

УДК62-97/-98

АНАЛИЗ РАБОТЫ И ИССЛЕДОВАНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОТОРНОГО ДИСПЕРГАТОРА

С.Д. Руднев, М.А. Козлов*, Р.В. Крюк

ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт
пищевой промышленности (университет)»,
650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

*e-mail: m1tt@mail.ru

Дата поступления в редакцию: 30.01.2017

Дата принятия в печать: 02.03.2017

Аннотация. Рассматриваются вопросы, связанные с использованием роторно-пульсационных аппаратов в качестве диспергаторов при обработке жидких дисперсных систем, содержащих пищевые волокна. Значительной интенсификации процесса измельчения можно достичь путем проведения процесса в среде жидкости, при этом эффективность процесса повышается за счет механоактивирующего действия воды в дисперсных системах, подвергаемых обработке. Предложен подход к определению составляющих энергетического баланса через физические величины, легко доступные для непосредственного измерения, без применения специализированных средств и способов, и связывающий затраты полезной мощности на диспергирование с характеристиками процесса – кратностью обработки и степенью измельчения. Объектом исследований являлась модельная смесь, представляющая собой суспензию мякоти моркови в воде массовой концентрацией 5 %. Продолжительность воздействия на обрабатываемый продукт характеризовали кратностью обработки, в зависимости от которой определяли величину потребляемой аппаратом мощности при работе на холостом ходу и при обработке модельной смеси. Экспериментально определены в зависимости от кратности обработки следующие величины, характеризующие процесс диспергирования: температура модельной смеси, КПД процесса измельчения, степень измельчения. Представленная в работе интегральная характеристика связывает между собой удельные энергозатраты на процесс диспергирования со степенью измельчения и позволяет проводить сравнительный анализ с другими конструкциями диспергаторов. Установлено, что процесс диспергирования эффективно протекает до определенного значения кратности обработки, при достижении которой количество полезно затрачиваемой мощности остается практически постоянным, что не приводит к росту степени измельчения, потребляемая аппаратом мощность затрачивается только на перемещение обрабатываемого продукта, а дальнейшего увеличения степени измельчения можно достичь путем повышения частоты вращения ротора. На основе анализа экспериментальных данных сформированы способы снижения затрат энергии на диспергирование.

Ключевые слова. Роторно-пульсационный аппарат, диспергирование, дисперсные системы с пищевыми волокнами, затраты энергии

ANALYSIS OF OPERATION AND RESEARCH OF THE ENERGY CHARACTERISTICS ROTARY DISPERSER

S.D. Rudnev, M.A. Kozlov*, R.V. Kryuk

Kemerovo Institute of Food Science
and Technology (University),
47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

*e-mail: m1tt@mail.ru

Received: 30.01.2017

Accepted: 02.03.2017

Abstract. The article deals with issues related the use of rotary pulsating apparatus as dispersants, in the processing of liquid dispersions containing dietary fiber. Considerable intensification of the milling process can be achieved by conducting the process in a liquid medium, the process efficiency is improved due to the action of water due to mechanical activation disperse systems to be treated. An approach to determining the energy balance of the components in terms of physical size, easily accessible for direct measurements without the use of specialized tools and methods and binding costs of available capacity on the dispersion of the characteristics of the process - the multiplicity of processing and degree of grinding object of study is a model mixture is a suspension of the pulp of carrots water in a concentration of 5 mass%. The duration of exposure to the treated product is characterized by the multiplicity of treatment, depending on which determines the amount of power consumed by the device when idling and in the processing of model mixture. Determined experimentally, depending on the frequency of spraying, the following quantities characterizing the dispersion process: the temperature of the mixture model, the efficiency of the grinding process, the degree of crushing. Presented in the integral characteristic relates the specific energy consumption for the dispersion process with a degree of grinding and allows comparative analysis with other designs of dispersants. It is found that the dispersion process effectively proceeds up to a value of the multiplicity of processing, when reaching a number of useful consumed power remains practically constant, which does not lead to an increase of fineness, consumption unit power consumed only to move the product to be treated, and further increase the degree of crushing can be achieved by increase the speed of the rotor. On the basis of analysis of experimental data generated for ways to reduce dispersion of the expenditure of energy.

Keywords. The rotary-pulsation device, dispersion, dispersions with dietary fiber, energy costs

Введение

Одним из процессов, широко используемых в пищевой промышленности, является диспергирование – сокращение крупности исходного сырья до размеров частиц, соответствующих технологии переработки или до потребительских размеров. Процесс диспергирования растительного сырья характеризуется значительными затратами подводимой энергии, что обусловлено высокой структурной прочностью и анизотропией свойств. Высокая прочность растительного сырья связана с особенностями морфологического строения растительной ткани, обусловлена наличием твердой неразрывимой клеточной стенки, состоящей главным образом из целлюлозы, погруженной в полисахаридный матрикс из гемицеллюлоз и пектиновых веществ. Целлюлозный каркас обеспечивает прочностные свойства растительной ткани, а полисахаридный матрикс – ее упругие свойства.

