

УДК 621.047:621.926

Возможные пути совершенствования измельчителя для фруктов и овощей

Д-р техн. наук Верболоз Е.И.
Кондратов А.В.
Кравцова Е.В. jenuska89@mail.ru

*Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет ИТМО
Институт холода и биотехнологий
191002, Санкт-Петербург, ул. Ломоносова, 9*

В работе рассмотрены возможности оценки качества работы различных измельчителей и на основе предложенных соотношений проведен сравнительный анализ их эффективности. Для одного из наиболее эффективных видов измельчителей предложены пути совершенствования.

Ключевые слова: измельчение, эффективность, конструктивные особенности.

Possible ways of the improvement pulverizing for fruit and vegetables

D.Sc. Verboloz E.I., Kondratov A.V., Kravcova E.V.
jenuska89@mail.ru

*Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics.
Institute of Refrigeration and Biotechnology
191002, St. Petersburg, Lomonosov str., 9*

In work are considered possibility of the estimation quality work different pulverizing and on base of the offered correlations is organized benchmark analysis to their efficiency. From the most efficient type pulverizing are offered way of the improvement.

Keywords: pulverizing, efficiency, constructive particularities.

При переработке фруктов и овощей для получения пюре и соков наиболее ответственной операцией является их измельчение.

Наиболее широко для оценки эффективности работы измельчителей используется коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{A_{\Pi}}{A_{\Pi} + A_{y} + A_{o}}, \quad (1)$$

где A_{Π} – работа образования новой поверхности, Дж;

A_{y} – работа упругой деформации;

A_{o} – работа пластической деформации.

Этот показатель физически вполне обоснован, так как показывает отношение полезных затрат энергии к общим. Однако практическое применение критерия затруднено, так как правильно оценить величину полезных работ практически невозможно. Для расчета A_{Π} в формуле Ребиндера необходимо знать величину коэффициента пропорциональности K_s , информация о котором также ограничена:

$$A_{\Pi} = K_s \cdot \Delta S, \quad \text{Дж}, \quad (2)$$

где ΔS – прирост площади новой поверхности, м^2 .

Чтобы избежать трудностей теоретического расчета A_{Π} многие авторы вводят в рассмотрение косвенные параметры энергетической эффективности. Например, при сравнении молотковых дробилок предложен показатель удельной загрузки ротора P_y :

$$P_{уд} = \frac{N}{D \cdot L}, \quad \text{кВт/м}^2, \quad (3)$$

где N – потребляемая мощность, кВт;

D – диаметр ротора, м;

L – активная длина ротора, м.

Физически этот показатель соответствует энергонапряженности единицы площади диаметрального сечения измельчителя. В таком виде этот показатель не применим к другим видам измельчителей.

Для шаровых мельниц широко применяют показатель удельной производительности $\Pi_{уд}$, являющийся отношением производительности измельчителя G_M , т/ч к объему ее корпуса V_A , м^3 .

$$P_{уд} = \frac{G_M}{V_A}, \text{ т/м}^3\text{ч.} \quad (4)$$

Производительность измельчителя, выраженная в килограммах в час или тоннах в час, никак не характеризует эффективность их работы. В этом отношении более обоснованно выражать производительность в абсолютном приросте новой поверхности ΔS в $\text{м}^2/\text{ч}$. Однако измерение прироста поверхности затруднено и поэтому в практических расчетах вряд ли найдет широкое применение. Выразим прирост поверхности ΔS через характеристики материала и производительность мельницы. Удельная поверхность дисперсного материала S_d выражается по известной формуле

$$S_d = \frac{S_M}{V_M} = \frac{n6\pi d_{\text{э}}^2}{n\pi d_{\text{э}}^3} = \frac{6}{\psi \cdot d_{\text{э}}}, \text{ м}^2/\text{м}^3, \quad (5)$$

где S_M – изменение суммарной площади поверхности частиц материала в единицу времени $\text{м}^2/\text{с}$;

V_M – объемная производительность мельницы, $\text{м}^3/\text{с}$;

n – счетное число частиц;

ψ – фактор формы частицы – отношение площади поверхности частицы неправильной формы к площади поверхности эквивалентной по объему сферы диаметром $d_{\text{э}}$;

$d_{\text{э}}$ – средний эквивалентный диаметр частицы материала, м.

