DOI 10.21603/2074-9414-2017-4-99-105
УДК 621.926

ИССЛЕДОВАНИЕ НАСОСНОГО ЭФФЕКТА РОТОРНОГО ДИСМЕМБРАТОРА

М. А. Киркор, Р. А. Бондарев*, А. В. Киркор, И. Н. Никитин

УО «Могилевский государственный университет продовольствия»,
212027, Беларусь, г. Могилев, пр. Шмидта, 3

**e-mail: mgup_pm@bk.ru*

Дата поступления в редакцию: 03.11.2017
Дата принятия в печать: 11.12.2017

© М. А. Киркор, Р. А. Бондарев, А. В. Киркор, И. Н. Никитин, 2017

Аннотация. В данной работе был изучен насосный эффект роторного дисмембратора, предназначенного для переработки растительного сырья. Данный тип аппаратов для измельчения широко применяется в пищевой промышленности. Основной рабочий орган дисмембратора – ротор совершает вращательное движение и сообщает импульс воздушному потоку, из-за чего в рабочей камере аппарата образуется насосный эффект. На сегодняшний день отсутствуют данные, позволяющие определить значение насосного эффекта в зависимости от технологических или конструктивных параметров дисмембратора. В ходе исследования были определены основные факторы, образующие насосный эффект. Описана конструкция роторного дисмембратора и приведена схема лабораторной установки, содержащей данный аппарат. Изложена методика проведения экспериментальных исследований. Установлена зависимость между затратами мощности и объемным расходом воздуха, генерируемым дисмембратором при различных угловых скоростях вращения ротора. Технологические параметры аппарата представлены в виде критериев подобия. Установлено, что характер течения аэродинамического потока, выражающийся критерием Рейнольдса, и затраты энергии, определяемые модифицированным критерием Эйлера, зависят от соотношения инерционных сил вращательного движения ротора к гравитационным силам, которое выражается центробежным критерием Фруда. Определено влияние критерия Рейнольдса и центробежного критерия Фруда на коэффициент насосного эффекта. Полученные зависимости позволяют более точно определять энергетические и технологические параметры работы изученного дисмембратора. Преобразование эмпирических уравнений с использованием критериев подобия существенно расширяет масштаб использования полученных результатов. Они могут применяться в расчете промышленных аппаратов для измельчения растительных материалов, а также для корректировки технологических параметров пневмотранспортирующих линий, в которых установлены данные аппараты.

Ключевые слова. Дисмембратор, насосный эффект, критерий Рейнольдса, модифицированный критерий Эйлера, критерий Фруда

Для цитирования: Исследование насосного эффекта роторного дисмембратора / М. А. Киркор [и др.] // Техника и технология пищевых производств. – 2017. – Т. 47, № 4. – С. 99–105. DOI: 10.21603/2074-9414-2017-4-99-105.

STUDY OF THE ROTARY DISMEMBRATOR PUMPING EFFECT

M. A. Kirkor, R. A. Bondarev*, A. V. Kirkor, I. N. Nikitin

Mogilev State University of Foodstuffs,
3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Belarus

**e-mail: mgup_pm@bk.ru*

Received: 03.11.2017
Accepted: 11.12.2017

© M. A. Kirkor, R. A. Bondarev, A. V. Kirkor, I. N. Nikitin, 2017

Abstract. The article reveals the result of the study of rotary dismembrator pumping effect designed to process plant raw material. This type of grinding equipment is widely used in food industry. The main working part of the dismembrator is a rotor that rotates and gives an impulse to the air flow. That causes pumping effect in the equipment operating chamber. At present moment there are no reliable figures that can help determine the significance of the pumping effect depending on the technological or structural parameters of the dismembrator. During the study the authors identified the main factors causing pumping effect. They described the design of the rotor dismembrator and presented the scheme of the laboratory unit containing this machine. Besides, the authors described the experimental research procedure. They determined the correlation between the power consumption and air flow rate generated by the dismembrator at various angular velocities of rotor spinning. Technological parameters of the machine are presented in the form of similarity criteria. The authors found out that the nature of aerodynamic flow movement, expressed by Reynolds criterion, and energy consumption, determined by modified Euler criterion, depend on the ratio between the inertial forces of the rotary motion to the gravitational forces, expressed by the centrifugal Froude criterion. The article reveals the influence of Reynolds criterion and Froude centrifugal criterion on the pumping effect coefficient. The obtained correlations make it possible to determine energy and technological parameters of the dismembrator operation more accurately. The transformation of empirical equations using similarity criteria expands the scope of the obtained results application significantly. They can be used in the calculations concerning

industrial equipment for plant materials grinding, as well as to adjust the technological parameters of pneumatic conveyor lines where these devices are installed.