Любой процесс разрушения (образования новой поверхности в твердом теле), независимо от перерабатываемого сырья, характеризуется очень низкой энергетической эффективностью. Согласно теории П.А. Ребиндера, в поверхностную энергию преобразуется только избыток энергии упругой деформации, накопленной материалом, отсюда КПД процесса составляет менее 1 % [1]. Одним из путей интенсификации разрушения твердых тел является осуществление процесса в среде жидкости, причем для пищевых материалов таковой в наилучшем случае является вода и ее растворы. При этом эффективность процесса повышается за счет механоактивирующего действия воды в дисперсных системах, подвергаемых обработке. Влияние концентрации влаги в растительных дисперсных системах велико. При насыщении водой снижается прочность адгезионного взаимодействия растительных структур. Вода повышает подвижность связей, снижает энергию поверхностных взаимодействий, замещая более прочные межмолекулярные связи в биополимерах водородными [2]. При таком понижении адгезионной прочности целесообразно получать порообразные стерилизованные продукты с заданной концентрацией сухих веществ, минуя стадию высушивания с целью консервации или же низкотемпературного хранения. Кроме того, измельчение растительной клетчатки является непростой технологической проблемой. Целлюлоза (клетчатка) и пектиновые вещества относятся к классу веществ, которые в настоящее время принято называть пищевыми волокнами, они должны обязательно входить в рацион питания человека в качестве компонента. Клетчатку также называют грубыми пищевыми волокнами, а пектиновые вещества – мягкими.

Перспективным оборудованием для диспергирования растительного сырья в жидкой среде являются аппараты роторно-пульсационного типа (РПА), которые позволяют проводить процесс в условиях интенсивной гидромеханической активации. Несмотря на распространенность РПА и их высокую эффективность, они обладают весьма существенным недостатком – большим энергопо-

треблением. Но вопросу энергетических затрат на процессы, протекающие в РПА, по настоящее время внимания уделялось недостаточно.

Большинство представленных в литературе подходов к определению мощности либо математически сложны, либо содержат значительное количество экспериментально определяемых параметров, зачастую требующих применения достаточно специализированных средств измерения входящих в них величин. Это делает затруднительным их использование при проведении инженерных расчетов [3]. В работе [4] автором предложена методика определения удельных затрат без значительного количества конструктивных и режимных параметров работы аппарата по заданным технической характеристикой значениям производительности и физико-механическим свойствам обрабатываемого материала – вязкостью и плотностью.

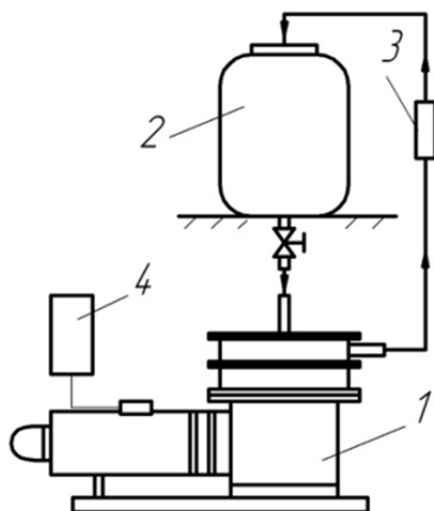
Во многих работах [5, 6, 7], в балансе энергетических затрат процессов, протекающих в РПА, включены затраты мощности на измельчение, но их относят к диссипативным потерям, а полезными считают затраты энергии на приведение материала в движение, создание напора, нагрев обрабатываемой среды. То есть РПА рассматривается главным образом как насос или нагнетатель. Процесс разрушения частиц дисперсной фазы в РПА весьма сложен, он может протекать в двух режимах: сдвиговом и кавитационном. Несмотря на то, что кавитация является фактором, значительно интенсифицирующим процесс диспергирования, для пищевой промышленности работа аппарата в таком режиме не может являться приемлемой из-за жестких требований к безопасности пищевых продуктов в отношении содержания металлических примесей. Поскольку при возникновении кавитационных явлений протекают процессы эрозийного разрушения рабочих органов [8], частицы материала рабочих органов попадают в конечный продукт. Исследователями отмечалось, что эффективная работа диспергатора возможна в режиме высоких сдвиговых деформаций [9] без кавитационных явлений. Для расчета оборудования для измельчения необходимо связывать затраты энергии с параметрами, характеризующими процесс измельчения, в первую очередь со степенью измельчения материала – главной количественной характеристикой процесса.

Целью исследования является изучение работы РПА с позиции распределения энергии, определение энергии, затраченной непосредственно на разрушение частиц дисперсной фазы в жидких дисперсных системах, содержащих пищевые волокна, изучение влияния параметров работы РПА на степень измельчения.

