УДК 621.928

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КЛАССИФИКАТОРА С КРИВОЛИНЕЙНЫМИ ЛОПАТКАМИ

М.А. Киркор, Р.А. Бондарев*

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

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

Дата поступления в редакцию: 18.03.2016
Дата принятия в печать: 25.04.2016

Для расчета аспирационных сетей и подбора комплектующего оборудования необходимо знать величину потерь давления в отдельных элементах установок. Для выявления влияния различных конструктивных особенностей ротора классификатора на его гидравлическое сопротивление была разработана экспериментальная установка и методика проведения экспериментальных исследований, а также подобрана контрольно-измерительная аппаратура. Проведены экспериментальные исследования при различных расходных и кинематических параметрах проведения процесса разделения полидисперсных материалов на фракции и различных конструктивных особенностях рабочего органа классификатора. Установлено, что с увеличением числа лопаток ротора и угла их изгиба увеличивается гидравлическое сопротивление классификатора. В результате обработки экспериментальных данных получено уравнение, описывающее зависимость гидравлического сопротивления классификатора в виде критерия Эйлера от расхода воздуха и частоты вращения ротора в виде модифицированного критерия Рейнольдса при различных значениях угла изгиба лопаток и их количества. Кроме того, получена зависимость, отражающая влияние угла изгиба лопатки на гидравлическое сопротивление установки в виде коэффициента изгиба лопатки, позволяющая определить этот параметр для геометрически подобных установок. Полученные уравнения упрощают процесс инженерного расчета центробежного классификатора для разделения полидисперсных порошков и могут быть использованы при проектировании сходных по конструкции установок под конкретные технологические требования на предприятиях пищевой промышленности.

Гидравлическое сопротивление, центробежный классификатор, критерий Эйлера, модифицированный критерий Рейнольдса

Введение

Описание процесса центробежной аэродинамической классификации тонкоизмельченных пищевых порошков основано на взаимодействии силы инерции (центробежной силы) с силой аэродинамического сопротивления частиц, которая зависит как от размера и формы частицы, так и от режима движения частицы в рабочем пространстве классификатора [1].

Известно также, что режим движения частиц в роторном классификаторе однозначно влияет на качественные характеристики процесса разделения на фракции [2] и определяется конструктивными и режимными параметрами работы установки, а также характеристиками несущего потока. Поэтому для прогнозирования работы аппаратов необходимо иметь данные о факторах, влияющих на протекание процесса, а также иметь достоверные зависимости для определения его основных технических показателей. Это приобретает особую актуальность, если речь идет о новых конструкциях аппаратов, к числу которых относится и роторный классификатор с лопатками, изогнутыми в сторону, обратную направлению вращения ротора.

Применение в классификаторе ротора с лопатками такого типа создает в рабочем объеме аппарата особую гидродинамическую картину, которая существенно отличается от гидродинамики движения потоков в аппаратах с прямолинейными лопатками. Данное конструктивное решение оказывает положительное влияние на качество процесса классификации [3]. Однако отсутствие данных о влиянии конструктивных особенностей классификатора на его технические показатели и, в частности, на гидравлическое сопротивление является сдерживающим фактором на пути его внедрения в промышленное производство, так как без наличия этих данных затруднен расчет аспирационной сети, а также подбор комплектующего оборудования технологической линии.

С целью выявления зависимостей, связывающих между собой энергетические затраты на проведение процесса разделения с конструктивными и режимными параметрами классификатора, были произведены экспериментальные исследования по определению гидравлического сопротивления роторного центробежного классификатора с криволинейными лопатками.

Объекты и методы исследований

Для исследования гидравлического сопротивления, которое является одним из важнейших параметров, характеризующих работу оборудования, была разработана лабораторная установка, схема которой представлена на рис. 1. Основным элементом установки является роторный центробежный классификатор с криволинейными лопатками, загнутыми против хода вращения рабочего органа,

применяемого для выделения частиц размером от 5 до 50 мкм из полидисперсных порошков в пищевой промышленности [4].