Keywords. Dismembrator, pumping effect, Reynolds criterion, modified Euler's criterion, Froude criterion

For citation: Kirkor M.A., Bondarev R.A., Kirkor A.V., Nikitin I.N. Study of the pump effect of the rotary dismembrator. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2017, vol. 47, no. 4, pp. 99−105 (In Russ.). DOI: 10.21603/2074-9414-2017-4-99-105.

Введение

Переработка сырья с целью получения порошков заданного гранулометрического состава находит все более широкое применение в производствах пищевых продуктов [1]. Основной стадией переработки растительных продуктов является измельчение исходного сырья. В зависимости от механических характеристик измельчаемых материалов применяются различные способы ведения процесса [2, 3], а наиболее распространенным аппаратом для измельчения растительного сырья является роторный дисмембратор [4].

Анализ конструктивных особенностей роторных дисмембраторов, также как и собственные экспериментальные исследования, показывает, что побочным эффектом работы подобных аппаратов является возникновение насосного эффекта [5, 6, 7], который может либо способствовать удержанию материала в рабочей камере, увеличивая тем самым степень измельчения и затраты энергии на ведение процесса, либо, наоборот, снижать время пребывания материала в зоне обработки и тем самым препятствовать достижению заданного технического результата.

Согласно теории лопастных машин, рабочий орган аппарата (ротор), совершая вращательное движение, сообщает импульс движения воздушному потоку в рабочей камере аппарата. При этом поток совершает сложное движение, вследствие чего в камере дисмембратора возникают радиальные, осевые и тангенциальные потоки [9]. Анализ конструкций существующих дисмембраторов показывает, что преобладающее действие будут иметь радиальный и тангенциальный воздушные потоки, так как осевое движение воздуха наблюдается только в пределах самого ротора, и далее поток трансформируется в радиальный и тангенциальный. Стоит отметить, что в подавляющем большинстве случаев через рабочую камеру измельчителя принудительно продувается воздушный поток, который транспортирует продукт и выводит его из аппарата после измельчения [9]. Генерируемый воздушный поток Q, зависящий от частоты вращения ротора n и его диаметра d, требует некоторых затрат энергии N, входящих в общую величину мощности, потребляемой на процесс измельчения. Кроме этого, от генерируемого воздушного потока в камере дисмембратора могут возникнуть циркуляционные токи, которые препятствуют эффективному выведению мелкой фракции продуктов измельчения [10]. Также стоит учесть, что генерируемый ротором поток может усиливать несущий поток воздуха, продуваемый через камеру аппарата, что может создать сложность в работе пневмолиний за счет увеличения суммарного объемного расхода воздуха [11].

Таким образом, данная работа ставит перед собой следующие цели:

– оценка насосного эффекта роторного дисмембратора в зависимости от его режимных параметров;

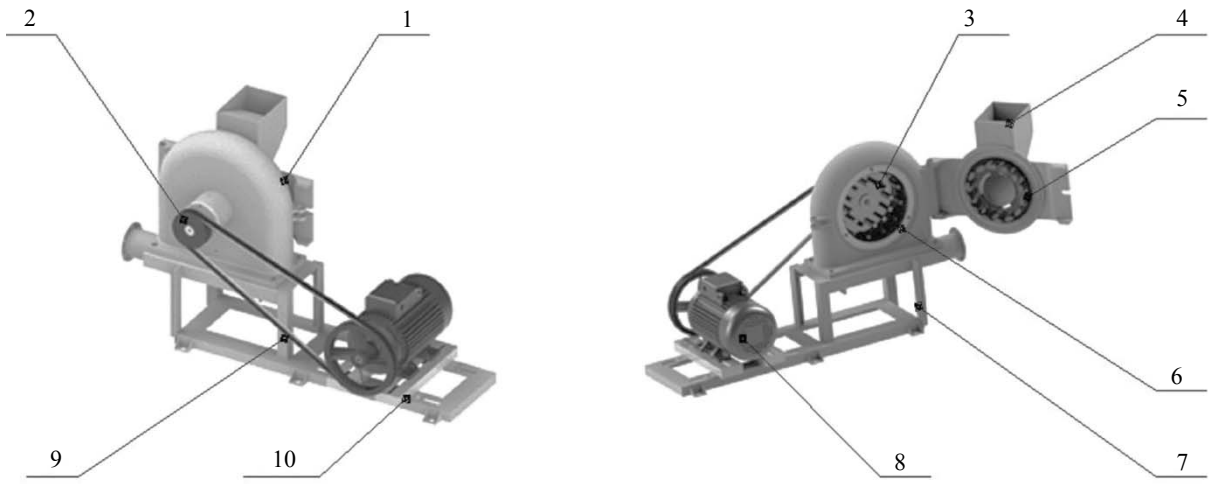
– определение затрат мощности на придание импульса воздушному потоку, участвующему в создании насосного эффекта.