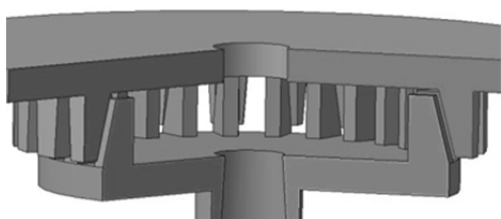
Объекты и методы исследований

Для исследования процессов измельчения дисперсных систем, содержащих в своем составе пищевые волокна, была спроектирована, изготовлена и смонтирована экспериментальная установка, принципиальная схема которой представлена на рис. 1. В состав установки входят: роторно-пульсационный аппарат, циркуляционная емкость, систе-

ма соединительных трубопроводов с запорной арматурой. На линии подачи продукта из РПА в циркуляционную емкость установлен ротаметр для контроля объемного расхода. Для пуска установки в работу и регулирования предназначен пульт управления, в состав которого входят: преобразователь напряжения, пусковая аппаратура, лабораторный автотрансформатор и измерительный комплект К-505 для измерения потребляемой установки мощности.



а



б

Рис. 1. Экспериментальная установка:
а – принципиальная схема установки: 1 – РПА,
2 – циркуляционная емкость,
3 – ротаметр, 4 – пульт управления;
б – рабочие органы аппарата

Исследование процесса измельчения проводили при обработке модельной смеси, представляющей собой дисперсную систему (суспензию), дисперсную фазу которой составляет мезга моркови со средним размером частиц 0,7 мм и массовой концентрацией 5 %. Зазор между ротором и статором при этом сохранялся постоянным и составлял 1 мм.

Полученной суспензией заполняли циркуляционный контур установки, необходимая частота вращения ротора устанавливалась при помощи лабораторного автотрансформатора. Отбор проб для микроскопического анализа размера частиц дисперсной фазы осуществляли при достижении требуемой кратности обработки.

Частота вращения вала электродвигателя определялась тахометром часового типа. Объемный

расход определяли при помощи поплавкового ротаметра LZM-20G производства компании Yuuao Kingtai Instrument Co. Ltd. Размер частиц мезги моркови определяли микроскопированием с использованием цифрового оптического микроскопа Bresser LCD и обработкой полученных микрофотографий с помощью программного обеспечения J Micro Vision v 1.27. Мощность, потребляемая аппаратом, определялась при помощи ваттметра, входящего в состав измерительного комплекта К-505.

Результаты и их обсуждение

Выделим основные виды энергозатрат в РПА. При обработке жидких дисперсных систем с твердой фазой в РПА полезно затрачиваемой энергией является работа на разрушение частиц дисперсной фазы, так как он является диспергатором по своему технологическому предназначению. Кроме того, значительная энергия затрачивается на перемещение обрабатываемой среды через аппарат и нагрев обрабатываемого материала.

Энергию, затрачиваемую на разрушение частиц дисперсной фазы в РПА W_p , Дж, можно представить в следующем виде

$$W_p = W_0 - (W_{\Pi} + W_K) - W_T, \quad (1)$$

где W_0 – полная энергия, Дж; W_{Π} – работа, затрачиваемая на создание напора, Дж; W_K – работа, затрачиваемая на сообщение потоку среды скорости, Дж; W_T – комплексные затраты энергии, выраженные нагревом среды, Дж.

Энергия, затрачиваемая на создание напора W_{Π} , Дж, определяется по формуле

$$W_{\Pi} = \Delta\Pi = (P_{\text{вых}} - P_{\text{вх}}) / \rho g, \quad (2)$$

где $\Delta\Pi$ – изменение потенциальной энергии потока среды; $P_{\text{вых}}$ – давление в выходном патрубке аппарата, м; $P_{\text{вх}}$ – давление во входном патрубке аппарата, м.

Энергия, затрачиваемая на сообщение потоку обрабатываемой среды скорости W_K , Дж, определяется по формуле

$$W_K = \Delta K = H_{sc} - H_{sp}, \quad (3)$$

где ΔK – изменение кинетической энергии потока среды; H_{sc} – скоростной напор в зоне между статором и корпусом аппарата, H_{sp} – скоростной напор в полости ротора.

Энергетические затраты на нагрев среды представим в следующем виде

$$W_T = c\rho V\Delta t, \quad (4)$$

где c – удельная теплоемкость среды, кДж/(кг·°С); ρ – плотность среды, кг/м³; Δt – изменение температуры среды при обработке, °С.

Коэффициент полезного действия процесса разрушения η , %, определяется по формуле

$$\eta = \frac{W_p}{W_o} \cdot 100\%. \quad (5)$$

Приняв, что потери в электродвигателе, приводном механизме и внутренние потери будут одинаковы как при работе аппарата под нагрузкой при обработке дисперсной системы, так и при работе аппарата, заполненного водой, не содержащей каких-либо частиц, затраты мощности на разрушение дисперсной фазы представим в следующем виде

$$W_p = W_{pp}^{об} - W_b^{об}, \quad (6)$$

где $W_{pp}^{об}$ – общие затраты энергии при обработке дисперсной системы, Дж; $W_b^{об}$ – общие затраты энергии при работе аппарата, заполненного водой, Дж.

