УДК 536

Механические и физико-химические способы обработки сырья растительного происхождения с использованием импульсного воздействия

Головацкий В.А. valdurtera@rambler.ru

Санкт-Петербургский государственный университет
низкотемпературных и пищевых технологий

Разрушение структуры материала связано с энергетическим взаимодействием источника энергии и разрушаемого материала. Перенос энергии возможен либо в виде импульса силы при непосредственном контакте, либо в виде кванта излучения. В работе приводится анализ основных направлений развития измельчительной техники, который показывает, что с развитием технологии конструкционных материалов в агрегатах все больше используется вибронапряженное состояние импульсного воздействия. Это позволяет не только снизить энергозатраты на процесс измельчения, но и существенно повысить надежность машин и агрегатов, уменьшить ремонтные простои, а значит и повысить производительность.

Ключевые слова: очистка, измельчение, пищевые продукты, обработка.

Резкое увеличение скорости протекания процессов очистки и измельчения возможно лишь при непрерывном вскрытии поверхности пищевого материала. Поэтому гораздо выгоднее затратить энергию на разрушение частиц с помощью импульсного воздействия на пищевой материал. Минимизация энергетических затрат на процесс в целом возможна лишь при знании механизмов разрушения твердых тел и агрегатов частиц. Мойка может являться одной из стадий подготовки материала к очистке или протекать одновременно с этим процессом непосредственно в очистительном аппарате.

Важно сформулировать энергетический подход к классификации процессов измельчения или дробления.

Разрушение структуры материала связано с энергетическим взаимодействием источника энергии и разрушаемого материала. Перенос энергии возможен либо в виде импульса силы при непосредственном контакте, либо в виде кванта излучения. Энергетическое воздействие внешних сил на разрушаемый материал

может сопровождаться переносом массы, теплоты, эмиссией электронов и другими физико-химическими эффектами, образуя то многообразие способов разрушения, которое известно на сегодняшний день [1–4]. Причем, большинство элементарных процессов переноса субстанции (импульса, тепла, массы) хорошо изучено, и предлагаемая система классификации, основанная на изучении явления измельчения как феномена, более консервативна и не подвержена столь скорым изменениям, как классификация аппаратов по технологическим, конструкционным либо иным признакам. Большинство методов воздействия на разрушаемый материал позаимствовано в природе, однако далеко не все природные явления нашли воплощение в технике. Многие явления вследствие масштабности факторов или наоборот, малости проявления эффектов, не используются в промышленной практике.

Искусственные, то есть созданные умом и руками человека способы разрушения материалов во многом воспроизводят природные процессы и явления, усиливая природные эффекты, сокращая время их протекания.

По характеру создаваемого в разрушаемом объекте напряженного состояния (НС) все процессы можно разделить на процессы, вызывающие точечное, линейное, плоское, объемное, а также комбинированное напряженное состояние (см. рис 1.1).



Рис. 1.1. Классификация способов обработки материалов по характеру напряженного состояния (НС).

По характеру и природе движущей силы процесса, способы диспергирования могут разделяться на следующие классы:

1. Гидродинамические, движущей силой которых, является гидродинамическое давление струи жидкости или газа, или перепад давления в объеме разрушаемого тела.

2. Массовые. Силовое воздействие формируют гравитационные, центробежные или инерционные силы.

3. Механические. Основой разрушения является механическое усилие статического, импульсного или циклического характера.

4. Термические. Разрушение вызывает разность объемного расширения неодинаково нагретых слоев материала.

5. Массообменные. Напряженное состояние в материале формируется за счет объемного сжатия, либо объемного расширения при диффузии структурообразующей влаги под действием разности концентраций, температур или осмотического давления.

6. Электромагнитные. Способы диспергирования, в которых побудителем разрушения являются электромагнитные поля различной частоты и амплитуды колебаний, вызывающие один из видов напряженного состояния.

Среди широкого спектра электромагнитных волн чисто магнитные методы диспергирования не применяются в практике как самостоятельный способ разрушения в виду крайне большой длительности процесса. Поэтому эти способы передачи энергии разрушаемому материалу лишь сопровождают или предшествуют какому-либо из вышеперечисленных способов силового воздействия, например, магнитная обработка суспензий волокнистых материалов перед механическим диспергированием.

