

<https://doi.org/10.33380/2305-2066-2020-9-4-53-58>
УДК 66.099.2



Оригинальная статья/Research article

Анализ процесса измельчения в виброкавитационном гомогенизаторе

Е. В. Флисюк¹, С. С. Белокуров¹, И. А. Наркевич¹, О. М. Флисюк², Д. Ю. Ивкин^{1*}

1 – ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный химико-фармацевтический университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации (ФГБОУ ВО СПХФУ Минздрава России), 197376, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Проф. Попова, д. 14, лит. А
2 – Санкт-Петербургский государственный техноинститут (технический университет) (СПбГТИ (ТУ)), 190013, Россия, г. Санкт-Петербург, Московский проспект, д. 26

*Контактное лицо: Ивкин Дмитрий Юрьевич. E-mail: dmitry.ivkin@pharminnotech.com

ORCID: Е. В. Флисюк – <https://orcid.org/0000-0001-8077-2462>; С. С. Белокуров – <https://orcid.org/0000-0002-9425-2668>; И. А. Наркевич – <https://orcid.org/0000-0002-5483-6626>;
О. М. Флисюк – <https://orcid.org/0000-0003-0527-8725>; Д. Ю. Ивкин – <http://orcid.org/0000-0001-9273-6864>.

Статья поступила: 21.07.2020. Статья принята в печать: 15.09.2020. Статья опубликована: 24.11.2020

Резюме

Введение. Виброкавитационные гомогенизаторы находят все большее применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в фармацевтической – для приготовления кремов, гелей для придания им однородного состава, а в последнее время и для экстрагирования ценных веществ из материалов растительного происхождения. Как было показано нами ранее, сравнение экстрагирования диосцина из семян пажитника сенного, проведенного в аппаратах различных конструкций, при одинаковых условиях организации процесса показало, что наиболее эффективным способом оказался способ экстрагирования в виброкавитационном поле. Очевидно, это связано с тем, что кавитация снижает диффузионное сопротивление процесса и таким образом повышает интенсивность процесса переноса массы вещества из твердой фазы в раствор. Однако процесс экстрагирования в аппаратах такого типа является сложным и сопровождается измельчением семян, что приводит к изменению дисперсного состава твердой фазы. В более ранних работах на примере извлечения диосцина из семян пажитника сенного показано, что повышение частоты вращения ротора увеличивает выход БАВ. Однако тонкое измельчение сырья часто приводит к образованию слоя осадка, загрязняющего раствор балластными веществами и затрудняющего его очистку, а также снижает выход БАВ, поэтому изучение этого процесса является необходимым для регулирования дисперсного состава, чтобы обеспечить наибольшую эффективность экстрагирования в аппаратах такого типа.

Цель. Провести теоретический и экспериментальный анализ процесса измельчения частиц семян пажитника сенного в виброкавитационном гомогенизаторе, сопровождающимся экстрагированием БАВ, а также получить зависимости, позволяющие оценить вклад измельчения при формировании дисперсного состава шрота в данном аппарате и определить средний размер частиц в результате дробления.

Материалы и методы. Первым этапом исследования стал теоретический анализ процесса измельчения, так как он является частным случаем большого класса процессов, в которых дисперсный состав твердой фазы непостоянен. Поэтому в данной работе для математического описания измельчения частиц использована модель, учитывающая кинетические особенности рассматриваемого процесса. Экспериментальное изучение извлечения ценных компонентов из растительного сырья проводилось на лабораторной установке с виброкавитационным гомогенизатором периодического действия. В качестве сырья были использованы семена пажитника сенного, приобретенные в фирме ООО «Стоинг» г. Москва (Россия). Товароведческий анализ показал соответствие сырья требованиям ГФ XIV издания. Исходный водный раствор этанола (объемной концентрацией 60 %) с семенами пажитника сенного загружался в стакан 6, в объеме 0,2 литра, затем ротор аппарата приводился во вращение и выводился на заданную частоту вращения. Опыты проводились в виброкавитационном гомогенизаторе, который представляет лабораторный образец аппарата, изготовленного в СПбГТИ(ТУ), состоящий из статора и ротора, вращающегося при частоте вращения – 1000, 3000 и 5000 об/мин (16,7; 50 и 83,3) 1/с. При каждом значении частоты вращения ротора время процесса варьировалось в диапазоне от 0 до 50 минут, причем процесс вели в течение 60, 120, 180, 240 и 300 секунд. Исследования проведенные в течение 5 минут и более показали, что дисперсный состав шрота практически не изменяется во времени, но существенно зависит от частоты вращения ротора. Таким образом, после 5 минут наступает некая стабилизация дисперсного состава и дальнейшее пребывание материала в аппарате не приводит к заметному изменению дисперсного состава. После каждого опыта шрот отбирали, высушивали и проводили ситовой анализ дисперсного состава.