В качестве параметра, характеризующего продолжительность воздействия РПА на обрабатываемый материал, целесообразно использовать кратность обработки, представляющую собой количество циклов, которое проходит объем материала через аппарат за определенный промежуток времени при заданной производительности и времени обработки. Кратность обработки K_o определяется следующим выражением:

$$K_o = \frac{Q\tau}{V_c}, \quad (7)$$

где Q – объемный расход обрабатываемого продукта через аппарат, m^3/c ; τ – время обработки, с; V_c – объем обрабатываемого продукта, m^3 .

Предварительные эксперименты показали, что экспериментальный РПА достигает кавитационного режима при 1800–1900 об/мин. В этой связи определение потребляемой мощности проводили при постоянной частоте вращения ротора аппарата $n = 1560$ об/мин. Снятие показаний ваттметра производили с интервалом 60 секунд. В дальнейшем показания времени были пересчитаны в кратность обработки в соответствии с формулой (7).

На рис. 2 представлены графики зависимости потребляемой аппаратом мощности при работе аппарата с водой, не содержащей посторонних включений – чистой жидкостью (кривая 2), с модельной смесью – суспензией с заданной концентрацией дисперсной фазы (кривая 1) и мощности, затрачиваемой на измельчение (кривая 3) в зависимости от кратности обработки при фиксированной частоте вращения ротора.

При работе аппарата с модельной смесью затраты мощности линейно убывают при кратности обработки в диапазоне от 0 до 100. При $K_o > 100$ затраты мощности остаются постоянными, при этом процесс измельчения частиц дисперсной фазы прекращается и дальнейшее увеличение степени измельчения возможно при увеличении частоты вращения ротора.

При работе аппарата с чистой водой стационарный режим работы аппарата достигается при кратности обработки более 40. Предположительно, чистая жидкость больше не поглощает внешнюю ме-

ханическую энергию, и ее механоактивация при установленных параметрах работы РПА завершена. В дальнейшем потребляемая мощность затрачивается только на создание напора и перемещение обрабатываемой среды через аппарат. На рис. 3 представлены графики зависимости температуры обрабатываемой среды в циркуляционной емкости в зависимости от кратности обработки.

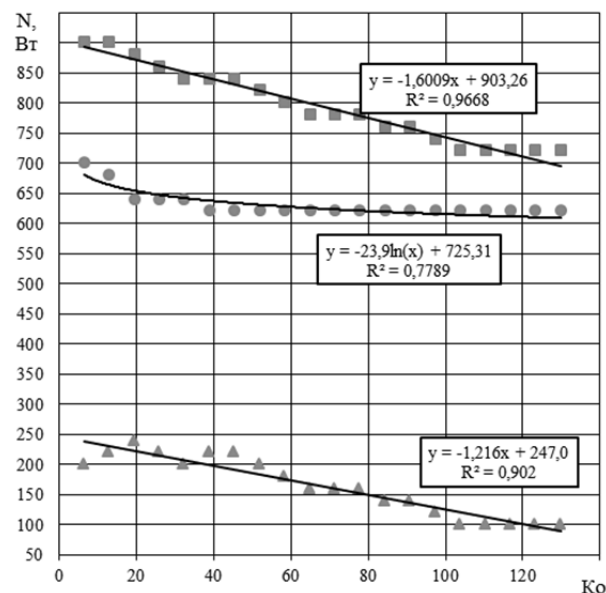


Рис. 2. Зависимость мощности, потребляемой РПА, от кратности обработки:

■, ●, ▲ – экспериментальные данные;
 — аппроксимация; ■ – затраты мощности при работе аппарата с модельной смесью; ● – затраты мощности при работе аппарата с водой; ▲ – затраты мощности на измельчение дисперсной фазы

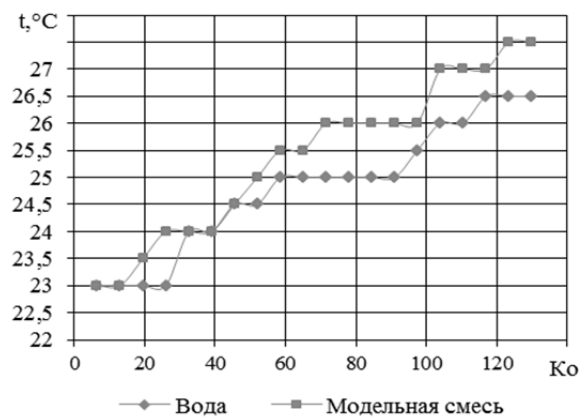


Рис. 3. Зависимость температуры обрабатываемой среды от кратности обработки

Из графиков на рис. 3 видно, что зависимость изменения температуры при работе с чистой водой и модельной смесью имеет одинаковый характер, что говорит о незначительном вкладе вязкости модельной смеси (при используемой массовой концентрации) на затраты энергии на процесс перемещения модельной смеси через аппарат. При обработке модельной смеси затрачиваемая мощность с увеличением кратности обработки снижается глав-

ным образом за счет уменьшения размеров частиц дисперсной фазы.

На рис. 4 представлена графическая зависимость КПД процесса диспергирования η , %, от кратности обработки модельной смеси в РПА.