7. Химические способы диспергирования основаны либо на объемном расширении продуктов химической реакции, например, в случае взрыва, либо на потере энергии связи, химического сродства части материала с основным массивом, как в случае окисной эрозии. Как промежуточный этап разрушения — ослабление энергии химического взаимодействия структурообразующих частиц материала, за счет выщелачивания, растворения или диффузии каких-либо составных частей из скелета материала.

8. Микробиологические способы диспергирования основаны на химическом или ферментативном воздействии бактерий, плесени и растений на материал. Биологические объекты потребляют составные части подложки в пищу, либо разлагают материал продуктами выделений в процессе жизнедеятельности. Причем эти природные процессы все чаще используют в технологии обогащения руд, выделения редкоземельных металлов, очистке гальванических стоков и разложении отходов различных производств.

Как видно из вышеперечисленного, классификация является подробным перечислением уже известных методов воздействия на диспергируемый материал. Однако упорядочение данных способов по более мелким признакам и группам позволяет определить "ячейки" незаполненные сегодняшним уровнем знаний и предсказать новые пути интенсификации и новые способы диспергирования материалов путем комбинации уже известных. Рассмотрим более подробно методы, вызывающие плоское или линейное напряженное состояние.

На рисунке 1.2 приведены три основных метода силового воздействия на материал и их частные случаи проявления, реализованные на сегодняшний день или возможные к реализации.



Рис. 1.2. Классификация способов диспергирования материалов по виду напряженного состояния и методам внешнего воздействия.

Дальнейшее развитие способов разрушения данной классификационной группы возможно комбинаторикой указанных методов, например, струйное разрушение струей ионизированного газа или плазмы, или механическое разрушение в поле электромагнитного излучения (СВЧ) и т.п.

Вторую большую группу процессов диспергирования составляют методы, вызывающие объемное напряженное состояние в разрушаемом материале, (рис.1.3).

Объемное напряженное состояние может быть вызвано практически любым силовым воздействием, например, всесторонним механическим сжатием или электрогидравлическим ударом. Поэтому на рисунке 1.3 детализированы

только те виды силового воздействия, которые не приводят к линейному или плоскому напряженному состоянию.



Рис. 1.3. Классификация способов диспергирования материалов по виду напряженного состояния и методам внешнего воздействия.

Как видно из схемы, многие методы хорошо известны и давно применяются в промышленности, другие, как, например, электродиализ, известны, но для целей диспергирования и разрушения не применяются. Хотя, хорошо известно, что при набухании коллоидных и капиллярно-пористых структур в результате осмоса влаги (растворителя) через полупроницаемую мембрану структурообразующих клеток развиваются колоссальные напряжения. Еще в древности дробление монолитных камней осуществляли деревянным клином, смачиваемым водой. Но этот процесс медленный. При наложении электромагнитного поля явление осмоса можно значительно ускорить — это и есть электродиализ.

В настоящее время реализованы многие физические способы воздействия на разрушаемый материал, приводящие к развитию в его массиве запредельных

напряжений и разрыву сплошности. Однако основным способом обработки материалов остается механическое дробление и измельчение.

Огромное многообразие конструктивных решений машин одноименного назначения свидетельствует не только о творческом поиске их создателей, но и об отсутствии единого подхода к созданию и проектированию нового оборудования. На наш взгляд, такой подход может обеспечить простая и наглядная классификация, анализирующая механизм нагружения единичной частицы разрушаемого материала.

До недавнего времени к способам механического разрушения относили лишь удар, истирание, раздавливание, раскалывание, распил и различные их видопроявления.

При анализе машин с различной кинематикой удобнее всего оперировать не понятием способа нагружения, например излом, а понятием механизма напряженного состояния — изгиб. При этом появляется возможность абстрагирования от частных проявлений конкретного способа и на основе простых структурных схем осуществлять моделирование и синтез различных напряженных состояний и создавать новые машины и механизмы.

