

КИНЕТИКА И ДИНАМИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

О.В. Ошкордин, Л.Ю. Лаврова, Г.А. Усов

В работе представлены результаты исследования параметров технологии переработки растительного сырья с целью оптимизации процесса его измельчения.

Ключевые слова: растительное сырьё, измельчение, технологические параметры.

Диспергирование твердых тел – их измельчение до частиц малых размеров – осуществляется с целью повышения скорости гетерогенных процессов. В зависимости от природы материала и характера его использования к измельчению предъявляются конкретные требования по дисперсности, чистоте, сохранности и т.д. В большинстве случаев ставится задача получения возможно более тонких порошков при условии ограничения затрат времени и энергии. Всё это приводит к необходимости изучения закономерностей процесса тонкого и сверхтонкого измельчения, свойств полученных порошков, развитие методов их дисперсного анализа. В этой связи целью научных исследований является определение условий и разработка способов наиболее рационального диспергирования и их применения.

Интерес представляет измельчение пищевых волокон, содержащихся в отходах переработки крупяного, зернового, мукомольного, винодельческого производств. Такой выбор объектов исследования обусловлен доступностью и неисчерпаемостью сырьевой базы, полезностью для организма незаменимых компонентов растительного сырья. Применение механоактивированных органо-порошков из растительного сырья в качестве пищевых добавок для обогащения и расширения ассортимента мясных, рыбных, хлебобулочных, макаронных и кондитерских изделий, а также блюд общественного питания предопределяет развитие научных основ процесса тонкого и сверхтонкого измельчения.

В процессе производства муки, крупы проводится их фракционирование, при этом отделяются цветочные пленки, оболочки, формирующие вместе с алейроновым слоем и частью измельченного ядра отруби, мезгу, лузгу, мучку, которые не находят эффективно применения и зачастую выбрасываются, засоряя окружающую среду. Однако такие «побочные» продукты переработки являются источниками ценных и необходимых для че-

ловека биологически активных веществ и в первую очередь пищевых волокон.

Установлено, что пшеничные отруби содержат до 24 % пищевых волокон, оболочки гречихи – 75 %, пленки риса – 78 %, оболочки гороха – 60 %, цветооболочки овса – 65 %, оболочка сои – 50 %, кукурузная мезга – 28 % и т.д.

В качестве источников пищевых волокон предложено использовать оболочки семян гречихи и подсолнечника, цветооболочки овса, пшеничные отруби, которых при переработке образуется до 30 %. Отходы переработки круп и зерна отличаются не только высоким содержанием пищевых волокон, но и содержат органические компоненты, среди которых обнаружены соединения группы флавоноидов (в том числе рутин и кверцетин), липиды, полисахариды, аминокислоты, витамины группы В и др., относящиеся к ценным биологически активным веществам. В составе золы обнаружены такие элементы как калий, натрий, медь, серебро, кальций, магний, цинк, алюминий, марганец, железо, никель, хром, фосфор [1].

Многообразие источников богатых пищевыми волокнами делает перспективным физико-химическую модификацию органических полимеров с использованием механохимического воздействия.

Ключевой проблемой является трудность механического измельчения вторичных продуктов переработки зерна. Это связано с особенностью физико-механических свойств, обусловленных большой зоной пластической деформации при разрушении данного материала и отсутствием промышленных измельчительных аппаратов с высокой динамикой нагружения, не позволяющей последнему релаксировать (восстанавливать) свои прочностные свойства в процессах измельчения.

При интенсивном механохимическом воздействии реализуются большие скорости изменения нагрузки на исходное растительное сырьё. При этом способе нагружения возникают явления, которые в корне отличаются от

КИНЕТИКА И ДИНАМИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

процессов «мягкой» обработки. Структура и текстура материала претерпевают радикальные изменения. Происходит возрастание избыточной свободной энергии системы, разрыв межмолекулярных связей, стабилизирующих надмолекулярную структуру природных органических полимеров, понижение плотности, возрастание площади поверхности, изменение валентных углов и межмолекулярных расстояний полимерных цепей, ослабление кристалличности. Все эти процессы объединяются под названием механохимической дезагрегации [2].