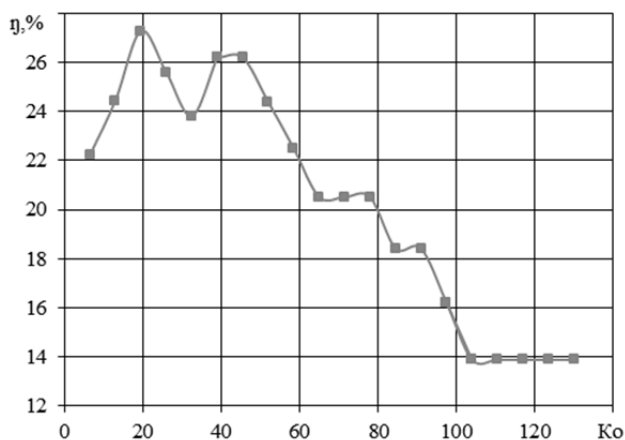


Рис. 4. Зависимость КПД процесса разрушения от кратности обработки модельной смеси в РПА

Анализ графика показывает, что до кратности 40 процесс протекает нестационарно, что может быть пояснено одновременностью механоактивации дисперсионной среды и диспергированием дисперсной фазы. В дальнейшем диспергирование продолжается, и одновременно формируется структура дисперсной системы на молекулярном уровне.

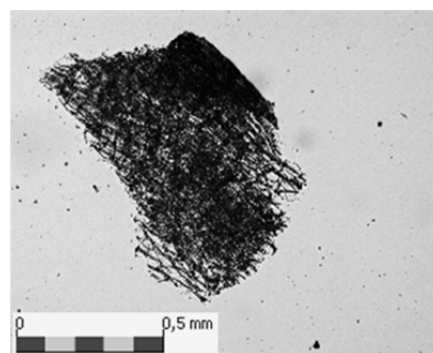
Главным технологическим параметром для оценки работы и расчета диспергаторов является степень измельчения i , представляющая собой отношение среднего характерного размера частиц до и после измельчения.

Для технологического расчета оборудования необходимо знать характер зависимости степени измельчения от продолжительности обработки.

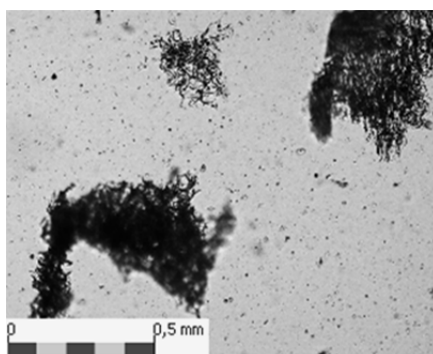
Определение размера частиц дисперсной фазы модельной смеси осуществляли с использованием программного обеспечения J Micro Vision 1.27. Частицы дисперсной фазы модельной жидкости представляют собой тонкие хлопья различной формы и длины, поэтому в качестве параметра, характеризующего размер частиц дисперсной фазы, использовался эквивалентный цилиндрический диаметр $d_{\text{экв}}$, мм, что позволит применять полученные данные при дальнейших технических расчетах.

Для проведения микрофотоирования проводили отбор проб исследуемой модельной смеси до обработки и при обработке с кратностью 32,5; 65; 130. Микрофотографии получали при увеличении в 40 раз. Размер микрофотографий – 3264 × 2448 пикселей, разрешение – 72 пикселя/дюйм. Для перехода к физическим единицам измерения осуществлялась калибровка с использованием объекта-микрометра.

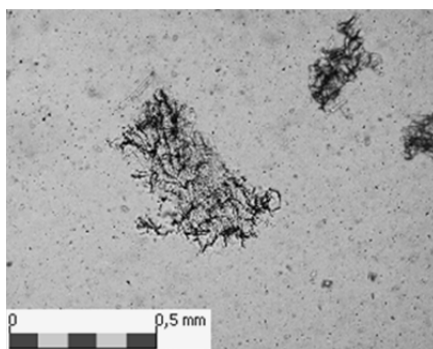
На рис. 5 представлены микрофотографии частиц дисперсной фазы модельной смеси при различной кратности обработки.



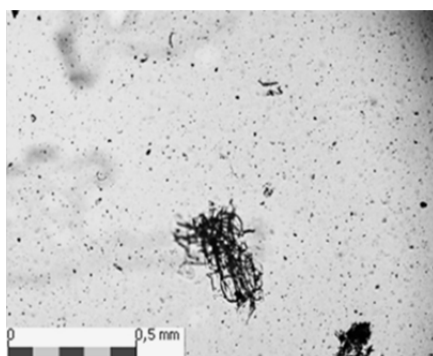
а



б



в



г

Рис. 5. Микрофотографии частиц дисперсной фазы при различной кратности обработки в РПА: а – до обработки; б – Ко = 32,5; в – Ко = 65; г – Ко = 130

В результате обработки данных анализа микрофотографий в среде MS Excel были построены гистограммы распределения частиц дисперсной фазы по размерам, представленные на рис. 6.