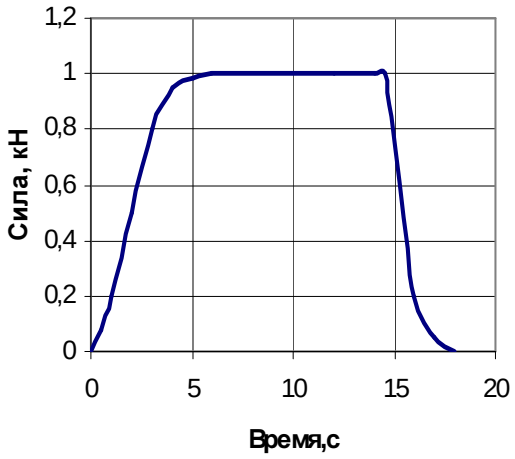
Оперируя понятиями сопротивления материалов, основными напряженными состояниями материала могут быть: сжатие (раздавливание), растяжение (разрыв), изгиб (излом), кручение (скручивание), сдвиг (срез, истирание). При такой классификации вроде бы остаются за кадром такие способы разрушения, как удар и раскол. Однако при силовом анализе этих способов легко выявить, что от раздавливания они отличаются: свободный удар — замыкание силовой цепи осуществляется инерционными силами самого материала, раскол — вид сосредоточения сжатия.

Применение понятий сопротивления материалов к анализу способов дробления и измельчения тем более благотворно, что силовой векторный анализ дает наглядное представление о сложных процессах. Вектор силы или момента легко поворачивать, изменять точку приложения, то есть осуществлять синтез нового способа механического разрушения.

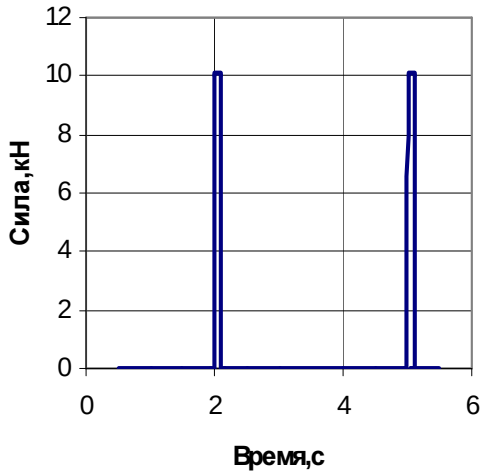
Чтобы анализ напряженных состояний был более полным, на наш взгляд, в него необходимо отдельной строкой включить вибронапряженное состояние, то есть вибрацию.

Развиваемое в материале напряжение зависит не только от вида напряженного состояния, но и от характера изменения развиваемого усилия во времени. Сжатие кускового материала может осуществляться статически и динамически. При статическом нагружении скорость изменения усилия во времени чрезвы-

чайно мала и стремится к нулю, $dF/d\tau \to 0$. При динамическом, $dF/d\tau \to \infty$. При медленном нагружении (рис. 1.4 а) большинство материалов выдерживают колоссальные нагрузки до разрушения в 10–40 раз превышающие усилие разрыва. Такой характер силового воздействия позволяет провести внутреннюю перестройку структуры материала таким образом, что возникающие при нагружении и имеющиеся в материале природные дефекты структуры “залечиваются” [3–4]. Если материал обладает пластичностью, в объеме формируются зоны ползучести, что приводит к изменению формы исходного куска и уменьшению внутренних напряжений.



(а)



(б)

Рис. 1.4. Характер изменения усилия сжатия при статическом (а) и динамическом (б) нагружении.

В зависимости от площади и направления приложения усилия в материале может возникать плоское или объемное напряженное состояние. Если нагрузка распределена по линии или по узкой площадке, то в материале формируется плоское напряженное состояние, называемое раскалыванием. Если нагрузка равномерно распределена по всей поверхности или по большей ее части), такое нагружение называют раздавливание или всестороннее сжатие. Если вся сила сосредоточена в точке или небольшой ее окрестности, в теле формируется линейное напряженное состояние, а процесс разрушения во многом аналогичен раскалыванию (прокол, пробой, прошивание). В случае, когда линии действующих на тело сил значительно разнесены в пространстве или действуют под углом друг к другу, в материале формируется напряжение изгиба, а способ разрушения называют разламывание. Если смещение действующих сил в пространстве невелико или усилие направлено под острым углом к поверхности

материала, то в материале формируется напряжение сдвига, а способ разрушения называется резанием (скол, распиливание). Если силы направлены по одной линии, но в противоположном направлении, то в материале может возникать напряжение растяжения, а разрушение может быть названо разрывом. При смещении линий действующих противоположно направленных сил в пространстве в материале возникает напряжение кручения, а разрушение наступает в результате скручивания или среза.