Результаты и обсуждение. По результатам, полученным при обработке экспериментальных данных по уравнению, были рассчитаны значения средней вероятности измельчения частиц и, как оказалось, она практически не зависит от времени, а зависит только от частоты вращения ротора. Была получена зависимость изменения средней вероятности измельчения частиц при различной частоте вращения ротора. Анализ этих результатов показал, что величина средней вероятности измельчения частиц в кавитационном гомогенизаторе увеличивается с повышением частоты вращения ротора, что вполне ожидаемо, так как возрастает частота контактов частиц с рабочими органами аппарата. Кроме того, полученная зависимость для средней вероятности измельчения частиц имеет линейный характер. Данное выражение достаточно точно описывает значения изменения во времени относительной массы частиц в рабочем диапазоне $n = 16,7 - 83,3$ 1/с. С учетом этих значений экспериментальные и расчетные результаты имеют хорошее совпадение.

Заключение. Предложенный подход и полученные результаты могут быть использованы для оценки дисперсного состава частиц, получаемых и в других конструкциях аппаратов подобного действия.

Ключевые слова: гомогенизатор, ротор, статор, виброкавитация, измельчение, средняя масса, частицы, частота вращения, пажитник сенной.

Конфликт интересов: конфликта интересов нет.

Вклад авторов. Авторы Е. В. Флисюк, С. С. Белокуров, И. А. Наркевич, О. М. Флисюк и Д. Ю. Ивкин придумали и разработали эксперимент. С. С. Белокуров провел эксперименты по измельчению семян пажитника сенного в виброкавитационном гомогенизаторе. Авторы С. С. Белокуров и Е. В. Флисюк и О. М. Флисюк участвовали в обработке данных. Все авторы участвовали в написании текста статьи и в обсуждении результатов.

Для цитирования: Флисюк Е. В., Белокуров С. С., Наркевич И. А., Флисюк О. М., Ивкин Д. Ю. Анализ процесса измельчения в виброкавитационном гомогенизаторе. *Разработка и регистрация лекарственных средств.* 2020;9(4):15–20. <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2020-9-4-53-58>

© Флисюк Е. В., Белокуров С. С., Наркевич И. А., Флисюк О. М., Ивкин Д. Ю., 2020

© Flisyuk E. V., Belokurov S. S., Narkevich I. A., Flisyuk O. M., Ivkin D. Yu., 2020

The Analysis of Process of Crushing in the Vibrocavitational Homogenizer

Elena V. Flisyuk¹, Sergey S. Belokurov¹, Igor A. Narkevich¹, Oleg M. Flisyuk², Dmitry Yu. Ivkin^{1*}

1 – Saint-Petersburg State Chemical-Pharmaceutical University, 14A, Prof. Popov str., Saint-Petersburg, 197376, Russia

2 – Saint-Petersburg State Institute of Technology (Technical University), 26, Moskovsky Prospect, Saint-Petersburg, 190013, Russia

*Corresponding author: Dmitry Y. Ivkin. E-mail: dmitry.ivkin@pharminnotech.com

ORCID: Elena V. Flisyuk – <https://orcid.org/0000-0001-8077-2462>; Sergey S. Belokurov – <https://orcid.org/0000-0002-9425-2668>; Igor A. Narkevich – <https://orcid.org/0000-0002-5483-6626>; Oleg M. Flisyuk – <https://orcid.org/0000-0003-0527-8725>; Dmitry Yu. Ivkin – <http://orcid.org/0000-0001-9273-6864>.

Received: 21.07.2020. Revised: 15.09.2020. Published: 24.11.2020

Abstract

Introduction. Vibration cavitation homogenizers are increasingly used in various industries, including the pharmaceutical industry – for the preparation of creams, gels to give them a homogeneous composition, and more recently for the extraction of valuable substances from plant materials. As we have shown earlier, a comparison of the extraction of dioscin from fenugreek seeds, carried out in devices of various designs, under the same conditions for organizing the process showed that the most effective method was the extraction method in a vibro-cavitation field. Obviously, this is due to the fact that cavitation reduces the diffusion resistance of the process and, thus, increases the intensity of the process of transferring the mass of a substance from the solid phase to the solution. However, the extraction process in apparatus of this type is complex and is accompanied by crushing of seeds, which leads to a change in the dispersed composition of the solid phase.