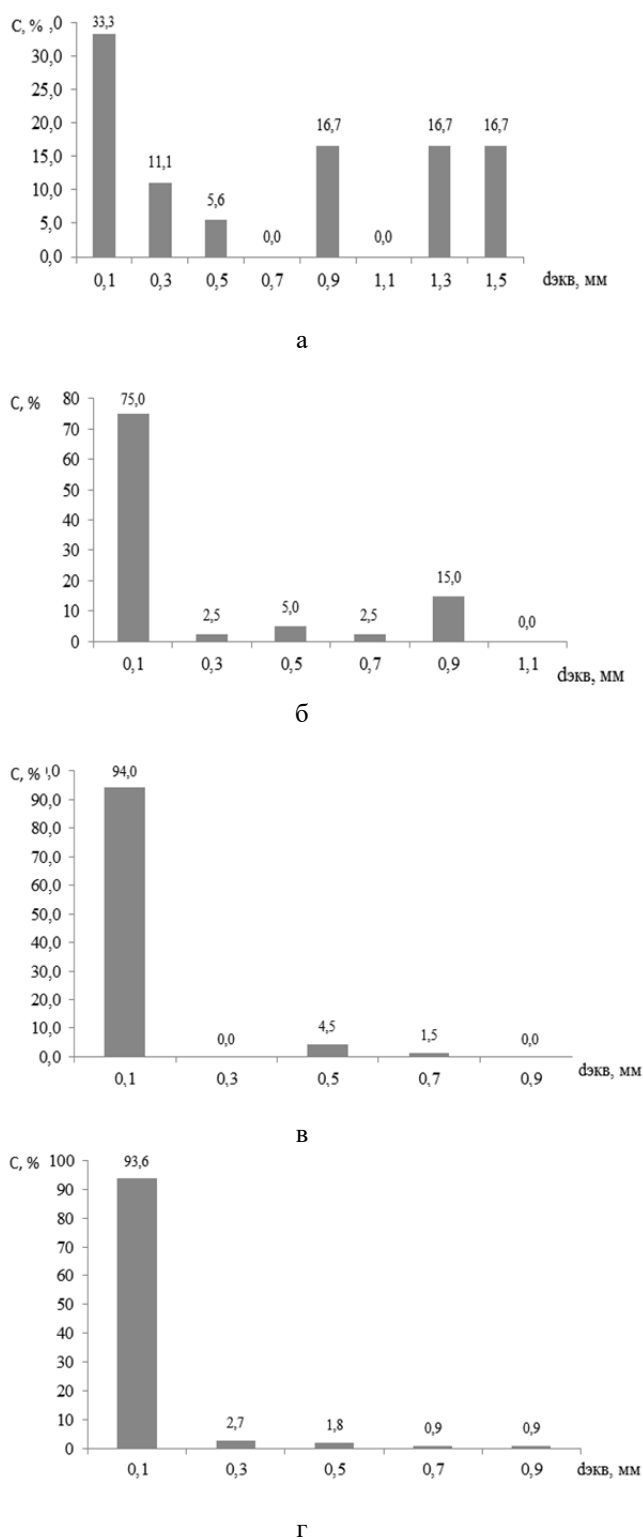


Рис. 6. Гистограммы дисперсной фазы при разной кратности обработки K_0 :

а – до обработки; б – $K_0 = 32,5$; в – $K_0 = 65$; г – $K_0 = 130$

Модельная смесь до обработки в РПА представляет собой полидисперсную систему, в которой присутствует 33,4 % частиц с размером более 1,00 мм. Средний размер частиц составляет 0,71 мм. После 32,5 циклов обработки содержание частиц с размером до 0,10 мм увеличивается приблизительно в два раза и составляет 75 %, средний размер частиц

дисперсной фазы составляет 0,26 мм, степень измельчения – 2,70. После 65 циклов обработки модельная смесь становится более гомогенной, содержание частиц размером до 0,10 мм составляет 94 %, средний размер частиц – 0,13 мм, степень измельчения – 5,46. После 130 циклов средний размер частиц дисперсной фазы составляет 0,12 мм, степень измельчения – 5,90.

В диапазоне изменения кратности обработки с 65 до 130 не происходит значительного повышения гомогенности модельной смеси и уменьшения среднего размера частиц, и, учитывая результаты определения мощности затрачиваемой на измельчение, рационально прекратить процесс измельчения при $K_0 = 100$, поскольку в дальнейшем процесс измельчения частиц дисперсной фазы не протекает, о чем говорит прямой участок на кривой 3 (рис. 2). Дальнейшего увеличения степени измельчения возможно достичь за счет увеличения градиента скоростей, которое достигается главным образом увеличением частоты вращения ротора.

Для определения рациональных режимов работы роторных диспергаторов необходимо иметь представление об удельных затратах энергии, затрачиваемой на измельчение единичного объема обрабатываемой дисперсной системы, в зависимости от степени измельчения и кратности обработки.

Энергоемкость процесса диспергирования \mathcal{E} , кВт · ч / кг, с учетом степени измельчения i определяют по формуле [10]

$$\mathcal{E} = \frac{N_{\partial}}{Q \cdot i}, \quad (8)$$

где N_{∂} – затраты мощности на диспергирование, Вт; Q – производительность диспергатора, кг/ч.

