспективные подходы к кристаллизации макромолекул, подавляющие конвективный массоперенос к растущему кристаллу // Изв. Обзоры. – 2015. – 84:8. – С. 853–885.
5. Кинта Ясуёси, Хатта Тамао. Состав, структура и цвет жирового поседения вследствие частичного разжижения жира в темном шоколаде // Журнал American Oil Chemistry Society. – 2007. – Том . 84. №2. – С. 107–115.
6. Kerimov M., Belinskaia I., Ognev O. Convergent technologies as conceptual basis for formation of powder industry in agribusiness // Engineering for rural development, Jelgava, 26.–28.05.2021. – URL: <https://www.tf.llu.lv/conference/proceedings2021>.
7. Алымов М.И., Гуляев П.Ю., Семичев С.В. Консолидация порошковых наноматериалов: обзор тенденций развития и применения // Вестник ЮГУ. – 2019. – Выпуск 4 (55). – С. 7–16.
8. Интипунья Б.П., Бхандари Р. Химическая порча и физическая нестабильность продуктов питания и напитков, 2010 г. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781845694951500228> (дата обращения 10.11.2022).
9. Гаяни К., Бургейн Дж., Шер Дж. Поверхностный состав пищевых порошков, 2013 г. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780857095138500145> (дата обращения 10.11.2022).
10. Cuq B., Gaiani C., Turchiuli C., Galet L., Scher J., Jeantet R., Mandato S., Petit J., Murrieta-Pazos I., Barkouti A., Schuck P., Rondet E., Delalonde M., Dumoulin E., Delaplace G., Ruiz T. Chapter Two – Advances in Food Powder Agglomeration Engineering // Advances in Food and Nutrition Research. Jeyakumar Henry (ed.). – Academic Press, 2013. – Vol. 69. – Pp. 41–103. – ISSN 1043-4526, ISBN 9780124105409. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780124105409000028> (дата обращения 10.11.2022).
11. Капелли Алессио. Улучшение технологии вальцового помола с использованием систем дробления, калибровки и измельчения для дифференциации муки. – Флорентийский университет, 2020.
12. Бхеш Бхандари, Ирджо Х. Роос (ред.). Пищевое материаловедение и инженерия. Чичестер, Соединенное Королевство: Уайли – Блэквелл, 2012. – DOI: 10.1002/9781118373903.
13. Уолтер Пегги, Комильон Пол. Влияние термического режима и наличия добавок на жировое поседение в шоколаде // Журнал Американского нефтехимического общества. – 2001. – Том. 78. № 9. – С. 927–932.