Aim. Conduct a theoretical and experimental analysis of the process of grinding fenugreek seeds particles in a vibrocavitation homogenizer, accompanied by the extraction of biologically active substances, as well as obtaining dependences that allow evaluating the contribution of grinding to the formation of the dispersed composition of the meal in this apparatus and determining the average particle size as a result of crushing. In earlier works, using the example of the extraction of dioscin from fenugreek seeds, it was shown that an increase in the rotor speed increases the yield of biologically active substances. However, fine grinding of raw materials often leads to the formation of a sediment layer that pollutes the solution with ballast substances and complicates its purification, and also reduces the yield of biologically active substances, therefore, the study of this process is necessary to control the dispersed composition in order to ensure the highest extraction efficiency in devices of this type.

Materials and methods. The first stage of the study was the theoretical analysis of the grinding process, since it is a special case of a large class of processes in which the dispersed composition of the solid phase is not constant. Therefore, in this work, for the mathematical description of particle grinding, a model is used that takes into account the kinetic features of the process under consideration. An experimental study of the extraction of valuable components from plant raw materials was carried out in a laboratory setup with a vibro-cavitation homogenizer of periodic action. As a raw material, we used fenugreek seeds purchased from LLC «Stoing», Moscow (Russia), which we used for research. Commodity analysis showed the compliance of raw materials with the requirements of the GF XIV edition. The initial, aqueous solution of ethanol (volume concentration 60 %) with fenugreek seeds was loaded into glass 6, in a volume of 0.2 liters, then the rotor of the apparatus was brought into rotation and brought to a given rotation frequency. The experiments were carried out at a rotation frequency of 1000, 3000 and 5000 rpm (16.7; 50 and 83.3) 1/s. At each value of the rotor speed, the process time varied in the range from 0 to 50 minutes, and the process was carried out for 60, 120, 180, 240 and 300 seconds. Studies carried out for 5 minutes or more showed that the dispersed composition of the meal practically does not change over time, but significantly depends on the rotor speed. Thus, after 5 minutes, a certain stabilization of the dispersed composition occurs and further residence of the material in the apparatus does not lead to a noticeable change in the dispersed composition. After each experiment, the meal was taken, dried, and sieve analysis of the dispersed composition was carried out.

Results and discussion. Based on the results obtained by processing the experimental data according to the equation, the values of the average probability of particle crushing were calculated and, as it turned out, it practically does not depend on time, but depends only on the rotor speed. The dependence of the change in the average probability of particle grinding at different rotor speed was obtained. The analysis of these results showed that the value of the average probability of particle grinding in the cavitation homogenizer increases with an increase in the rotor speed, which is quite expected, since the frequency of contacts of particles with the working organs of the apparatus increases. In addition, the obtained dependence for the average probability of particle crushing is linear. This Expression quite accurately describes the values of the change in time of the relative mass of particles in the working range $n = 16.7 - 83.3$ 1/s. Taking these values into account, the experimental and calculated results are in good agreement.

Conclusions. The proposed approach and the results obtained can be used to assess the dispersed composition of particles obtained in other designs of devices of similar action.

Keywords: homogenizer, rotor, stator, vibrocavitation, crushing, average weight, particles, rotation frequency, fenugreek.

Conflict of interest: no conflict of interest.

Contribution of the authors. Authors Elena V. Flisyuk, Sergey S. Belokurov, Igor A. Narkevich, Oleg M. Flisyuk and Dmitry Yu. Ivkin invented and developed an experiment. Sergey S. Belokurov conducted experiments on grinding fenugreek seeds in a vibro-cavitation homogenizer. Authors Sergey S. Belokurov and Elena V. Flisyuk and Oleg M. Flisyuk participated in data processing. All authors participated in writing the text of the article and in the discussion of the results.