Объект и методы исследования

Объектом исследования является роторный дисмембратор, предназначенный для измельчения пищевых материалов растительного происхождения. Общий вид аппарата представлен на рис. 1. Его основными частями являются рабочая камера (1), в которой установлен приводной вал (2), на котором закреплен основной рабочий орган – диск с пальцами (3). Рабочая камера снабжена откидной крышкой (4), на внутренней поверхности которой неподвижно закреплен ответный диск с пальцами (5). Конструкцией аппарата предусмотрена возможность установки цилиндрического сита (6), необходимого для контроля размеров частиц измельченного продукта. Рабочая камера в сборе устанавливается на сварную раму (7), на которой также закрепляется электродвигатель (АИР132М2) (8). Крутящий момент от электродвигателя передается посредством ременной передачи (9), а регулировка ее натяжения осуществляется с помощью натяжного устройства (10).

Принцип работы аппарата поясняется его поперечным разрезом по рабочей камере, представленным на рис. 2.

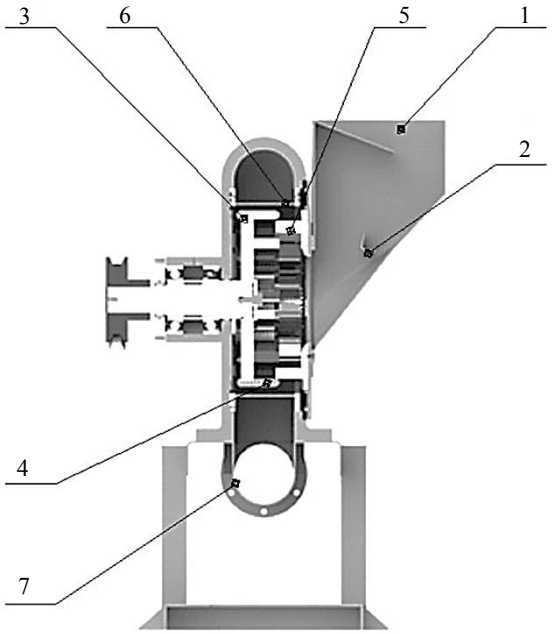
Исходный продукт подается в загрузочную воронку (1), снабженную пересыпными полками (2). Под действием силы тяжести продукт попадает в камеру измельчения, где подвергается механическому воздействию вращающегося ротора (3). На поверхности ротора на различных радиальных координатах расположены два ряда прямоугольных пальцев (4). Между рядами пальцев ротора установлен ряд пальцев статора (5), закрепленных неподвижно. Измельченный продукт проходит через отверстия в цилиндрическом сите (6) и попадает в нижнюю часть рабочей камеры, откуда отводится через патрубок разгрузки (7). Воздух совместно с исходным продуктом поступает в рабочую камеру и отводится совместно с измельченным порошком через патрубок разгрузки системой аспирации.



1 – рабочая камера; 2 – приводной вал; 3 – диск с пальцами (ротор); 4 – крышка; 5 – неподвижный диск с пальцами (статор); 6 – сито; 7 – рама; 8 – электродвигатель; 9 – ременная передача; 10 – натяжное устройство

Рисунок 1 – Общий вид аппарата

Figure 1 – General view of the machine



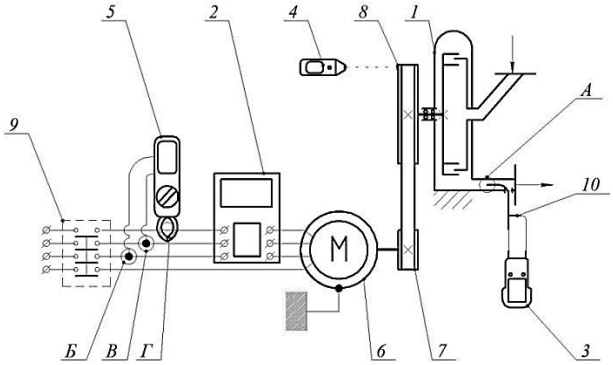
1 – патрубок загрузки; 2 – пересыпные полки; 3 – ротор; 4 – пальцы подвижные; 5 – пальцы неподвижные; 6 – цилиндрическое сито; 7 – аспирационный патрубок

Рисунок 2 – Поперечный разрез рабочей камеры аппарата

Figure 2 – Machine operating chamber cross-section

Описанный аппарат является основным узлом лабораторной установки, схема которой приведена на рис. 3. Кроме роторного дисмембратора (1) в ее состав входит транзисторный преобразователь частоты электрического тока (Hyundai N700E-0,55HF) (2), цифровой анемометр (testo-435) (3), соединенный с трубкой Пито – Прандтля (10), цифровой фототахометр (ATI 800) (4), цифровой ваттметр (APPA-109N) (5).