Высокоскоростное динамическое нагружение (рис. 1.4 б) формирует в объеме материала волну сжатия, отраженная или обратная волна будет вызывать в материале растяжение [4]. В этом случае релаксация (уменьшение во времени) напряжений не происходит, и разрушение наступает при гораздо меньших усилиях. При динамическом воздействии в материале также могут формироваться все виды напряженного состояния. Это всестороннее динамическое сжатие (внешний объемный взрыв) или растяжение (внутренний взрыв). Локальное сжатие или удар (свободный — во взвешенном состоянии или стесненный — в случае ограничения движения материала). Динамический изгиб (ударное нагружение двухопорной балки) или высокоскоростной сдвиг (разрубание, рассекание и т.п.). Такое же напряжение сдвига формируется, если динамическая сила направлена по касательной к поверхности материала, а разрушение называется истиранием.

Динамическое рассредоточенное сжатие в технике встречается в кузнечных молотах, прессах, простейших слесарных инструментах — клещах, плоскогубцах и молотках. Техническая реализация сосредоточенного сжатия или раскалывания наблюдается при воздействии на материал стамеской, мечом, ножом, шилом, клещами или заостренным концом молотка. В промышленных мельницах или дробилках ударного действия также реализуется принцип сосредоточенного сжатия или удара. Это, прежде всего, молотковые мельницы, дезинтеграторы, роторные и роторно-цепные дробилки. Раскалывание формируется в щековых дробилках, гидравлических и механических колунах.

Разрушение трением наблюдается при воздействии на материал любым абразивным инструментом: шлифовальным кругом, диском, бруском, напильником, наждачной бумагой или шабером. В измельчительных агрегатах истирание часто выступает как сопутствующий процесс наряду с ударом или раздавливанием, например, в барабанных мельницах самоизмельчения или многовалковых краскотерках, роторных мелотерках и т.п.

Изгибное напряженное состояние формируется при сжатии или ударе по куску материала (рис. 1.5), установленного на двух опорах, как, например

в щековых дробилках со смещенными рифлями, или в зубчатых валковых дробилках [2], если зубья расположены по принципу шип-паз (вершина-впадина) (рис. 1.9). Удар в свободном состоянии по длинномерному куску в центре или двумя молотками одновременно по краям, тоже формирует изгибное напряжение.

Кручением, как метод измельчения, в настоящее время практически не применяется, хотя наблюдается в различных деталях машин и в буровом инструменте наряду со сдвигом материал подвергается и крутильным напряжениям.



(а) (б)

Рис. 1.5. Схема движения инструмента (а) и схема сил (б) при комбинированном виброизломе с истиранием.

Сдвиговое нагружение формируется при воздействии ручным слесарным инструментом: ножом, стамеской, рубанком, пилой. Аналогичные нагрузки формируются при работе строительно-дорожных машин: бульдозера, скрепера, грейдера, экскаватора, рыхлителя, а также при механической обработке деталей на строгальных, фрезерных, протяжных и токарных станках.

Разрывное напряжение формируется при простом растяжении или при разрушении взрывом, внутренним давлением газов или жидкостей. В технике такому напряжению подвергаются изделия и детали, обрабатываемые на протяжных и волочильных прокатных станах, частично такое разрушение наблюдается в коллоидных кавитационных мельницах [3–4].

Особым видом динамического силового воздействия является вибрационное нагружение силой переменной амплитуды (рис. 1.6 а) или знакопеременного характера направления приложения силы (рис. 1.6 б).