For citation: Flisyuk E. V., Belokurov S. S., Narkevich I. A., Flisyuk O. M., Ivkin D. Yu. The analysis of process of crushing in the vibrocavitation homogenizer. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv = Drug development & registration*. 2020;9(4):15–20. (In Russ.). <https://doi.org/10.33380/2305-2066-2020-9-4-53-58>

ОБОЗНАЧЕНИЯ

t – время, с; m – масса частицы, кг; $F(x, t)$ – плотность функции распределения частиц по x в единице объема аппарата, 1/кг; n – частота вращения ротора, 1/с; N – число частиц в аппарате; N_0 – число исходных частиц, загружаемых в аппарат; $g(m, n; t-s, s)$ – плотность вероятности дробления частицы массой m на два осколка $t-s$ и s за единицу времени в

единице объема аппарата, 1/(кг · с); $\theta(m, t, n)$ – вероятность дробления частицы массой m на два осколка $t-s$ и s за единицу времени в единице объема аппарата, 1/с; \bar{m}_0 – средняя масса начальной частицы, кг.

ИНДЕКСЫ

0 – начальный.

ВВЕДЕНИЕ

Виброкавитационные гомогенизаторы находят все большее применение в различных отраслях промышленности, в том числе и в фармацевтической – для приготовления кремов, гелей для придания им однородного состава, а в последнее время и для экстрагирования ценных веществ из материалов растительного происхождения. Как было показано нами ранее [1], сравнение экстрагирования диосцина из семян пажитника сенного, проведенного в аппаратах различных конструкций, при одинаковых условиях организации процесса показало, что наиболее эффективным способом оказался способ экстрагирования в виброкавитационном поле. Очевидно, это связано с тем, что кавитация снижает диффузионное сопротивление процесса и таким образом повышает интенсивность процесса переноса массы вещества из твердой фазы в раствор. Однако процесс экстрагирования в аппаратах такого типа является сложным и сопровождается измельчением семян, что приводит к изменению дисперсного состава твердой фазы.

Как показали предварительные эксперименты, проведенные в виброкавитационном гомогенизаторе [2], в начале процесса интенсивность измельчения частиц наиболее высока при различной частоте вращения ротора, а с течением времени замедляется и дисперсный состав стабилизируется, причем при более высокой частоте вращения быстрее [3]. Таким образом, с течением времени наступает некоторая стабилизация дисперсного состава твердой фазы при постоянстве основных параметров процесса. Измельчение увеличивает поверхность массообмена, что существенно интенсифицирует процесс экстрагирования. В работе [3] было показано на примере извлечения диосцина из семян пажитника сенного, что повышение частоты вращения ротора увеличивает выход БАВ. Однако тонкое измельчение сырья часто приводит к образованию слоя осадка, загрязняющего раствор балластными веществами и затрудняющего его очистку, а также снижает выход БАВ, поэтому изучение этого процесса является необходимым для регулирования дисперсного состава, чтобы обеспечить наибольшую эффективность экстрагирования в аппаратах такого типа.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретический анализ

В виброкавитационном гомогенизаторе измельчение происходит в результате попадания частиц в зазор между ротором и статором. Учитывая, что величина этого зазора мала, то частицы, попадающие в него, подвергаются механическому воздействию быстро вращающегося ротора и срезаются кромками его отверстий. Таким образом, измельчение частиц в таком аппарате происходит прежде всего за

счет среза частиц в зазоре между ротором и статором. Очевидно, частица под срезающим воздействием ротора разрушается на две, в общем случае, неравные части и сам процесс попадания частиц в зазор и срез носят случайный характер. Существующие модели измельчения частиц, сопровождающего технологические процессы, исходя из стохастических представлений об этом явлении, что позволяет использовать вероятностную теорию марковских процессов [4–9]. Общим недостатком таких моделей можно считать формальный учет кинетики измельчения, который оставляет без внимания физический механизм этого явления. Между тем измельчение является частным случаем большого класса процессов, в которых дисперсный состав твердой фазы непостоянен. В данной работе для математического описания измельчения частиц использована модель, учитывающая кинетические особенности рассматриваемого процесса.

Пусть $\gamma(m, n)$ – вероятность попадания частицы объемом (массой) m в отверстие ротора за единицу времени в объеме аппарата при некоторой частоте вращения ротора n , а εd – вероятность измельчения частицы массой m на два неравных осколка – $(m - s)$ и s при попадании в зазор между ротором и статором аппарата. Тогда рассуждая аналогично [10, 11] можно записать вероятность измельчения частицы, массой (объемом) m в форме:

$$g(m, n; m - s, s) = \gamma(m, n) \varepsilon d(m; m - s, s). \quad (1)$$

При этом все ранее полученные уравнения в работе [4] остаются в силе.