Лабораторная установка, представленная на рис. 1, состоит из классификатора 2, который приводится в действие с помощью привода 3. Система воздуховодов состоит из двух частей: воздуховод подачи запыленного воздуха 1 и воздуховод отвода воздуха из аппарата 5. Движение воздушного потока осуществляется при помощи вентилятора 7 типа ВР 80-75-3,5-15С-1-1, подключенного в сеть электрического питания с напряжением 380 В, частотой тока 50 Гц, и снабженного электродвигателем мощностью 2,2 кВт. Вентилятор способен создавать разряжение до 1650 Па и имеет объемный расход воздуха до 0,47 м^3/с. Привод вентилятора снабжен транзисторным преобразователем частоты 8 типа Hyundai N700E-0,55HF номинальной мощностью 5500 Вт и магнитным пускателем 9.

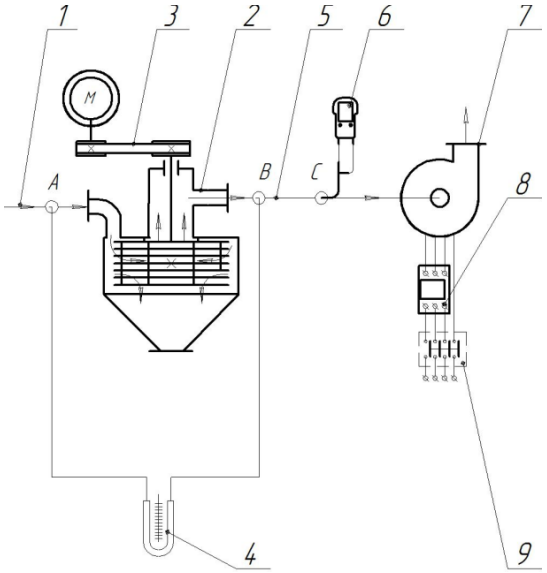

Рис. 1. Схема лабораторной установки:
1, 5 – воздуховод; 2 – центробежный классификатор;
3 – привод; 4 – микроманометр; 6 – анемометр;
7 – вентилятор; 8 – частотный преобразователь;
9 – магнитный пускатель

Измерение объемного расхода воздуха осуществлялось цифровым анемометром 6 марки testo-435, снабженным трубкой Пито-Прандтля. Прибор позволяет проводить измерение давления с точностью до 0,01 Па, а скорости воздушного потока – с точностью до 0,1 м/с. Изменение значения расхода воздуха осуществляется транзисторным преобразователем частоты 9, с помощью которого изменяется частота вращения рабочего колеса вентилятора. Измерение гидравлического сопротивления осуществлялось с помощью U-образного дифференциального микроманометра 4 типа КХЛП с высотой шкалы 640 мм.

Эксперименты по определению гидравлического сопротивления центробежного роторного классификатора производились при различных значениях объемного расхода воздуха (от 0,014 до 0,02 м^3/с с шагом 0,001 м^3/с), а также различных углах изгиба и числе лопаток ротора. Интервалы варьирования входных параметров определялись исходя из технических возможностей и конструктивных особенностей лабораторной установки.

Основным конструктивным параметром (помимо числа лопаток), изменяемым в классификаторе, является угол изгиба лопатки ротора β. Под углом изгиба лопатки β понимается угол между нормалью, восстановленной к радиусу диска ротора DE, и средней линией лопатки ротора (рис. 2) [5].

Эксперименты производились следующим образом. В рабочую камеру классификатора 2 устанавливались наборы дисков ротора, изготовленные с определенным углом изгиба лопатки. Трубки манометра подключали в точки замера А и В. Цифровой анемометр подключался в точке замера С (рис. 1). Далее включался привод ротора классификатора 3 и вентилятор 7. Затем фиксировалось значение объемного расхода воздуха, после чего с помощью частотного преобразователя 9 производилась корректировка объемного расхода воздуха до необходимого значения.

Во время проведения эксперимента фиксировался перепад высот водяного столба в трубках U-образного манометра. Затем по выражению (1) [6] вычислялось гидравлическое сопротивление аппарата Δp, Па:

$$\Delta p = \rho_в \cdot g \cdot h\,, \qquad (1)$$

где $\rho_в$ – плотность воды, кг/м^3; g – ускорение свободного падения, м/с^2; h – перепад высот водяного столба в трубках манометра, м.