Выражая из формулы (5) S_M , получим:

$$S_M = \frac{6V_M}{\psi d_{\text{э}}} \quad \text{или} \quad S_M = \frac{6G_M}{\psi d_{\text{э}} \rho_M}, \quad (6)$$

где ρ_M – истинная плотность материала, $\text{кг}/\text{м}^3$;

G_M – массовая производительность измельчителя, $\text{кг}/\text{с}$;

V_M – объемная производительность измельчителя, $\text{м}^3/\text{с}$.

Тогда прирост площади поверхности в единицу времени определится, как

$$\Delta S = S_{M_2} - S_{M_1} = \frac{6 G_M}{\rho_M} \left(\frac{1}{\psi_2 d_{\mathcal{E}_2}} - \frac{1}{\psi_1 d_{\mathcal{E}_1}} \right) , \text{ м}^2/\text{с}. \quad (7)$$

Введем понятие степени измельчения i :

$$i = \frac{d_{\mathcal{E}_1}}{d_{\mathcal{E}_2}}, \quad (8)$$

где $d_{\mathcal{E}_1}, d_{\mathcal{E}_2}$ - средний начальный и конечный размер частиц измельчаемого материала соответственно.

С учетом (8) формула (7) примет вид:

$$\Delta S = \frac{6 G_M}{\psi_1 \rho_M d_{\mathcal{E}_1}} \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} i - 1 \right) \quad \text{либо} \quad \Delta S = \frac{6 G_M}{\psi_2 \rho_M d_{\mathcal{E}_2}} \left(\frac{\psi_1}{\psi_2} - \frac{1}{i} \right) . \quad (9)$$

Как правило, форма частиц материала до и после измельчения неодинакова, но в тех случаях, когда этим изменением можно пренебречь, формула (9) значительно упростится:

$$\Delta S = \frac{6 G_M}{\psi \rho_M d_{\mathcal{E}_1}} (i - 1) . \quad (10)$$

В формулу (10) входят наиболее часто применяемые в промышленной практике параметры: производительность G_M , степень измельчения i , плотность материала ρ_M , начальный размер кусков $d_{\mathcal{E}_1}$, а фактор формы является табличной величиной, известной для широкого класса материалов.

С учетом вышеприведенных рассуждений сформулируем определение параметра энергетической эффективности.

Параметр эффективности - это отношение полезно достигаемого технологического результата измельчения (ΔS) к суммарным энергетическим затратам, достигаемым в единице рабочего объема рабочего пространства.

$$\mathfrak{E} = \frac{\Delta S}{V_A \cdot N}$$

Этот показатель имеет размерность 1/м·Дж или с/Нм². То есть, этот параметр показывает прирост новой поверхности в единице объема рабочего пространства на единицу затраченной работы в единицу времени. С учетом ранее приведенной формулы

$$\mathfrak{E} = \frac{6 G_M (i-1)}{\rho_M \psi d_{\mathfrak{E}_1} \cdot V_A \cdot N}$$

Тогда значение критерия качества I в ранее записанной формуле может быть представлено в виде

$$I = \frac{6 (i-1)}{\rho_M \psi d_{\mathfrak{E}_1}}, \text{ м}^2/\text{кг}$$

С учетом размерности критерия качества I , формулу можно привести к безразмерному виду

$$\mathfrak{E} = \frac{G^3 \cdot I}{\rho_M V_A \cdot N}$$

Предложенный показатель может быть использован для сравнения любых видов измельчительного оборудования, применяемого для переработки одного и того же мате-

риала. При сравнении аппаратов для измельчения различных материалов в записанные формулы необходимо ввести параметр, характеризующий прочность материала

$$\Theta = \frac{\Delta S \cdot \Pi_{PS}}{V_A \cdot N}, \quad 1/\text{м}^3,$$

где Π_{ps} – показатель прочности материала, Дж/м².