Так как в кавитационном гомогенизаторе происходит интенсивное перемешивание материала, то можем его рассматривать как аппарат периодического действия идеального смешения. В этом случае уравнение, описывающее кинетику измельчения частиц, примет вид:

$$\frac{\partial F(m, t)}{\partial t} + F(m, t) \frac{1}{2} \int_0^m g(t, m, n; m - s, s) ds = \int_m^\infty g(t, s, n; s - m) F(s, t) ds. \quad (2)$$

Здесь первое слагаемое в левой части характеризует изменение функции распределения частиц по массе во времени, второе слагаемое характеризует изменение функции распределения, связанное с измельчением частиц, причем множитель $\frac{1}{2}$ свидетельствует о принятом допущении, что в результате элементарного акта взаимодействия частицы с массой m , попавшей в зазор между ротором и статором аппарата, образуются две частицы с меньшей массой $m - s$ и s . Правая часть характеризует изменение функции распределения частиц по массе, связанное с измельчением крупных частиц, с образованием частиц массой m . При этом $g(t, s, n; s - m)$ представляет со-

бой ядро интегрального преобразования, физический смысл которого в том, что оно характеризует кинетику измельчения частиц.

Обозначив,

$$\frac{1}{2} \int_0^m g(t, m, n; m-s, s) ds = \theta(m, t, n),$$

уравнение (2) можно записать в виде:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \theta(m, t, n)F = \int_m^\infty g(t, s, n; s-m)F(s, t) ds. \quad (3)$$

Учитывая, что $F(m, t) = N(t) \varphi(m, t)$, где $N(0) = N_0$ – число исходных частиц в аппарате в начальный момент, а $\int_0^\infty \varphi(m, t) dm = 1$.

Из этого уравнения следует

$$\frac{\partial N}{\partial t} - \langle \theta \rangle(m, t, n)N = 0, \quad (4)$$

где $\langle \theta \rangle(m, t, n) = \int_0^\infty \theta(m, t, n) \varphi(m, t) dm$, т. е. $\langle \theta \rangle(m, t, n)$

представляет собой некую среднюю вероятность дробления частиц массой m .

С учетом симметрии

$$g(t, m, n; m-s, s) = g(t, m, n; s, m-s).$$

Если левую и правую части уравнения (1) умножить на mdm и проинтегрировать в пределах от 0 до ∞ , то получим, что

$$\frac{d}{dt}(\bar{m}N) = 0,$$

откуда следует формула:

$$\bar{m}N(t) = \bar{m}_0 N_0, \quad (5)$$

выражающая закон сохранения массы вещества.

Из выражений (4) и (5) следует, что

$$\frac{d\xi}{dt} + \langle \theta \rangle(m, t, n)\xi = 0, \quad (6)$$

где $\xi = \frac{N_0}{N} = \frac{\bar{m}}{\bar{m}_0}$ при $t=0$ $\xi = 1$, $\xi(t, n) \leq 1$.

Интегрирование уравнения (6) в соответствующих пределах дает выражение:

$$\xi = e^{-\langle \theta \rangle t}. \quad (7)$$

Выражение (7) позволяет экспериментальным путем по изменению среднего объема (массы) частицы определить величину средней вероятности измельчения частиц $\langle \theta \rangle(m, t, n)$ при $t > 0$.

При переходе от средней массы частицы к ее среднему размеру (диаметру) для оценки дисперсного состава частиц удобно пользоваться формулой:

$$\bar{d} = \bar{d}_0 \sqrt[3]{\xi}. \quad (8)$$

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ

Экспериментальные исследования процесса измельчения с целью определения функции $\langle \theta \rangle(m, t, n)$ проводили в виброкавитационном гомогенизаторе, схема которого представлена на рисунке 1.