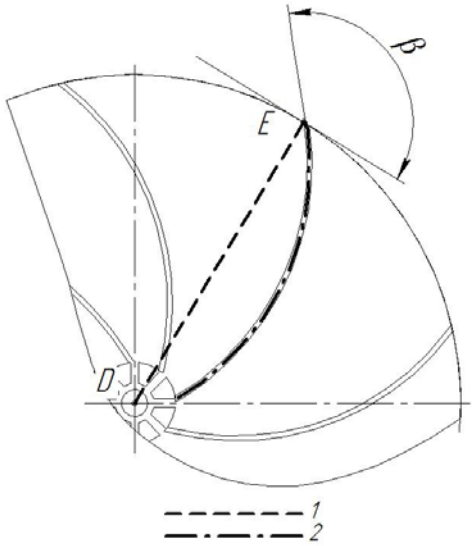

Рис. 2. Схема ротора:
1 – радиус диска ротора;
2 – средняя линия лопатки ротора

При проведении исследований принимались следующие допущения: не учитывалось влияние таких параметров, как диаметр ротора и концентрация частиц твердой фракции в воздушном потоке, которые являлись постоянными величинами. Данные параметры оказывают влияние на величину

гидравлических потерь в аппарате, однако конечной целью исследования являлось выявление зависимостей в виде критериев гидродинамического подобия, в состав которых входят указанные параметры, что позволяет принять их для данного исследования в качестве инвариантных значений.

Результаты и их обсуждение

В результате экспериментальных исследований были получены зависимости потерь давления в рабочей камере классификатора от объемного расхода воздуха при различном числе лопаток ротора, которые в графическом виде представлены на рис. 3.

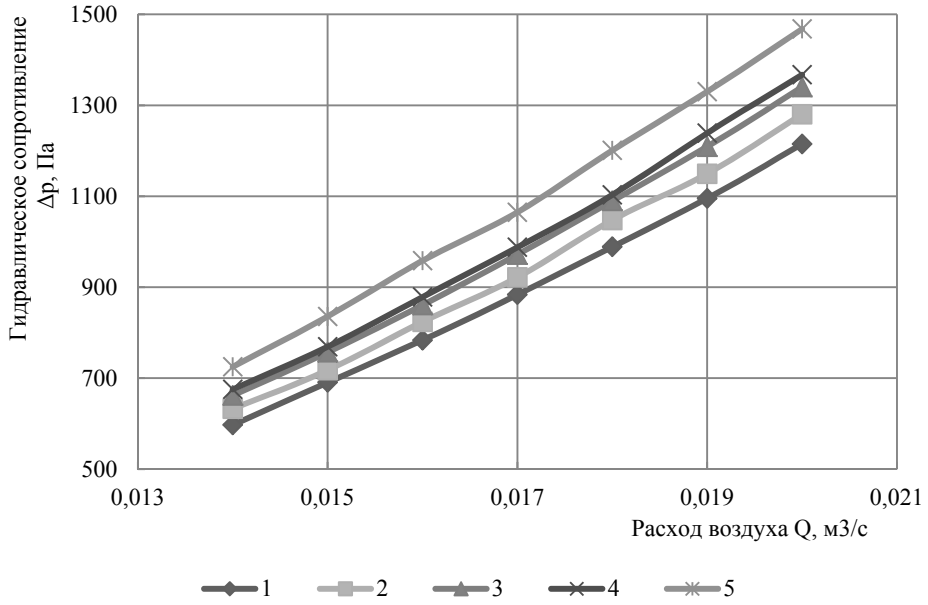

Рис. 3. Зависимость гидравлического сопротивления от объемного расхода воздуха:
1 – 5 лопаток; 2 – 6 лопаток; 3 – 7 лопаток; 4 – 8 лопаток; 5 – 9 лопаток

Анализ полученных данных показывает, что с увеличением расхода воздуха и числа лопаток возрастает гидравлическое сопротивление установки. Это можно объяснить тем, что с увеличением расхода воздуха увеличивается скорость движения воздушного потока в межлопаточном пространстве классификатора. В свою очередь, увеличение числа лопаток уменьшает площадь сечения канала, а также увеличивает величину его смоченного периметра, что ведет к увеличению сил трения.

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить выражение, описывающее зависимость потерь давления от объемного расхода воздуха, которая имеет вид

$$\Delta p = C_1 \times e^{118,6 \times Q}, \qquad (2)$$

где C_1 – эмпирический коэффициент, значения которого в зависимости от числа лопаток представлены в табл. 1.