Величина $N/\Delta S$ также косвенно характеризует прочность измельчаемого материала, т.к. по определению

$$\Pi_{PS} = \frac{A_S}{S_M},$$

где A_S – работа разрушения, Дж.

Полагая, что основную долю в работу разрушения вносит работа упругой деформации, то для всего объема материала V_M ,

$$A_S = \frac{\sigma^2 V_M}{2E}.$$

С учетом записанной формулы критерий, учитывающий прирост площади поверхности измельченного материала и его прочностные свойства примет вид

$$I = \frac{6(i-1)\Pi_{PS}}{\rho_M \psi d_{\Theta_1}}, \quad \text{Дж/кг}$$

с учетом формулы и

$$I = \frac{3(i-1)\sigma^2 V_M}{\rho_M \psi d_{\Theta_1} S_M E},$$

или с учетом ранее записанного соотношения

$$I = \frac{(i-1) \sigma^2}{\rho_M 2E}, \text{ м}^2/\text{с}^2$$

где σ - предел прочности материала, Па;

E – модуль Юнга, Па.

Параметр \mathcal{E} тем выше, чем больший прирост новой поверхности будет достигнут для более прочных материалов при меньших энергетических затратах и минимальном объеме помольной камеры.

Зависимость параметра энергетической эффективности \mathcal{E} от объемной производительности измельчителя V_m представлена на рисунке 1.

Аппроксимация зависимости параметра энергетической эффективности \mathcal{E} от производительности измельчителя по готовому продукту V_m выполнена с помощью пакета прикладных программ Excel. Зависимость аппроксимируется степенной функцией вида

$$\mathcal{E} = nV_m^{-1},$$

где n – численный коэффициент (изменяется в пределах от 1200, для верхней границы точек до 1 – нижняя граница).

На рисунке 1 представлено сравнение табличных данных и расчетных значений (сплошная линия), при $n=15$. Средне квадратичное отклонение $R^2 = 0.7142$. Объемная производительность измельчителя по готовому продукту в формуле стоит в числителе ($V_m = G_m/\rho$), поэтому логично ожидать прямой пропорциональности \mathcal{E} и V_m , однако влияние остальных параметров, в свою очередь являющихся функцией производительности, приводит к обратно пропорциональной зависимости.

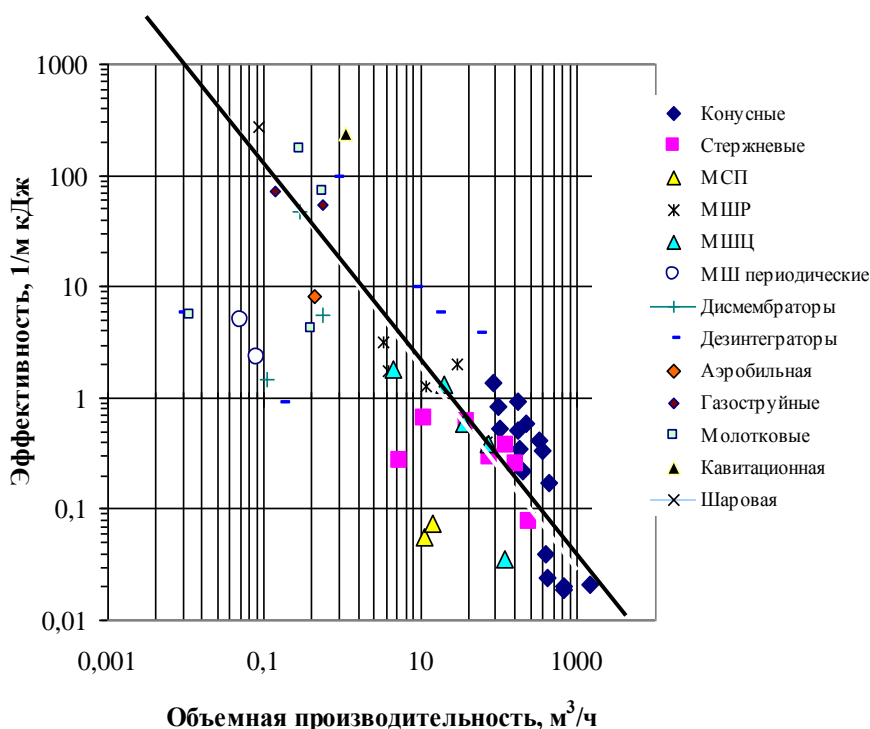


Рис.1. Сравнение измельчителей по параметру энергетической эффективности

Проведенный с помощью предложенного параметра анализ свидетельствует о том, что к числу наиболее эффективных измельчителей относятся кавитационные.