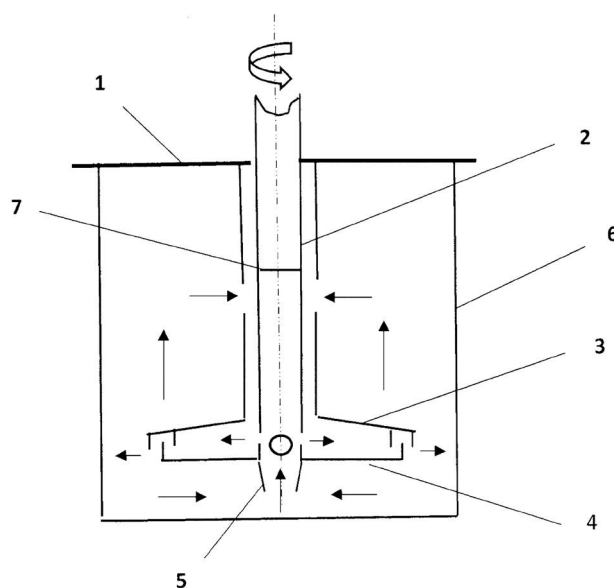


Рисунок 1. Схема виброкавитационного гомогенизатора:

1 – крышка; 2 – втулка; 3 – статор; 4 – ротор; 5 – нижняя втулка; 6 – стакан; 7 – заглушка

Figure 1. Scheme of a vibro-cavitation homogenizer:

1 – cover; 2 – sleeve; 3 – stator; 4 – rotor; 5 – lower sleeve; 6 – glass; 7 – plug

Основными рабочими органами аппарата являются ротор 4 и статор 3. Зазор между ротором и статором составляет всего 0,25 мм. Ротор 3 гранулятора приводится в движение асинхронным электродвигателем, а частота вращения ротора регулировалась с помощью преобразователя частоты. Исходный водный раствор этанола с семенами пажитника сенного загружался в стакан 6, в объеме 0,2 литра, затем ротор аппарата приводился во вращение и выводился на заданную частоту вращения. Опыты проводились при частоте вращения – 1000, 3000 и 5000 об/мин (16,7; 50 и 83,3) 1/с. При каждом значении частоты вращения ротора время процесса варьировалось в диапазоне от 0 до 5 минут, причем процесс вели в течение 60, 120, 180, 240 и 300 секунд.

Исследования проведенные в течение 5 минут и более показали, что дисперсный состав шрота практически не изменяется во времени, но существенно зависит от частоты вращения ротора. Таким образом, после 5 минут наступает некая стабилизация дисперсного состава и дальнейшее пребывание материала в аппарате не приводит к заметному изменению дисперсного состава. После каждого опыта шрот отбирали, высушивали и проводили ситовой анализ дисперсного состава.

В качестве материала использовали семена пажитника сенного, из которых экстрагировали диосцин. Кинетику измельчения изучали по изменению дисперсного состава частиц в периодическом процессе.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Характерные кривые изменения во времени относительной массы частиц – $\xi(t, n)$ в периодическом процессе измельчения при различных значениях частоты вращения ротора представлены на рисунке 2.

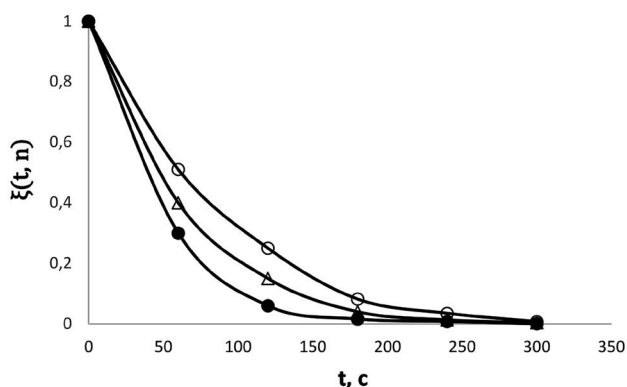


Рисунок 2. Зависимость относительной массы частиц от времени при различной частоте вращения ротора:

○ – $n = 16,7$ 1/с; Δ – $n = 50$ 1/с; ● – $n = 83,3$ 1/с

Figure 2. Dependence of the relative mass of particles on time at different rotor speed:

○ – $n = 16.7$ 1/s; Δ – $n = 50$ 1/s; ● – $n = 83.3$ 1/s

Сравнительный анализ кривых изменения относительной массы частиц во времени показал, что наиболее интенсивное измельчение протекает на первых 60–120 секундах, при этом относительная масса частиц уменьшается в два и более раз, затем процесс замедляется и в последующее время изменение массы становится незначительным.