В то же время полезная мощность затрачивается не только на измельчение дисперсной фазы, но и на изменение физико-механических свойств обрабатываемого продукта и структурообразование устойчивой дисперсной системы.

Выразив производительность РПА из формулы (7) и приняв, что $N_{\partial} = W_p = W_{np}^{об} - W_b^{об}$, представим интегральные затраты энергии на диспергирование и образование устойчивой дисперсной системы N_u , кВт · ч/м³ следующим образом:

$$N_u = \frac{(W_{np}^{об} - W_b^{об}) \cdot \tau}{K_0 \cdot V_C \cdot i}. \quad (9)$$

После проведения расчета по формуле (9) для известных значений кратности обработки и соответствующей ей степени измельчения получено следующее аппроксимирующее выражение: $y = 1809,3x^{-1,064}$, с величиной достоверности $R^2 = 0,98$.

На рис. 7 представлена зависимость интегральных затрат энергии на диспергирование и формирование дисперсной системы от кратности обработки.

Наиболее эффективно процесс диспергирования протекает до определенного значения кратности

обработки, после которого дальнейшее увеличение времени работы аппарата при данной частоте вращения ротора не приводит к значительному приросту степени измельчения, поскольку количество полезно затрачиваемой мощности снижается, и процесс диспергирования практически прекращается.

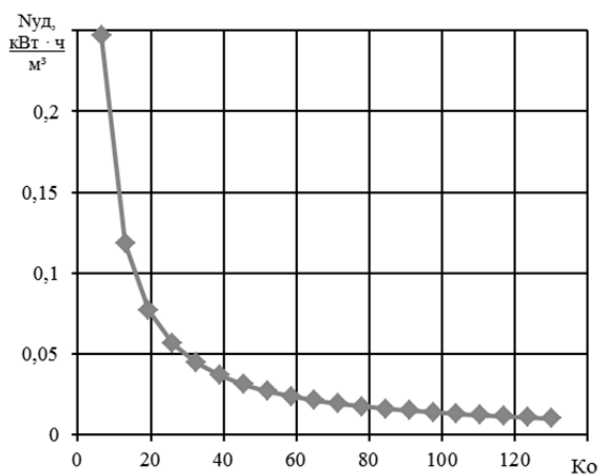


Рис. 7. Зависимость интегральных затрат энергии на диспергирование в РПА от кратности обработки

По результатам проведенных экспериментов и их анализа можно сделать следующие выводы:

- предлагаемый подход к определению удельных энергозатрат связывает затраты полезной мощности на диспергирование с характеристиками процесса – кратностью обработки и степенью измельчения;
- с целью сокращения непроизводительных затрат энергии на диспергирование гетерогенных систем рациональным будет проведение процесса в несколько этапов при различной частоте вращения ротора, необходимо для каждого материала определять время (либо кратность обработки), при котором процесс становится неэффективным по предложенной авторами методике;
- проведенные эксперименты показали, что в промышленных установках целесообразно использовать насосы, компенсирующие затраты энергии РПА на создание скоростного напора, что повысит эффективность РПА как диспергатора;
- предлагаемый подход к определению затрат мощности на измельчение частиц дисперсной фазы включает в себя параметры, легко доступные для непосредственного измерения и не требует применения специализированных средств и методов измерения физических величин.

Список литературы

1. Попов, А.М. О селективном измельчении, селективности измельчения и селективной функции / А.М. Попов, С.Д. Руднев, О.Е. Рыбина // Известия высших учебных заведений. Пищевая технология. – 2006. – № 5. – С. 42–44.
2. Руднев, С.Д. Интенсификация и повышение качества селективной дезинтеграции адгезионным разупрочнением растительной ткани / С.Д. Руднев, Е.Ф. Вайман, А.И. Яремчук // Техника и технология пищевых производств. – 2010. – № 2 (17). – С. 50–55.
3. Промтов, М.А. Методы расчета характеристик роторного импульсного аппарата: монография / М.А. Промтов, А.Ю. Степанов, А.В. Алешин. – Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2015. – 148 с.
4. Червяков, В.М. Гидродинамические и кавитационные явления в роторных аппаратах: монография / В.М. Червяков, В.Ф. Юдаев. – М.: Машиностроение-1, 2007. – 128 с.
5. Фесенко, А.В. Анализ энергетических характеристик роторных аппаратов для гидродинамической активации жидкостей / А.В. Фесенко // Вісник НТУ «ХПИ». – 2015. – № 4 (1113). – С. 190–193.
6. Фесенко, А.В. Особенности обработки жидкостей в роторных активаторах / А.В. Фесенко, Ю.Н. Любимый, М.И. Гасанов // Вісник НТУ «ХПИ». – 2012. – № 53 (959). – С. 19–30.
7. Иванец, В.Н. Интенсификация процессов гомогенизации и диспергирования при получении сухих, увлажненных и жидких комбинированных продуктов / В.Н. Иванец, И.А. Бакин, Г.Е. Иванец // Техника и технология пищевых производств. – 2012. – № 3 (26). – С. 34–45.
8. Волков, В.А. Эффективность современного оборудования для производства зерновой патоки / В.А. Волков // Мир науки, культуры, образования. – 2013. – № 1 (38). – С. 351–354.
9. Scheibe, W. Formation and dispersion of agglomerates during dry fine grindings / W. Scheibe // ZKG International. – 1991. – no. 2. – Pp. 57–62.
10. Определение удельного расхода энергии на процесс дробления [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kalxoz.ru/str/12drobilki2.htm>. (дата обращения: 28.11.2016).