Проделанный анализ свидетельствует о необходимости создания измельчителей для фруктов и овощей с использованием кавитационных эффектов.

Предлагаемое техническое решение относится к гидромеханическим роторно-статорным аппаратам и может быть использовано для тонкого измельчения и гомогенизации в системах «жидкость - твердое тело» и «жидкость - жидкость» с применением эффектов кавитации и гидравлических ударов.

Известен высокочастотный многорядный роторно-импульсный измельчитель содержащий корпус с кольцевой рабочей камерой, в котором концентрично с зазором установлены, выполненные в виде тел вращения полые статор и ротор, в боковых стенках которых выполнены сквозные каналы, при этом ряды каналов ротора сдвинуты относительно друг друга на определенную величину, а каналы статора выполнены без сдвига. При этом когда каналы первого ряда статора и ротора совпадают, каналы других рядов ротора сдвинуты в окружном направлении относительно каналов соответствующих ря-

дов статора на величину, определяемого из заданного соотношения. За счет этого увеличивается частота генерируемых импульсов давления с определенным сдвигом по фазе.

Известен также диспергатор состоящий из корпуса с входным и выходным патрубками и жестко закрепленным в нем статорным кольцом с прорезями, в котором на валу жестко закреплен ротор, снабженный подвижным в осевом направлении роторным кольцом с прорезями, отличающийся тем, что роторное кольцо с прорезями выполнено с цилиндрическим кольцевым выступом, образующим с торцевыми поверхностями роторного кольца и заднего покрывного диска ротора камеру, сообщающуюся с прорезями роторного кольца межлопастными каналами ротора.

Одним из наиболее эффективных является роторный кавитационный измельчитель содержащий корпус с патрубками входа и выхода обрабатываемого потока материалов и установленные в корпусе концентрично и с зазором по отношению друг к другу кольцевой ротор с расположенными в нем лопатками центробежного насоса и охватывающий его кольцевой статор, при этом ротор и статор имеют радиальные цилиндрические отверстия для прохождения потока материала. Каждое отверстие ротора и/или статора имеет на внутренней стенке винтовую канавку. Частичное повышение степени диспергирования реализуется за счет турбулизации потока материала.

Недостатком указанных аппаратов является не достаточно эффективное измельчение твердой фазы вследствие слабо развиваемой гидродинамической кавитации.

Предлагается достичь новый технический результат в высокочастотном многорядном роторно-импульсном аппарате, содержащем корпус с кольцевой рабочей камерой, установленные в корпусе концентрично с зазором, выполненные в виде тел вращения полые статор и ротор, в роторе расположены лопатки центробежного насоса. В боковых стенках ротора и статора выполнены сквозные каналы, каждый из каналов имеет на внутренней стенке винтовую канавку. Отверстия ротора выполнены с наклоном на определенный угол по течению потока. Все канавки расположены рядами с количеством рядов не менее одного, при этом каналы ротора и статора выполнены таким образом, что в положении, когда каналы первого ряда ротора совмещены с каналами первого ряда статора, каналы других рядов ротора сдвинуты в окружном направлении относительно каналов соответствующих рядов статора.

Технический результат, который может быть достигнут при осуществлении такого технического решения – повышение степени диспергирования смесей за счет турбулизации обрабатываемого потока материала, а также увеличение степени измельчения минерального сырья вследствие увеличения частоты генерируемых импульсов давления при увеличении количества рядов каналов в статоре и роторе с соответствующим сдви-

гом каналов в рядах и выполнению отверстий ротора с наклоном под определенным углом.