При диспергировании, помимо образования новой поверхности, из-за уменьшения частиц происходит также существенное нарушение вторичной структуры материала. Вслед за измельчением происходит деструкция полимерных цепей. Скорость механической деструкции определяется интенсивностью механических напряжений. Типичное явление при измельчении природных органических полимеров – наличие так называемого предела деструкции, который не может быть превышен, как бы долго ни проводилась обработка. В области предельной деструкции сообщаемая твердому веществу механическая энергия тратится исключительно на межмолекулярные перемещения полимерных цепей [3].

Изменения свойств растительного сырья, вызванные механохимической деструкцией, имеют значение в двух отношениях. Во-первых, как неизбежное явление, сопровождающее механическое воздействие на природные органические полимеры в процессе их обработки и применения. Во-вторых, как желательное изменение свойств полимерных твердых материалов, направленное на получение продуктов со специфическими и (или) заданными характеристиками.

Механическая активация вторичных продуктов переработки зерна и круп является сложным физико-химическим процессом накопления потенциальной энергии вещества и повышения его химической активности за счет увеличения поверхностной энергии и энергии внутреннего строения при механическом измельчении дисперсной среды. Этот процесс определяется изменением энергетического состояния, физического строения и химических свойств под действием механических сил при диспергировании. Введение в определение механоактивации энергетического состояния системы открывает возможность математического выражения и количественной оценки активации: механоактивация численно рав-

на изменению свободной энергии системы под действием механических сил.

В этой связи актуальная задача – повышение интенсификации процесса энергонасыщения органопоорошков из растительного сырья при их механоактивации.

Удельная энергонасыщенность органопоорошков из растительного сырья определяется количеством энергии, аккумулированной объемом измельчаемого материала в процессе его механоактивации, и может быть выражена зависимостью:

$$E_{\text{уд}} = \eta \frac{\varepsilon_p}{V}, \quad (1)$$

где $E_{\text{уд}}$ – удельная энергонасыщенность дисперсной системы; η – коэффициент поглощения энергии дисперсной системой в процессе ее механоактивации ($\eta < 1$); ε_p – затраты энергии на измельчение материала; V – объем измельчаемого материала.

Для оценки эффективности процесса энергонасыщения органопоорошков из растительного сырья авторами предлагается ввести показатель, определяющий скорость аккумуляции энергии измельчаемым материалом при одноактном воздействии на него мелющих тел. Такой показатель может быть представлен в виде следующего выражения:

$$\Phi_{\text{уд}} = \frac{d\varepsilon_p}{V_k dt}, \quad (2)$$

где $\Phi_{\text{уд}}$ – удельный потенциал энергонасыщения дисперсной системы (органопорошка) при ее механоактивации; $d\varepsilon_p$ – приращение энергии, передаваемой мелющими телами дисперсной системе в процессе деформирования объема материала V_k до достижения в нем предельных разрушающих нагрузок за время dt ; V_k – объем деформируемого материала под мелющими телами при одноактном его разрушении.

Значение $\frac{d\varepsilon_p}{dt}$ является скоростью энергонасыщения органопоорошков при их механоактивации.

В период деформации объема материала V_k при одноактном его разрушении

мелющими телами величина $\frac{d\varepsilon_p}{dt}$ не посто-

янна и зависит от ряда факторов, основными из которых являются физико-механические свойства материала, а также особенности кинетики деформирования и разрушения материала при его измельчении. Характер из-

менения скорости $\frac{d\varepsilon_p}{dt}$ энергонасыщения

дисперсных систем в настоящее время изучен недостаточно. Показатель $\varphi_{уд}$ необходим для объективной оценки процесса энергонасыщения дисперсных систем.