Опираясь на метод анализа размерностей, были выявлены основные входные и выходные факторы.



1 – измельчитель; 2 – транзисторный преобразователь частоты; 3 – цифровой анемометр; 4 – цифровой фототахометр; 6 – цифровой ваттметр; 7 – ременная передача; 8 – световозвращающая метка; 9 – магнитный пускатель; 10 – трубка Пито – Прандтля. А – точка контроля объемного расхода воздуха; Б, В, Г – точки контроля мощности

Рисунок 3 – Схема лабораторной установки

Figure 3 – Laboratory-scale unit scheme

Так, входным фактором являлась угловая скорость вращения ротора. Выходными факторами являлись мощность, потребляемая установкой, а также объемный расход воздуха в патрубке разгрузки, генерируемый ротором аппарата.

Для сокращения длительности и трудоемкости исследований было произведено планирование эксперимента, в результате чего была составлена матрица полного факторного эксперимента [12].

Стоит отметить ряд допущений при планировании эксперимента. В первую очередь, серии опытов производились на однофазном воздушном потоке без учета транспортирования потоком частиц измельченного материала. Однако предполагается, что промышленные аппараты работают в условиях, в которых значение массовой концентрации для измельченного порошка по отношению к воздуху лежит в пределах

0,14–0,4 кг/кг. В данных условиях двухфазный поток ведет себя однородно, а твердая фаза продукта не оказывает существенного влияния на характер аэродинамических течений в рабочей камере дисмембратора [14].

Также стоит отметить, что в данной работе не учтена сжимаемость воздуха в рабочей камере, т. е. плотность воздуха принимается одинаковой во всех точках аппарата, а процессы, происходящие в рабочей камере, рассматриваются как изотермические. Основанием для данного допущения явилась обработка результатов предварительных опытов, в результате которой были произведены замеры скорости воздуха в различных точках внутреннего пространства аппарата. Обработка показала, что для всего объема рабочей камеры число Маха < 1, следовательно сжимаемостью воздуха в данной серии опытов можно пренебречь [13].

Следует также оговорить и интервалы варьирования входного параметра, а именно угловой скорости вращения ротора. В проведенной серии опытов она изменялась в интервале от 199 рад/с до 570 рад/с, что обусловлено техническими рекомендациями работы промышленных дисмембраторов, следовательно зависимости, полученные в ходе математической обработки, справедливы лишь для данного интервала. Эксперименты производились следующим образом. С помощью транзисторного преобразователя (2) устанавливалась необходимая частота электрического тока, подаваемого на электродвигатель (6). Далее с помощью цифрового фототахометра производился замер частоты вращения приводного вала ротора, для чего на ведомом шкиве ременной передачи (7) была закреплена световозвращающая метка (8), на которую перпендикулярно плоскости вращения направлялся луч измерительного прибора. Зафиксированная частота вращения пересчитывалась в угловую скорость. Далее с помощью цифрового анемометра (3), соединенного с трубкой Пито – Прандтля (10), установленной по оси круглого трубопровода длиной 1 м навстречу потоку (точка А) [5], фиксировались показания объемного расхода. Одновременно с этим в точках контроля Б, В, Г с помощью цифрового ваттметра фиксировались показания мощности, потребляемой электродвигателем (6), включение и выключение которого производилось магнитным пускателем (9). Порядок проведения эксперимента производился для всех значений входного параметра.

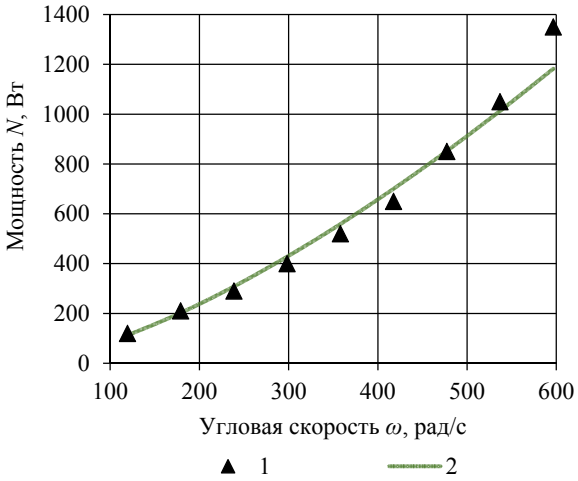
Результаты исследований и обсуждение

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость мощности, потребляемой приводом аппарата, от угловой скорости вращения, которая описывается уравнением (1):

$$N = 0{,}1\omega^{1{,}47}, \qquad (1)$$

где N – потребляемая мощность, Вт;

ω – угловая скорость, рад/с.