References

1. Popov A.M., Rudnev S.D., Rybina O.E. O selektivnom izmel'chenii, selektivnosti izmel'cheniya i selektivnoy funktsii [On the selective milling, grinding and selective selectivity function]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Pishchevaya tekhnologiya* [News institutes of higher Education. Food technology], 2006, no. 5, pp. 42–44.
2. Rudnev S.D., Vayman E.F., Yaremchuk A.I. Intensifikatsiya i povyshenie kachestva selektivnoy de-zintegratsii adgezionnym razuprochneniem rastitel'noy tkani [Intensification and quality improvement of selective disintegration with adhesive softening of plant tissue]. *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2010, vol. 17, no. 2, pp. 50–55.
3. Promtov M.A., Stepanov A.Yu., Aleshin A.V. *Metody rascheta kharakteristik rotornogo impul'snogo apparata* [Methods for calculating the rotary pulse machine]. Tambov: TGTU Publ., 2015. 148 p.
4. Chervyakov V.M., Yudaev V.F. *Gidrodinamicheskie i kavitatsionnye yavleniya v rotornykh apparatakh* [Hydrodynamic cavitation phenomena and in rotary machines]. Moscow: Mashinostroenie-1 Publ., 2007. 128 p.

5. Fesenko A.V. Analiz energeticheskikh kharakteristik rotornykh apparatov dlya gidrodinamicheskoy aktivatsii zhidkostey [Analysis of energy characteristics of rotary devices for hydrodynamic activation of liquids]. *Visnik NTU «KhPI»* [The Bulletin of NTU «KhPI»], 2015, no. 4, pp. 190–193.
6. Fesenko A.V., Lyubimyy Yu.N., Gasanov M.I. Osobennosti obrabotki zhidkostey v rotornykh akti-vatorakh [Features in rotary fluid handling activators]. *Visnik NTU «KhPI»* [The Bulletin of NTU «KhPI»], 2012, no. 53, pp. 19–30.
7. Ivanets V.N., Bakin I.A., Ivanets G.E. Intensifikatsiya protsessov gomogenizatsii i dispergirovaniya pri poluchenii sukhikh, uvlazhnennykh i zhidkikh kombinirovannykh produktov [Intensification of homogenization and dispersion processes when obtaining dry, moistened and liquid composite foodstuffs] *Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv* [Food Processing: Techniques and Technology], 2012, vol. 26, no. 3, pp. 34–45.
8. Volkov V.A. Effektivnost' sovremenogo oborudovaniya dlya proizvodstva zernovoy patoki [Effectiveness of modern equipment for grain molasses]. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya* [The world of science, culture and education], 2013, vol. 38, no.1, pp. 351–354.
9. Scheibe W. Formation and dispersion of agglomerates during dry fine grindings. *ZKG International.*, 1991, no. 2, pp. 57–62.
10. *Opredelenie udel'nogo raskhoda energii na protsess drobleniya* [Determination of specific energy consumption in the process of crushing]. Available at: <http://kalxoz.ru/str/12drobilki2.htm>. (accessed 28 November 2016).

Дополнительная информация / Additional Information

Руднев, С.Д. Анализ работы и исследование энергетических характеристик роторного диспергатора / С.Д. Руднев, М.А. Козлов, Р.В. Крюк // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 44. – № 1. – С. 73–80.

Rudnev S.D., Kozlov M.A., Kryuk R.V. Analysis of operation and research of the energy characteristics rotary disperser. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 44, no. 1, pp. 73–80 (In Russ.).

Руднев Сергей Дмитриевич

д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

Козлов Марк Андреевич

аспирант кафедры машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47, e-mail: m1tt@mail.ru

Крюк Роман Владимирович

магистрант кафедры машин и аппаратов пищевых производств, ФГБОУ ВО «Кемеровский технологический институт пищевой промышленности (университет)», 650056, Россия, г. Кемерово, б-р Строителей, 47

Sergey D. Rudnev

Dr.Sci.(Eng.), Associate Professor of the Department of machines and apparatus for food production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

Mark A. Kozlov

Postgraduate Student of the Department of machines and apparatus for food production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia, e-mail: m1tt@mail.ru

Roman V. Kryuk

Master student of the Department of machines and apparatus of food production, Kemerovo Institute of Food Science and Technology (University), 47, Boulevard Stroiteley, Kemerovo, 650056, Russia