Величина действующей силы во времени t может изменяться от нуля до некоторого максимального значения — $2F_0$ (Рис. 1.6 а):

$$F = F_0 + F_0 \sin(\omega t + \varphi) \qquad (1.1)$$

или меняться по величине и по направлению, т.е. носить знакопеременный характер (Рис. 1.6 б)

$$F = F_0 \sin(\omega t + \varphi) . \quad (1.2)$$

Колебания в реальных динамических системах, вследствие действия сил сопротивления, носят затухающий характер и изменяются по более сложному закону [37]

$$F = F_0 \exp(-\delta t) \sin(\omega t + \varphi) , \quad (1.3)$$

где F_0 — амплитудное значение усилия, Н;

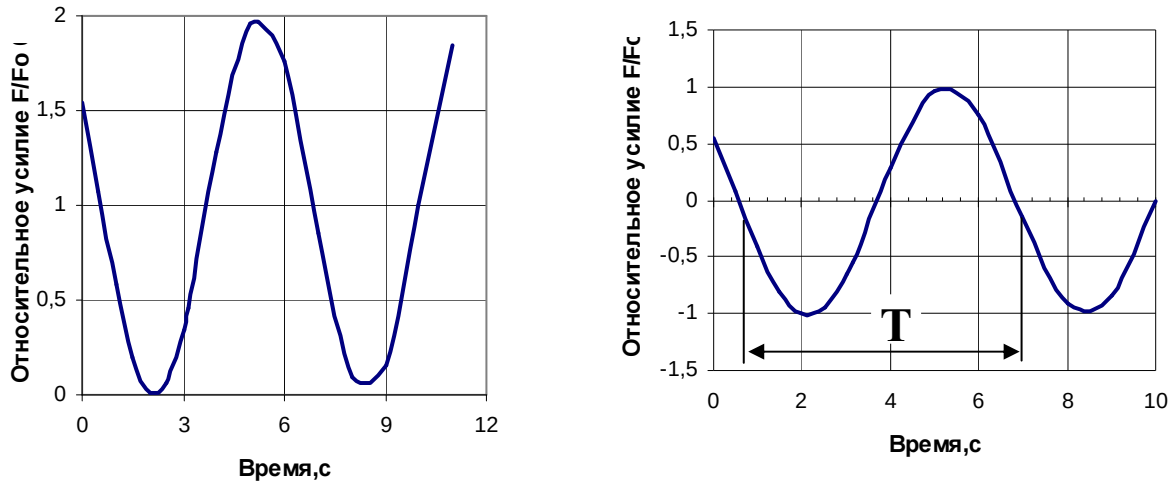
ω — циклическая частота колебаний, 1/с;

φ — начальная фаза колебаний, град;

δ — коэффициент затухания колебаний, 1/с.

Непосредственно с коэффициентом затухания δ связано понятие времени релаксации τ, т.е. промежутка времени, в течение которого амплитуда затухающих колебаний уменьшается в e раз

$$\tau = 1/\delta. \quad (1.4)$$



(а) (б)

Рис. 1.6. Характер изменения усилия при динамическом нагружении с переменной амплитудой (а) и знакопеременным направлением (б).

В любом случае характер развиваемых в материале напряжений при динамическом знакопеременном воздействии не сопоставим ни с одним из вышеперечисленных случаев, и может быть определен как вибронапряженное состояние. Этот вид напряженого состояния отличается ярко выраженным волновым характером движения фронтов уплотнения-растяжения. Суперпозиция (наложение) прямых и обратных волн приводит к локальному сложению или вычитанию амплитуд динамического нагружения, в результате чего с шагом, близким к длине волны λ, возникают зоны удвоенного напряжения.

$$\lambda = \upsilon T\,, \tag{1.5}$$

где υ — скорость распространения волн в твердом теле (эта скорость близка к скорости распространения звука в твердом теле в продольном и поперечном направлениях), м/с; T — период колебаний, с.

Это позволяет достигать предельных напряжений разрушения даже в случае действия сил вдвое меньшей интенсивности, по сравнению со статическим нагружением [1].

Наибольшего результата можно добиться при воздействии на разрушаемое тело с частотой близкой к частоте собственных колебаний, при этом наблюдается явление резкого возрастания амплитуды вынужденных колебаний, т.е. резонанс. Если тело обладает упругими свойствами, то собственная частота колебаний равна [37]

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}\,, \tag{1.6}$$

где k — коэффициент упругости тела, Па; m — масса тела, кг.