1 – опытные данные; 2 – расчет по выражению (1)

Рисунок 4 – Зависимость мощности от угловой скорости вращения ротора

Figure 4 – Dependence between power and rotor spinning angular velocity

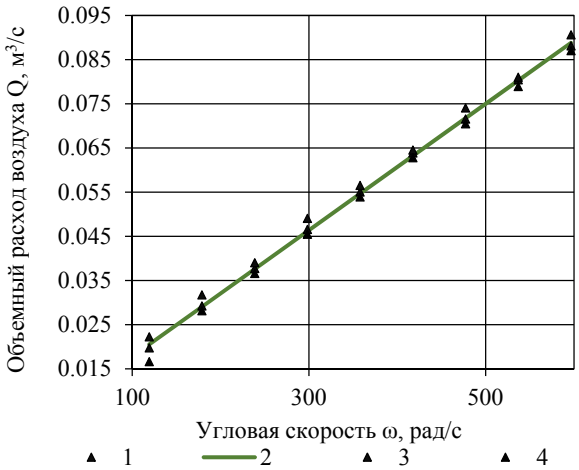
Графическая интерпретация полученной зависимости представлена на рис. 4. Анализ графика указывает на возрастание функции с натуральным показателем степени при увеличении угловой скорости вращения ротора. Данная зависимость полностью согласуется с теорией лопастных машин.

В отличие от потребляемой мощности объемный расход воздуха, генерируемый ротором аппарата, зависит от угловой скорости вращения ротора линейно, что было определено после обработки опытных данных и получения зависимости (2):

$$Q = 1{,}43 \cdot 10^{-4}\,\omega + 3{,}48 \cdot 10^{-3} \qquad (2)$$

где Q – объемный расход воздуха, м^3/с.

Графическое изображение уравнения (2) показано на рис. 5.



1 – опытные данные; 2 – расчет по выражению (2)

Рисунок 5 – Зависимость объемного расхода воздуха от угловой скорости вращения ротора

Figure 5 – Dependence between air volume flow rate and rotor spinning angular velocity

Анализ рис. 5 показывает линейную зависимость, которая объясняется пропорциональной взаимосвязью окружной скорости ротора и скорости движения воздушного потока в патрубке рабочей камеры, что подтверждает предположение о подавляющем преобладании радиальных и тангенциальных воздушных потоков ротора над осевыми.

Полученные зависимости (1, 2) адекватно описывают основные параметры насосного эффекта лабораторного дисмембратора, однако их практическая реализация на промышленных аппаратах является невозможной по причине прямой привязки к отдельным геометрическим размерам лабораторной установки. Для расширения спектра использования результатов экспериментальных исследований был произведен следующий этап их обработки, в результате которого были использованы критерии подобия, включающие в себя рассмотренные факторы.

Критерием, выражающим взаимосвязь затраченной мощности с инерционными силами, был принят центробежный критерий Эйлера Eu_M [15], определяемый по уравнению (3):

$$Eu_M = \frac{N}{\rho \cdot n^3 \cdot d^5}, \quad (3)$$

где ρ – плотность воздуха, кг/м^3;

d – диаметр ротора, м;

n – частота вращения ротора, об/с.

Соотношение инерционных сил к силам вязкого трения генерируемого воздушного потока было представлено в виде критерия Рейнольдса Re [15], определяемого по формуле (4):

$$Re = \frac{v_0 \cdot d_1}{v}, \quad (4)$$

где v_0 – скорость воздушного потока в осевом направлении, м/с;

d_1 – диаметр трубы, м;

v – кинематическая вязкость воздуха, м^2/с.

Отношение инерционных сил к гравитационным было выражено с использованием центробежного критерия Фруда Fr [7], определяемого по формуле (5):

$$Fr = \frac{n^2 \cdot d}{g}, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2.

Преобразование уравнения (1) с использованием указанных критериев подобия позволило получить уравнение (6), графическая интерпретация которого показана на рис. 6.