В выражении (2) большое влияние на величину $\varphi_{уд}$ также оказывает изменение механоактивируемого объема V_k измельчаемого материала, который аккумулирует кинетическую энергию мелющего тела при воздействии на материал контактной нагрузки мелющих тел P^* . Величина механоактивируемого объема в свою очередь равна произведению площади контакта рабочих органов с измельчаемым продуктом S_k и толщиной сформированного слоя измельчаемого продукта в зоне контакта δ_k . Величина V_k обусловлена конструктивными и технологическими параметрами измельчительных машин.

Конструктивными параметрами рабочих органов измельчительной машины, влияющими на механоактивируемый объем V_k , являются форма мелющих тел и кривизна их рабочей поверхности, зависящая от радиуса мелющего тела $r_{м.т.}$

Форма мелющих тел и кривизна их рабочей поверхности определяют величину площади контакта мелющих тел S_k с измельчаемым материалом, которая в свою очередь определяет плотность потока передаваемой дисперсной системе энергии ε_p . В случае применения в измельчительных машинах мелющих тел в форме цилиндра площадь контакта будет определяться радиусом кривизны цилиндра $r_{м.т.}$ и высотой цилиндра h . Идеальной формой мелющих тел является шар, так как при этом $r_{м.т.} = h$ и площадью контакта является площадь сферического сегмента, что позволяет уменьшить эту площадь контакта до минимума и тем самым увеличить значение удельной контактной нагрузки

$$P^* = \frac{P_k}{S_k}, \quad (3)$$

где P_k – сила, действующая на измельчаемый материал.

Технологическим параметром измельчительной машины, влияющим в конечном итоге на удельный потенциал энергонасыщения дисперсной системы, является создаваемая в мельнице толщина слоя δ_k измельчаемого материала, на ограниченную площадь S_k которого передается энергия мелющих тел ε_p . Толщина формируемого слоя измельчаемого продукта в зоне контакта с рабочими органами в большинстве конструкций измельчи-

лей зависит от удельной поверхности исходного продукта и скорости подачи материала в зону измельчения, т.е. производительности.

Эффект увеличения степени дисперсности конечного продукта за счет уменьшения толщины слоя δ_k измельчаемого материала в зоне контакта рабочих органов, т.е. за счет увеличения удельной контактной нагрузки P^* на материал, теоретически обоснован и используется в ряде конструкций передовой измельчительной техники. Одной из таких конструкций является мельница «Ангмил» сверхтонкого измельчения, в которой для формирования определенной толщины и плотности слоя измельчаемого продукта используются центробежные силы. Отличительной особенностью данной конструкции является то, что одновременно с вращающимся цилиндрическим ротором, оснащенным рабочими органами, с более низкой скоростью в том же направлении вращается цилиндрический корпус, формируя при этом за счет центробежных сил минимальную толщину и максимальную плотность слоя измельчаемого материала. Известны также конструкции мельниц сверхтонкого измельчения, в рабочей камере которых создается вакуум с целью уменьшения толщины слоя δ_k и его уплотнения за счет удаления из материала прослоек газа, разрыхляющих этот слой.

Однако толщина слоя δ_k имеет свои оптимальные значения для определенных конструкций измельчительных машин и материалов, обладающих различными физико-механическими свойствами. Максимальная толщина слоя измельчаемого материала ограничена временем нагружения материала из-за конечной скорости распространения самих деформаций в твердом теле, а минимальная величина δ_k ограничена толщиной слоя пластических деформаций материала, при достижении которого процесс измельчения материала останавливается. Однако следует отметить, что процесс энергонасыщения дисперсной системы при этом продолжается за счет пластических деформаций, обеспечивающих основную долю удельной энергонасыщенности дисперсных систем $E_{уд}$ при механическом измельчении.