Предлагаемое усовершенствование измельчителя можно иллюстрировать рисунком 2.

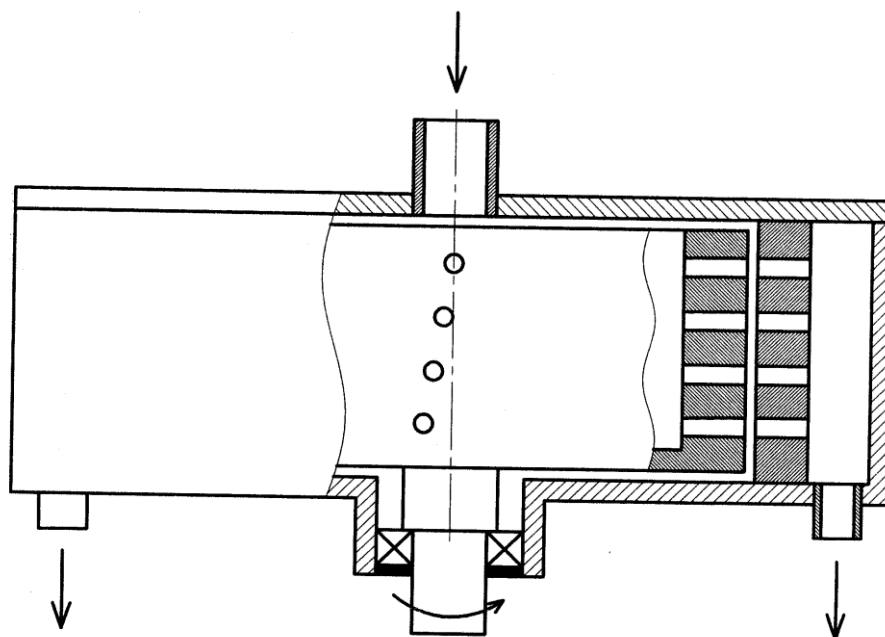


Рис.2. Принципиальная схема усовершенствованного измельчителя.

Измельчитель работает следующим образом. Жидкая смесь подается под давлением в полость вращающегося ротора, далее проходя по канавкам ротора, благодаря наличию на стенках винтовых канавок, происходит закручивание потока, что способствует возникновению интенсивной кавитации. При этом при совмещении каналов ротора и каналов статора одного ряда, остальные ряды каналов расходятся, что генерирует импульс давления. Генерируемый каждой парой «канал ротора – канал статора» импульс давления имеет протяженную во времени положительную часть и короткую и глубокую отрицательную часть. Длительность каждой отрицательной части импульса при частотах вращения ротора 1000-3000 об/мин, давлении на входе в аппарат 3-10 атм. и при выполнении ротора аппарата с радиусом 7-15 см, составляет долю от всей длительности генерируемого импульса, равную $0,2K_1$. Так длительность импульса пропорциональна величине, равной удвоенной ширине канала – величине $2a$. Шаг канавки составляет преимущественно 10-20 мм.

При этом для получения максимального количества разделенных во времени импульсов минимальное количество рядов равно n , целой части числовой величины $(a+b)/0,1K_1 a$. Здесь b – расстояние в окружном направлении между соседними каналами. При этом величину b необходимо выбирать в интервале, определяемом коэффициентом K_2 : $b=K_2 a$, где $1,1 \leq K_2 \leq 1,3$.

Предложенное усовершенствование измельчителя позволит в максимальной степени реализовать идеи кавитационного измельчения и существенно повысит его эффективность.

Список литературы:

1. Алексеев Г.В., Кондратов А.В. Изучение режимов кавитационного разрушения пищевого сырья как элемента нанотехнологий. Известия СПбГУНПТ, №3, 2007, с.29-31.
2. Алексеев Г.В., Кондратов А.В. Рабочий орган для восстановления кавитационного диспергатора. Патент РФ на изобретение №2339497, 2007.
3. Алексеев Г.В., Кондратов А.В., Верболоз Е.И. Модель кавитационного разрушения пищевого сырья. Хранение и переработка сельхозсырья, №11, 2007, с.56-59.