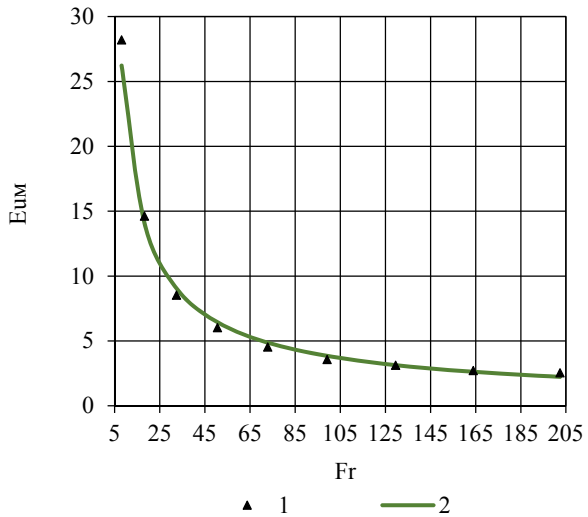
$$Eu_m = 130{,}18 Fr^{-0{,}766}. \quad (6)$$

Анализ рис. 6 указывает на то, что с преобладанием инерционных сил над гравитационными энергетические затраты снижаются, так как возрастает значение собственного момента инерции ротора.

Обратная тенденция наблюдается при преобладании инерционных сил над силами вязкого трения, что можно заметить, производя анализ уравнения (7), полученного путем преобразования уравнения (2):

$$Re = 8 \cdot 10^3 Fr^{0{,}46}, \quad (7)$$

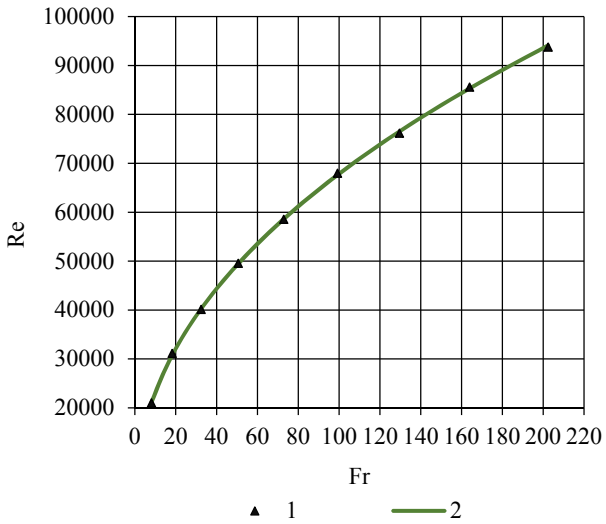
График уравнения (7) представлен на рис. 7, из которого видно, что при увеличении инерционных сил вращательного движения происходит возрастание сил инерции воздушного потока по отношению к силам вязкого трения, что в очередной раз указывает на взаимосвязь окружной скорости вращательного движения ротора и линейной скорости воздушного потока, создаваемого за счет насосного эффекта аппарата.



1 – экспериментальные данные;
2 – расчет по выражению (6)

Рисунок 6 – Зависимость критерия Эйлера от центробежного критерия Фруда

Figure 6 – Dependence between Euler's criterion and Froude centrifugal criterion



1 – экспериментальные данные;
2 – расчет по уравнению (7)

Рисунок 7 – Зависимость критерия Рейнольдса от центробежного критерия Фруда

Figure 7 – Dependence between Reynolds criterion and Froude centrifugal criterion

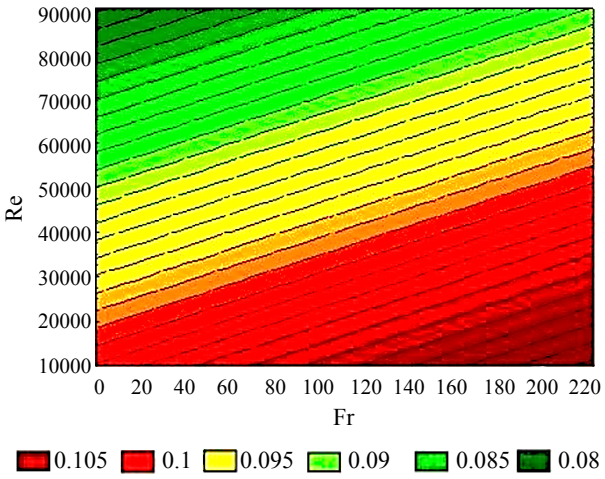


Рисунок 8 – Зависимость коэффициента насосного эффекта от критериев Рейнольдса и Фруда

Figure 8 – Dependence between pumping effect coefficient and Reynolds and Froude criteria

Независимо друг от друга уравнения 6 и 7 могут быть использованы на практике, но по отдельности они не раскрывают процесс образования насосного эффекта в роторном дисмембраторе.

Более информативным является использование безразмерного модуля, называемого коэффициентом насосного эффекта L_p [6], определяемого по формуле (8):

$$L_p = \frac{Q}{nd^3} \qquad (8)$$

Математические преобразования, сопряженные с введением данного коэффициента, позволили получить зависимость (9):

$$L_p = 0{,}1 + 4{,}2 \cdot 10^{-5} Fr - 2{,}5 \cdot 10^{-7} \mathrm{Re}\,, \qquad (9)$$

Графическая интерпретация полученной зависимости, представленная в виде поверхности равных уровней, показана на рис. 8.