Зная время разрушения механоактивируемого объема материала V_k и используя среднее значение $\varphi_{уд.ср}$ в период механоактивации этого объема, можно определить удельную энергию $E_{уд}$, необходимую для энергонасыщения объема материала V_k . Поскольку величина удельного потенциала $\varphi_{уд}$, как отмечалось выше, не является постоян-

КИНЕТИКА И ДИНАМИКА ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ПИЩЕВЫХ ПРОДУКТОВ

ной, изменяясь от нуля в момент контакта мелющего тела с объемом материала до максимума при одноактном его разрушении, то среднее значение $\varphi_{уд,ср}$ при одноактном разрушении объема материала можно записать: $\varphi_{уд,ср} = 0,5\varphi_{уд}$. С учетом последнего величину $E_{уд}$ можно выразить следующей зависимостью:

$$E_{уд} = \varphi_{уд,ср} \times \tau = 0,5 \varphi_{уд} \times \tau, \quad (4)$$

где τ – время на деформирование объема исходного материала V_k с момента контакта с ним мелющего тела до достижения в материале предельных разрушающих напряжений.

Другими словами, время τ определяет длительность процесса механоактивации объема материала при одноактном его разрушении мелющими телами. Величина времени ограничена периодом деформирования материала объемом V_k с момента контакта его с мелющими телами, до момента разрушения материала.

Известно, что время нагружения τ определяется из выражения

$$\tau = \frac{P}{V_n}, \quad (5)$$

где P – предел прочности измельчаемого материала при одноосном сжатии; V_n – скорость нарастания напряжения в материале при воздействии на него мелющего тела.

Величина приращения энергии $d\epsilon_p$ за время dt в процессе механоактивации измельчаемого материала зависит от величины приращения кинетической энергии мелющего тела $dW_{м.т.}$, передаваемой за то же время для энергонасыщения объема материала V_k в процессе одноактного разрушения последнего. Связь величины приращения энергии $d\epsilon_p$ с величиной приращения кинетической энергии мелющего тела $dW_{м.т.}$ можно определить следующим выражением:

$$d\epsilon_p = \eta \times dW_{м.т.}, \quad (6)$$

где η – коэффициент поглощения кинетической энергии мелющего тела механоактивируемым объемом материала V_k при одноактном его разрушении.

Величина коэффициента поглощения энергии в процессе механоактивации не является постоянной и зависит от стадии процесса деформирования материала мелющими телами, а также от физико-механических свойств материала (при этом $\eta < 1$).

Окончательно уравнение (4) с учетом зависимостей (2), (5) и (6) может быть представлено в следующем виде:

$$E_{уд} = \frac{1}{2} \eta \frac{dW_{м.т.}}{V_k dt} \times \frac{P}{V_n}. \quad (7)$$

Анализ уравнения (7) показывает, что величина удельной энергонасыщенности дисперсных систем $E_{уд}$ при сухом измельчении в измельчительных машинах зависит от ряда параметров, определяемых кинетикой измельчения, динамикой движения мелющих тел в измельчительной машине и физико-механическими свойствами твердого материала.

1. Параметры, характеризующие кинетику измельчения. К таким параметрам относятся значение величины объема материала V_k при одноактном разрушении его мелющими телами и коэффициент поглощения кинетической энергии мелющего тела η механоактивируемым объемом материала V_k . Согласно формуле (7) снижение значения V_k приводит к увеличению удельной энергонасыщенности дисперсных систем $E_{уд}$, и наоборот. Величина коэффициента поглощения кинетической энергии мелющего тела объемом материала дисперсной системы зависит от стадии деформирования и физико-механических свойств объема материала и существенно влияет на величину удельной энергонасыщенности дисперсной системы.

2. Параметрами динамики движения мелющих тел измельчительной машины являются масса мелющих тел $m_{м.т.}$ и скорость их движения $V_{м.т.}$ в момент контакта мелющих тел с измельчаемым материалом. Поскольку кинетическая энергия мелющих тел определяется, как известно, по формуле $W_{м.т.} = \frac{m_{м.т.} \times V_{м.т.}^2}{2}$, то чем больше масса мелющих тел и их скорость в момент контакта с материалом, тем больше энергии можно передать для энергонасыщения дисперсной системы, и наоборот.