По результатам, полученным при обработке экспериментальных данных по уравнению (6), были рассчитаны значения средней вероятности и, как оказалось, $\langle \theta \rangle(t, n)$ практически не зависит от времени, а зависит только от частоты вращения ротора, т. е. $\langle \theta \rangle(t, n) \approx \langle \theta \rangle(n)$. Была получена зависимость изменения $\langle \theta \rangle(n)$ при различной частоте вращения ротора n . Такая зависимость представлена на рисунке 3.

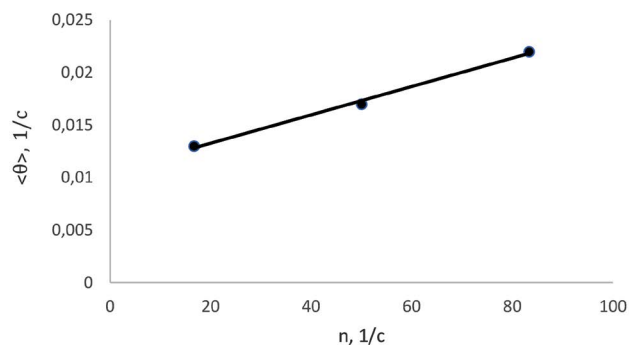


Рисунок 3. Зависимость $\langle \theta \rangle(n)$ от частоты вращения ротора

Figure 3. Dependence of $\langle \theta \rangle(n)$ on the rotor speed

Анализ этих результатов показал, что величина средней вероятности измельчения частиц в кавитационном гомогенизаторе увеличивается с повышением частоты вращения ротора, что вполне ожидаемо, так как возрастает частота контактов частиц с рабочими органами аппарата.

Кроме того, полученная зависимость для средней вероятности измельчения частиц имеет линейный характер, и хорошо аппроксимируется выражением вида:

$$\langle \theta \rangle(n) = 0,0001n + 0,0106, \quad (9)$$

здесь $n - \frac{1}{c}$ и тогда получаем выражение для определения $\xi(t, n)$:

$$\xi(t, n) = \exp - (0,0001n + 0,0106)t. \quad (10)$$

Выражение (10) достаточно точно описывает значения ξ в рабочем диапазоне $n = 16,7 - 83,3$ 1/с.

С учетом этих значений экспериментальные результаты по определению $\xi(t, n)$ и расчетные по выражению (10) имеют хорошее совпадение (рисунок 4).

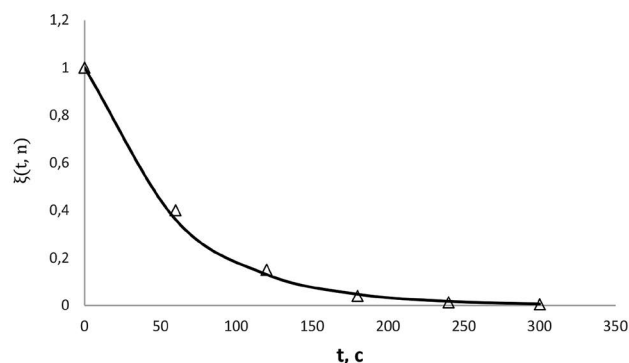


Рисунок 4. Сравнение расчетных и экспериментальных значений относительной массы частиц от времени при частоте вращения ротора $n = 50$ 1/с. Линия – расчет, точки Δ – эксперимент

Figure 4. Comparison of the calculated and experimental values of the relative mass of particles from time to time at a rotor speed $n = 50$ 1/s. Line – calculation, points Δ – experiment

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, зная n и t , с помощью выражения (10) можно расчетным путем определить $\xi(t, n)$ и, следовательно, среднюю массу частиц, полученных в результате измельчения при взаимодействии частиц с вращающимся ротором, и оценить степень измельчения материала в аппаратах такого типа.