Таблица 1

Значение коэффициента C_1 в формуле (2)

Число лопаток	Коэффициент C_1
5	118,2
6	123,4
7	130,6
8	131,8
9	144,7

Одним из параметров, определяющих величину гидравлического сопротивления установки наряду с плотностью несущей среды и ее скоростью, является коэффициент гидравлического сопротивления, который связан с потерями давления выражением (3) [6]:

$$\Delta p = \zeta \times \frac{\rho \times \upsilon^2}{2}, \qquad (3)$$

где ζ – коэффициент гидравлического сопротивления аппарата; ρ – плотность несущего потока, кг/м^3; υ – абсолютная скорость движения несущего потока, м/с.

Основное влияние на его величину оказывает режим движения потока, который определяется значением критерия Рейнольдса. Учитывая, что частица с потоком участвует в сложном движении, состоящем из переносного и относительного движений [3], то для описания влияния режима движения на коэффициент гидравлического сопротивления использовался модифицированный критерий Рейнольдса, значение которого определялось по абсолютной скорости движения, а в качестве определяющего размера использовался эквивалентный диаметр межлопаточных каналов.

В свою очередь, величины скоростей переносного υ_e и относительного υ_r движений, а также величина абсолютной скорости движения частицы определялись по выражениям (4–6) [3]:

$$\upsilon_e=\omega\times R\,, \qquad (4)$$

$$\upsilon_r=\frac{Q}{S_B\times z}\,, \qquad (5)$$

$$\upsilon=\sqrt{\upsilon_e^2+\upsilon_r^2}\,, \qquad (6)$$

где ω – угловая скорость вращения ротора, рад/с; R – радиус ротора, м; Q – объемный расход воздуха, м^3/с; S_B – площадь поперечного сечения межлопаточного канала, м^2; z – число межлопаточных каналов в роторе, шт.

Проведенные серии экспериментов показали, что еще одним параметром, влияющим на величину потерь давления, а значит и на коэффициент гидравлического сопротивления установки, является угол изгиба лопаток. В графическом виде зависимости коэффициента гидравлического сопротивления от модифицированного критерия Рейнольдса при разных углах изгиба лопаток представлены на рис. 4.

Анализ данных, представленных на рис. 4, показывает, что коэффициент гидравлического сопротивления обратно пропорционален значению критерия Рейнольдса и прямо пропорционален углу изгиба лопаток.

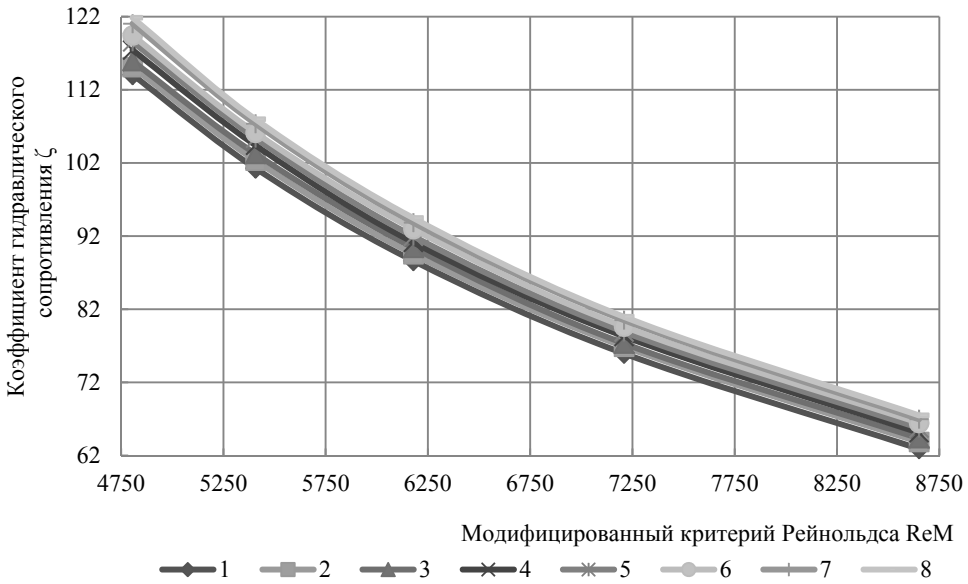

Рис. 4. Зависимость коэффициента гидравлических сопротивлений от модифицированного критерия Рейнольдса: 1 – угол изгиба 100º; 2 – угол изгиба 110º; 3 – угол изгиба 120º; 4 – угол изгиба 130º; 5 – угол изгиба 140º; 6 – угол изгиба 150º; 7 – угол изгиба 160º; 8 – угол изгиба 170º