Из рис. 8 видно, что с увеличением значения критерия Фруда наблюдается возрастание насосного эффекта роторного дисмембратора, что связано с увеличением импульса, сообщаемого воздушному потоку. В то же время увеличение числа Рейнольдса способствует снижению насосного эффекта, что в свою очередь коррелирует со стабильными полого падающими характеристиками центробежных насосов.

Выводы

Произведенные экспериментальные исследования являются этапом изучения сложной структуры аэродинамических течений в рабочей камере роторных аппаратов для измельчения пищевого сырья. Обработка опытных данных позволила установить в критериальной форме влияние насосного эффекта ротора измельчителя на энергетические затраты (6) и технологические параметры его работы (5). Кроме этого, определение коэффициента насосного эффекта в зависимости от критериев подобия (9), раскрывающих физический смысл процессов, протекающих в рабочей камере, может быть использовано при проектировании центробежных роторных дисмембраторов, а именно для корректировки расчетных технологических и энергетических параметров как самих аппаратов, так и пневмосетей, в которых они установлены.

Список литературы

1. Cuq, B. Food powders engineering, between knowhow and science: Constraints, stakes and opportunities / B. Cuq, E. Rondet, J. Abecassis // Powder Technology. – 2011. – Vol. 208 (2). – P. 244–251.

2. Влияние ударно-активаторно-дезинтеграторной обработки на технологические параметры гидрализатов изо ржи / А. А. Сабиров [и др.] // Научный журнал НИУ ИТМО. Серия «Процессы и аппараты пищевых производств». – 2017. – № 3. – С. 43–52.

3. Измельчение растительного сырья в гидродинамических мельницах / М. Г. Кузнецов [и др.] // Вестник технологического университета. – 2016. – № 16. – С. 59–61.

4. Новое технологическое оборудование для комплексной переработки пищевого сырья растительного происхождения / Л. А. Сиваченко [и др.] // Вестник ПГУ. Серия Б. Промышленность. Прикладные науки. – 2014. – № 11. – С. 52–58.

5. Chang, S. P. Cavitation performance research of mixed-flow pump based on CFD / S. P. Chang, Y. S. Wang // Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering. – Vol. 30 (2). – 2012. – P. 171–175.

6. Стренк, Ф. Перемешивание и аппараты с мешалками / Ф. Стренк. ; пер. с польск. под ред. И. А. Щупляка – Л. : Химия, 1975. – 348 с.

7. Zwart, P. A Two-phase flow model for predicting cavitation dynamics / P. Zwart, A. G. Gerber, T. Belamri // Proceedings of ICMF International Conference on Multiphase Flow. – 2004. – P. 1–11.

8. Еникеев, Г. Г. Проектирование лопастных насосов / Г. Г. Еникеев. – Уфа : УГАТУ, 2005. – 97 с.

9. Breadmaking : Improving Quality / ed. by S. P. Cauvain. – 2nd ed. – Cambridge [et al.] : Woodhead Publishing, 2012. – 832 p.

10. Deng, T. Determination of a particle size distribution criterion for predicting dense phase pneumatic conveying behaviour of granular and powder materials / T. Deng, M. S. A. Bradley // Powder Technology. – 2016. – Vol. 304. – P. 32–40.

11. Energy loss at bends in the pneumatic conveying of fly ash / N. Tripathia [et al.] // Particuology. – 2015. – Vol. 21 – P. 65–73.

12. Спиридонов, А. А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А. А. Спиридонов. – М. : Машиностроение, 1981. – 184 с.

13. Горлин, С. М. Экспериментальная аэромеханика / С. М. Горлин. – М. : Высшая школа, 1970. – 423 с.

14. Бабуха, Г. Л. Взаимодействие частиц полидисперсного материала в двухфазных потоках / Г. Л. Бабуха, А. А. Шрайбер. – Киев : Наукова думка, 1969. – 218 с.

15. Стабников, В. Н. Процессы и аппараты пищевых производств / В. Н. Стабников, В. М. Лысянский, В. Д. Попов. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Агропромиздат, 1985. – 510 с.

References

1. Cuq B., Rondet E., Abecassis J. Food Powders Engineering, between Knowhow and Science: Constraints, Stakes and Opportunities. *Powder Technology*, 2011, vol. 208, no 2, pp. 244 – 251. DOI: 10.1016/j.powtec.2010.08.012.