Для затухающих колебаний резонансная частота вынуждающей внешней силы будет равна [37]

$$\omega_{рез} = \sqrt{\omega_0^2 - 2\delta^2}\,. \tag{1.7}$$

Силовой анализ кинематики движения рабочего органа мельницы или дробилки позволяет вскрыть основные направления интенсификации процесса разрушения, повышения его экономичности и эффективности. Появляется возможность синтеза новых видов напряженного состояния, так как внутри каждого напряженного состояния возможно комбинирование путем изменения точки приложения силы (внецентренное сжатие) или направлений одновременного приложения пар сил (двухосное сжатие, трехосное сжатие, объемное сжатие и т.д.). Например для зубчатой валковой дробилки, вследствие сжатия с одновременным сдвигом и вибрационного характера замыкающей силы в материале формируется виброраскалывание с одновременным изгибом [2].

Анализ механизма разрушения в роторной дробилке показывает, что в материале реализуется напряженное состояние виброудар или виброскол с одновременным истиранием), и в случае выполнения опорной щеки в виде колосниковой решетки добавляется изгиб.

Формирование сложного напряженного состояния в конкретной мельнице или дробилке осуществляется как за счет подбора кинематики относительного движения измельчаемого материала и элементов дезинтеграционной поверхности, так и путем профилирования самой поверхности (придание определенной кривизны, изменение направления и формы рифления).

Синтез новых механизмов нагружения сопряжен с усложнением кинематики движения рабочих органов, и, как правило, к усложнению конструкции мельницы или дробилки. Поэтому, большинство сложных кинематических схем не реализованы на практике.

На наш взгляд существенный прогресс в развитии техники измельчения могут дать адаптивные рабочие органы с высокой степенью подвижности и небольшим числом внутренних кинематических соединений, например, гибкий трос или упругодеформируемый элемент. Наличие внутренних избыточных степеней свободы позволяет совершать в пространстве сложные движения без дополнительных механических вариаторов и направляющих, и, что более важно, эти рабочие органы могут автоматически настраиваться на внешнее сопротивление, т.е. иметь все свойства дифференциальных механизмов.

Анализ основных направлений развития помольной и дробильной техники показывает, что с развитием технологии конструкционных материалов в агрегатах все больше используется вибронапряженное состояние. Это позволяет не только снизить энергозатраты на процесс измельчения, но и существенно повысить надежность машин и агрегатов, уменьшить ремонтные простои, а значит и повысить производительность.

Хорошее развитие получили конусные дробилки с виброподвеской внешнего конуса [2] или гидроопорой внутреннего конуса, но поистине революционным шагом развития конусных дробилок было создание виброконусных агрегатов, с возбуждением раздавливающего усилия вращающимся внутри конуса дебалансом. Во всех этих устройствах вибрация является основным интенсифицирующим фактором.

Список литературы

1. Дарков А. В., Шпиро Г.С. Сопротивление материалов. — М.: Высшая школа, 1989. — 734 с.
2. Клушанцев Б.В. Дробилки. Конструкция, расчет, особенности эксплуатации. — М.: Машиностроение, 1990. — 320 с.
3. Размольное оборудование: Каталог. — М.:ЦИНТИхимнефтемаш, 1976. — 29 с.
4. Шуляк В.А. Сушка и механотермическая обработка дисперсных материалов и сред. Минск: Изд. центр БГУ, 2003. — 240с.

Mechanical and physical-chemical methods of processing phytogenic raw material by using impulse excitation

Golovatskiy V.A.

Saint-Petersburg State University of Refrigeration
and Food Engineering

Demolition of material structure is connected with energy interaction of energy source and breakable material. Energy transfer is possible either as impulse of force at direct contact, or as a radiation quantum. The paper analyzes the basic lines of development of milling equipment, which shows that owing to improvement of constructional material technologies more and more vibro-stress of impulse excitation is used in apparatus. It allows not only reduce power consumption for milling but materially extend reliability of machines and apparatus, cut down repair idle times, which means enhancement of productivity.

Keywords: peeling, milling, foods, treatment.