Математическая обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость коэффициента гидравлического сопротивления классификатора от модифицированного критерия Рейнольдса, которая имеет вид

$$\zeta=C_2\times Re_M^{-1}\,, \qquad (7)$$

где C_2 – эмпирический коэффициент влияния угла изгиба лопатки, значения которого представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значение коэффициента C_2 в формуле (7)

Угол изгиба лопаток	Коэффициент C_2	Угол изгиба лопаток	Коэффициент C_2
100°=0,55π	559124	140°=0,77π	584779
110°=0,61π	560263	150°=0,83π	598161
120°=0,66π	568179	160°=0,88π	603893
130°=0,72π	577404	170°=0,94π	609316

Для упрощения использования полученных экспериментальных данных при инженерном расчете центробежного классификатора для разделения полидисперсных материалов целесообразнее их представить в виде критериев подобия. В качестве такого критерия на практике применяется критерий Эйлера, определяемый по выражению [7]:

$$Eu=\frac{\Delta p}{\rho\times\upsilon^2}\,. \qquad (8)$$

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость критерия Эйлера Eu_0 от модифицированного критерия Рейнольдса для эталонной конструкции классификатора (угол изгиба лопатки равен 160º), которая в графическом виде представлена на рис. 5.

Математическая обработка данных, представленных на рис. 5, позволила получить эмпирическую зависимость, которая имеет вид

$$Eu_0=2{,}93\times10^5\times Re_M^{-1}\,. \qquad (9)$$

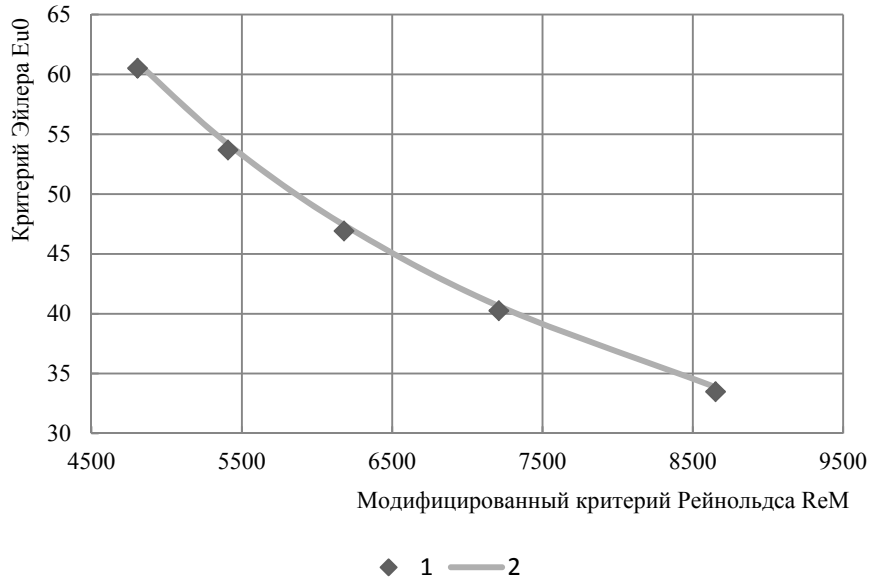

Рис. 5. Зависимость критерия Эйлера от модифицированного критерия Рейнольдса:
1 – экспериментальные данные; 2 – расчет по выражению (6)

Изменение угла изгиба лопаток ротора является отклонением от эталонной конструкции, а его влияние можно выразить в виде коэффициента изгиба лопатки k_β, который определяется по выражению

$$k_\beta = \frac{Eu}{Eu_0}, \qquad (10)$$

где Eu – значение критерия Эйлера для рассматриваемой конструкции классификатора.

Для определения влияния угла изгиба лопаток на коэффициент изгиба лопатки были произведены серии опытов, результаты которых представлены на рис. 6.

Обработка экспериментальных данных позволила получить зависимость коэффициента изгиба лопатки от угла ее изгиба, которая имеет вид

$$k_\beta = C_3 \times \beta + C_4, \qquad (11)$$

где C_3 и C_4 – эмпирические коэффициенты, значения которых представлены в табл. 3.