3. Параметрами, характеризующими физико-механические свойства и влияющими на величину удельной энергонасыщенности дисперсных систем при механоактивации, в формуле (7), являются значения величин P и V_n . Значение величины P характеризует прочностные свойства измельчаемого материала. При этом чем выше прочностные свойства механоактивируемого материала, тем больше энергии может поглощать дисперсная система. Величина скорости V_n зависит, как известно, от величины модуля полной деформации $E_{деф}$ и объема материала V_k при его одноактном измельчении. Отсюда увеличение значения величины полной деформации $E_{деф}$

уменьшает значение V_n , и наоборот. Следовательно, значение величины скорости нагружения V_n достаточно полно характеризует деформационные свойства измельчаемого материала в области упругого и пластического деформирования в процессе диспергирования твердого материала измельчительными машинами. Увеличение модуля полной деформации $E_{\text{деф}}$ приводит к уменьшению скорости V_n , а следовательно к увеличению удельной энергонасыщенности дисперсных систем $E_{\text{уд}}$.

Вышеизложенная классификация параметров носит несколько условный характер, так как практически каждый из них влияет на значения других параметров при механоактивации дисперсных систем. Предложенные авторами дифференциальные уравнения определения удельного потенциала энергонасыщения дисперсных систем $\Phi_{\text{уд}}$ при их механоактивации (2) и определения удельной энергонасыщенности дисперсных систем $E_{\text{уд}}$ (7), всесторонне характеризующие процесс энергонасыщения органопоорошков из растительного сырья, позволяют сделать ряд весьма существенных выводов:

- при разработке измельчительных машин, применяемых для механоактивации органопоорошков из растительного сырья, необходимо увеличивать динамику движения мелющих тел за счет увеличения их массы и скорости в момент контакта с измельчаемым продуктом, максимально уменьшать радиус кривизны мелющих тел и площади их контакта с измельчаемым материалом, задавать и формировать оптимальную толщину слоя измельчаемого материала в рабочей камере;

- при формировании энергонасыщенных дисперсных систем необходимо учитывать прочностные и деформационные свойства измельчаемого материала, а также закономерности изменения этих свойств, вызываемых изменением скорости нагружения измельчаемого материала мелющими телами в процессе его механоактивации.

Разработанная уникальная технология тонкого и сверхтонкого измельчения вторичных продуктов переработки зерна и круп вы-

годно отличается от известных методов извлечения пищевых волокон отсутствием какого-либо химического и (или) термического воздействия. Нагрев исходного растительного сырья до 70–80 °С за счет воздействия на него мелющих тел носит кратковременный характер и не сказывается отрицательно на свойствах, составе и качестве конечного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лаврова, Л.Ю. Механоактивированные органопоорошки – биокорректоры питания [Текст] / Л.Ю. Лаврова, И.А. Якутова, Г.А. Усов // Материалы I Международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – стратегия развития инновационной экономики». – Екатеринбург: Изд-во Урал. гос. экон. ун-та, 2011. – Секция 2. Интеграция науки и производства. Трансфер технологий. Ч. 1.-С. 167–169.
2. Фомин, В.Н. К вопросу о критериях оптимизации процессов переработки и получения полимерных композиционных материалов [Текст] / В.Н. Фомин // Доклады Академии наук. – 2004. – Т. 394, № 6.– С. 778–781.
3. Усов Г.А. Технология получения наноструктурированных дисперсных систем органических полимеров методом механоактивации применительно к производству сухих строительных смесей [Текст] / А.М. Никитин, Р.М. Ахмедьянов // BALTIMIX – сухие строительные смеси для XXI века: Технологии и бизнес: 9-я Международная специализированная отраслевая конференция. Петрозаводск, 2009. – С. 3.

Ошкордин А.И., проректор по связям с общественностью и международным отношениям, Уральский государственный экономический университет, E-mail: oleg@usue.ru, тел.: 8(343) 251-96-20;

Лаврова Л.Ю., зав. кафедрой технологий питания, Уральский государственный экономический университет, E-mail: lavrova-1@usue.ru, тел.: 8(343) 221-27-19;

Усов Г.А., доцент кафедры технологии и техники разведки месторождений полезных ископаемых, Уральский государственный горный университет, E-mail: usov_ga@mail.ru, тел.: 8(343) 257-64-68.