Кроме того, предложенный подход и полученные результаты могут быть использованы для оценки дисперсного состава частиц, получаемых и в других конструкциях аппаратов подобного действия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Белокуров С. С., Флисюк Е. В., Наркевич И. А., Лужанин В. Г., Шилов С. В., Новикова К. О. Сравнительный анализ перспективных методов экстрагирования для получения извлечений из семян пажитника сеного. *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2019;8(3):47–53.
2. Пименов Ю. А. Виброкавитационный смеситель-гомогенизатор. Патент РФ № 2131761. Пер. № 98105553/25. Заявл. 25.03.1998. Опубл. 20.06.1999.
3. Флисюк Е. В., Белокуров С. С., Наркевич И. А., Шиков А. Н., Флисюк О. М., Ивкин Д. Ю. Кинетика экстрагирования диосцина из растительного сырья в виброкавитационном гомогенизаторе. *Разработка и регистрация лекарственных средств*. 2020;9(2):77–81.
4. Chakraborty J., Ramkrishna D. Identification of Markov Matrices of Milling Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009;48:9763–9771. DOI: 10.1021/ie900456j.
5. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Powder Technology*. 2005;157:128–137. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.05.019.
6. Berthiaux H. Analysis of grinding processes by Markov chains. *Powder Technology*. 2014;253:385–392. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00086-5.
7. Межеумов Г. Г., Жуков В. П., Мизонов В. Е. Применение теории цепей Маркова к моделированию замкнутого цикла измельчения. *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. 2005;48(4):135–137.
8. Мизонов В. Е., Федосов С. В., Смирнов С. Ф., Красильников А. Г. Применение теории цепей Маркова к моделированию кинетики измельчения в трубных мельницах замкнутого цикла. *Строительные материалы*. 2007;10:41–45.
9. Mitrofanov A., Mizonov V., Tannous K., Ovchinnikov L. A. Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*. 2018;36(2):244–253. DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180.
10. Пеньков Н. В., Флисюк О. М. Математическая модель процессов дробления частиц в аппаратах периодического и непрерывного действия. *Журнал прикладной химии*. 1985;58(5):1161.
11. Флисюк О. М., Фролов В. Ф., Саргаева Ю. В. Теоретическое и экспериментальное исследование процесса дробления в скоростном грануляторе. *Теоретические основы химической технологии*. 2010;44(6):712–714.

REFERENCES

1. Belokurov S. S., Flisyuk E. V., Narkevich I. A., Lujanin V. G., Shilov S. V., Novikova K. O. Comparative analysis of promising extraction methods for obtaining extracts from hay fenugreek seeds. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv = Drug development & registration*. 2019;8(3):47–53. (In Russ.).
2. Pimenov Yu. A. Vibro-cavitation mixer-homogenizer. Patent Rus. Federation No. 2131761; reg. No. 98105553.25. Declared 03.25.1998/ Publ. 06.20.1999. (In Russ.).

3. Flisyuk E. V., Belokurov S. S., Narkevich I. A., Shikov A. N., Flisyuk O. M., Ivkin D. Yu. Kinetics of Dioscin extraction from plant raw materials in a vibro-cavitation homogenizer. *Razrabotka i registratsiya lekarstvennykh sredstv = Drug development & registration*. 2020;9(2):77–81. (In Russ.).
4. Chakraborty J., Ramkrishna D. Identification of Markov Matrices of Milling Models. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2009;48:9763–9771. DOI: 10.1021/ie900456j.
5. Berthiaux H., Mizonov V., Zhukov V. Application of the theory of Markov chains to model different processes in particle technology. *Powder Technology*. 2005;157:128–137. DOI: 10.1016/j.powtec.2005.05.019.
6. Berthiaux H. Analysis of grinding processes by Markov chains. *Powder Technology*. 2014;253:385–392. DOI: 10.1016/S0009-2509(00)00086-5.
7. Mezheumov G. G., Zhukov V. P., Mizonov V. E. Application of the theory of Markov chains to modeling a closed grinding cycle. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii, seriya khimiya i khimicheskaya tekhnologiya = «Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya» Russian Journal of Chemistry and Chemical Technology*. 2005;48(4):135–137. (In Russ.).
8. Mizonov V. E., Fedosov C. B., Smirnov S. F., Krasilnikov A. G. Application of the theory of Markov chains to modeling the kinetics of grinding in closed-cycle tube mills. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2007;10:41–45. (In Russ.).
9. Mitrofanov A., Mizonov V., Tannous K., Ovchinnikov L. A. Markov chain model to describe fluidization of particles with time-varying properties. *Particulate Science and Technology*. 2018;36(2):244–253. DOI: 10.1080/02726351.2016.1243180.
10. Penkov N. V., Flisyuk O. M. Mathematical model of particle crushing processes in devices of periodic and continuous action. *Zhurnal prikladnoj himii = Journal of Applied Chemistry*. 1985;58(5):1161. (In Russ.).
11. Flisyuk O. M., Frolov V. F., Sargaeva Yu. V. Theoretical and Experimental Study of Crushing in a High-Speed Granulator. *Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii*. 2010;44(6):712–714. (In Russ.).