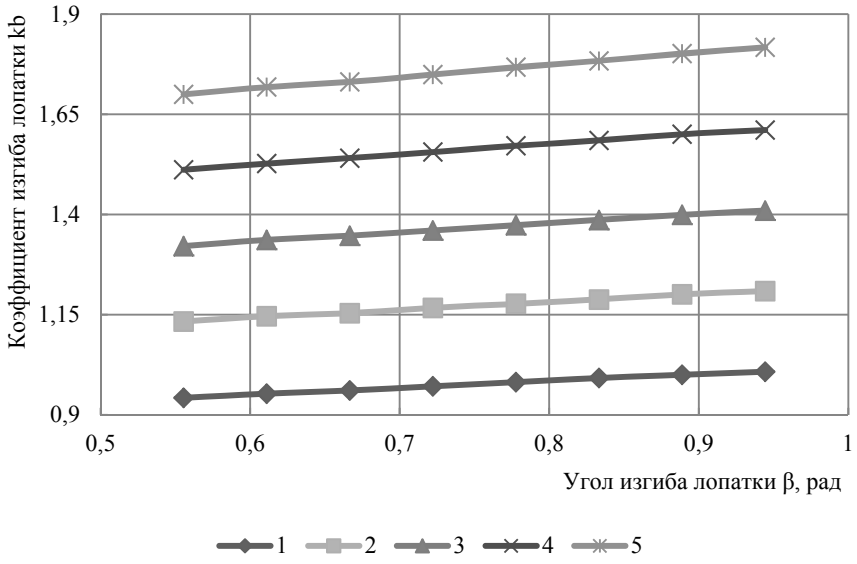

Рис. 6. Зависимость коэффициента изгиба лопатки от угла изгиба:
1 – $Re_м$=8651; 2 – $Re_м$=7209; 3 – $Re_м$=6179; 4 – $Re_м$=5407; 5 – $Re_м$=4806

Таблица 3

Значение коэффициентов C_3 и C_4 в выражении (11)

Модифицированный критерий Рейнольдса Re_M	Коэффициент C_3	Коэффициент C_4
8651	0,174	0,848
7209	0,196	1,025
6179	0,228	1,195
5407	0,305	1,368

Анализ зависимости (11) показывает, что данные выражения имеют общий коэффициент, связанный с модифицированным критерием Рейнольдса. Математическая обработка полученных зависимостей позволила определить влияние модифицированного критерия Рейнольдса на коэффициент изгиба лопатки, что в свою очередь позволило сгруппировать эмпирические коэффициенты в одно уравнение (12):

$$k_\beta = \frac{Re_M}{1415}\left(0{,}089\times\beta + 0{,}25\right). \qquad (12)$$

Данное выражение значительно упрощает процесс инженерного расчета центробежных роторных классификаторов, снабженных ротором с криволинейными лопатками, в случае отклонения конструкции от эталонной. Полученные зависимости (7, 9, 12) позволяют определить затраты энергии на движение воздушного потока в рабочей камере классификатора при различных режимах его протекания, а также при различном числе лопаток ротора и углах их изгиба. На практике полученные уравнения могут найти применение при инженерном расчете установок для разделения порошков, снабженных классификатором с криволинейными лопатками.

Список литературы

1. Касаткин, А.Г. Основные процессы и аппараты химической технологии: учебник для химико-технологических специальностей вузов / А.Г. Касаткин. – М.: АльянсС, 2014. – 750 с.
2. Левданский, А.Э. Высокоэффективные проточные процессы и аппараты / А.Э Левданский, Э.И. Левданский. – Минск: БГТУ, 2001. – 235 с.
3. Киркор, М.А. Исследование движения частицы по поверхности ротора классификатора / М.А. Киркор, Р.А. Бондарев, В.И. Никулин // Вестник Могилевского государственного университета продовольствия. – 2015. – № 1(18). – С. 98–104.
4. Сиваченко, Л.А. 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. Бондарев, Р.А. Аналитическое исследование кинематики движения воздушного потока в межлопаточном пространстве ротора / Р.А. Бондарев, М.А. Киркор // Техника и технология пищевых производств: тез. докл. X Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 23–24 апр. 2015 г. / Мог. гос. ун-т прод.; редкол.: А.В. Акулич [и др.]. – Могилев, 2015. – С. 235.
6. Кавецкий, Г.Д. Технологические процессы и производства (пищевая промышленность): учебник для студентов вузов / Г.Д. Кавецкий, А.В. Воробьева. – М.: КолосС, 2006. – 367 с.
7. Павлов, К.Ф. Примеры и задачи по курсу процессов и аппаратов химической промышленности: учеб. пособие для вузов / К.Ф. Павлов, П.Г. Романков, А.А. Носков; под ред. П.Г. Романкова. – 10-е изд., перераб. и доп. – М.: Альянс, 2013. – 575 с.