2. Sabirov A.A., Barakova N.V., Samodelkin E.A. Vliyanie udarno-aktivatorno-dezintegratornoy obrabotki na tekhnologicheskie parametry gidralizatov izo rzhi [The effect of shock activator-disintegrating processing (UDA-processing) on the technological parameters of rye hydrolysates]. *Nauchnyy zhurnal NIU ITMO. Seriya "Processy i apparaty pishchevykh proizvodstv"* [Scientific Journal NRU ITMO. Processes and Food Production Equipment], 2017, no 3, pp. 43 – 52.

3. Kuznecov M.G., Khar"kov V.V., Khakimova E.G. Izmel'chenie rastitel'nogo syr'ya v gidrodinamicheskikh mel'nitsakh [Vegetable Raw Material Grinding in Hydrodynamic Mills]. *Vestnik tekhnologicheskogo universiteta* [Vestnik of the Technological University], 2016, no.16, pp. 59 – 61.

4. Sivachenko L.A., Kirkor M.A., Bondarev R.A., Sivachenko T.L, Kurochkin N.V. Novoe tekhnologicheskoe oborudovanie dlya kompleksnoy pererabotki pishchevogo syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya [New technology equipment for comprehensive food processing raw plant origin]. *Vestnik PGU* [Polotsk State University Bulletin], 2014, no.11, pp. 52 –58.

5. Chang, S.P., Wang Yo., Cavitation Performance Research of Mixed-Flow Pump Based on CFD. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2012, pp.171–176.

6. Strenk F. *Peremeshivanie i apparaty s meshalkami* [Stirring and Stirring Tools]. Leningrad: Himiya Publ., 1975. 348 p.

7. Zwart P., Gerber A.G., Belamri A. Two-phase Flow Model for Predicting Cavitation Dynamics. *in 5th International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan, 2004, pp.1–11.

8. Enikeev G.G. *Proektirovanie lopastnykh nasosov* [Vane Pumps Design]. Ufa: UGATU Publ., 2005. 97 p.

9. Cauvain S.P. *Breadmaking (Second Edition)*. Woodhead Publishing Series in Food Science, 2012. 802 p.

10. Tong Deng, Michael S.A. Bradley. Determination of a Particle Size Distribution Criterion for Predicting Dense Phase Pneumatic Conveying Bbehaviour of Granular and Powder Materials. *Powder Technology*, 2016, vol. 304, pp. 32 – 40. DOI: 10.1016/j.powtec.2016.05.001.

11. Naveen Tripathia, Sharmaa A., Mallicka S.S., Wypych P.W. Energy Loss at Bends in the Pneumatic Conveying of Fly Ash. *Particuology,* 2015, vol. 21, pp. 65 – 73.

12. Spiridonov A.A. *Planirovanie eksperimenta pri issledovanii tekhnologicheskikh processov* [Experiment Planning in the Process of Technological Processes Studying]. Moscow: Mashinostroeniye Publ., 1981. 184p.

13. Gorlin S.M. E*ksperimental'naya ayeromekhanika* [Experimental Aeromechanics]. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1970. 423p.

14. Babukha G. L., Shrayber A.A. *Vzaimodeystvie chastits polidispersnogo materiala v dvukhfaznykh potokakh* [Interaction of Polydisperse Material Particles in Two-Phase Flows]. Kiev: Nauka Dumka Publ., 1969. 218p.

15. Stabnikov V.N., Lysyanskiy V.M., Popov V.D. *Protsessy i apparaty pishchevykh proizvodstv* [Processes and Food Industry Equipment]. Moscow: Agropromizdat Publ., 1985. 510 p.

Киркор Максим Александрович
канд. техн. наук, доцент, ректор, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», 212027, Беларусь, г. Могилев, пр-т Шмидта, 3, тел. (+375222)45-35-78, e-mail: mgup@mogilev.by

Бондарев Роман Александрович
канд. техн. наук, доцент кафедры прикладной механики и инженерной графики, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», 212027, Беларусь, г. Могилев, пр-т Шмидта, 3, тел. (+375222) 45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Киркор Александр Викторович
канд. техн. наук, доцент кафедры теплохладотехники, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», 212027, Беларусь, г. Могилев, пр-т Шмидта, 3, тел. (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Никитин Игорь Николаевич
аспирант кафедры прикладной механики и инженерной графики, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», 212027, Беларусь, г. Могилев, пр-т Шмидта, 3, тел. (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Maxim A. Kirkor
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor, Rector, Mogilev State University of Foodstuffs, 3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Belarus, phone: (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Roman A. Bondarev
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Mogilev State University of Foodstuffs, 3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Belarus, phone: (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Alexander V. Kirkor
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Heat and Refrigeration Engineering, Mogilev State University of Foodstuffs, 3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Belarus, phone: (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru

Igor N. Nikitin
Postgraduate of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Mogilev State University of Foodstuffs, 3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Belarus, phone: (+375222)45-35-78, e-mail: mgup_pm@bk.ru