RESEARCH ON HYDRAULIC RESISTANCE OF CENTRIFUGAL CLASSIFIER WITH CURVILINEAR BLADES

M.A. Kirkor, R.A. Bondarev*

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

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

Received: 18.03.2016
Accepted: 25.04.2016

To calculate aspiration networks and select standard equipment it is necessary to know the magnitude of pressure loss in the unit's individual elements. To determine the effect of various design features of the classifier rotor on its hydraulic resistance an experimental unit and technique of experimental research are developed, and instrumentation is chosen as well. Experimental studies at various consumption and kinematic parameters of separation process of polydisperse materials into fractions and various structural features of the classifier operating unit are carried out. It is found that with an increase in the number of rotor blades and the angle of bend the classifier hydraulic resistance increases. The experimental data processing resulted in the equations describing the dependence of hydraulic resistance of the classifier as Euler' criterion from airflow and rotor speed as modified Reynolds criterion for various values of blade bend angle and blade number. In addition, the dependence reflecting the effect of blade bend angle on hydraulic resistance of the unit in the form of the blade bend coefficient is obtained allowing us to define this parameter for geometrically similar systems. These equations simplify the process of engineering calculation of the centrifugal classifier for

separating polydisperse powders and they can be used in the design of similar systems for specific process requirements at food enterprises.

Hydraulic resistance, centrifugal qualifier, Euler's criterion, modified Reynolds criterion

References

1. Kasatkin A.G. *Osnovnye protsessy i apparaty khimicheskoy tekhnologii* [Basic processes and apparatuses of chemical engineering]. Moscow, Al'yansS Publ., 2014. 750p.

2. Levdanskiy A.E, Levdanskiy E.I. *Vysokoeffektivnye protochnye protsessy i apparaty* [Highefficiency flowing processes and equipment]. Minsk, BSTU Publ., 2001. 235p.

3. Kirkor M.A., Bondarev R.A., Nikulin V.I Issledovanie dvizheniya chastitsy po poverkhnosti rotora klassifikatora [Research of particle motion on the surface of the rotor classifier]. *Vestnik Mogilevskogo gosudarstvennogo universiteta prodovol'stviya* [Bulletin of the Mogilev State University of Foodstuffs], 2015, no. 1(18), pp. 98–104.

4. Sivachenko L.A., Kurochkin N.V., Kirkor M.A., Bondarev R.A., Sivachenko T.L. ovoe tekhnologicheskoe oborudovanie dlya kompleksnoy pererabotki pishchevogo syr'ya rastitel'nogo proiskhozhdeniya [The new process equipment for complex processing of food raw materials of vegetable origin]. *Vestnik PGU. Seriya B. Promyshlennost'. Prikladnye nauki* [Bulletin of the Polotsk State University. Series B. Industry. Applied Science], 2014, no. 11, pp. 52–58.

5. Bondarev R.A., Kirkor M.A. Analiticheskoe issledovanie kinematiki dvizheniya vozdushnogo potoka v mezhlopatochnom prostranstve rotora [Analytical study of the kinematics of the air flow in the inter-blade rotor space]. *Materialy X mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii «Tekhnika i tekhnologiya pishchevykh proizvodstv»* [Proc. of the X Intern. Sci. and Prac. Conf. “Technique and technology of food production”]. Mogilev, 2015. 235 p.

6. Kavetskiy G.D., Vorob'eva A.V. *Tekhnologicheskie protsessy i proizvodstva (pishchevaya promyshlennost')* [Technological processes and production (food industry)]. Moscow, KolosS Publ., 2006. 367p.

7. Pavlov K.F., Romankov P.G. (ed.), Noskov A.A. *Primery i zadachi po kursu protsessov i apparatov khimicheskoy promyshlennost* [Examples and problems at the rate of processes and apparatuses of the chemical industry: a textbook for high schools]. Moscow, Al'yansS Publ., 2013. 575p.

Дополнительная информация / Additional Information

Киркор, М.А. Исследование гидравлического сопротивления центробежного классификатора с криволинейными лопатками / М.А. Киркор, Р.А. Бондарев // Техника и технология пищевых производств. – 2016. – Т. 41. – № 2. – С. 101–107.

Kirkor M.A., Bondarev R.A. Research on hydraulic resistance of centrifugal classifier with curvilinear blades. *Food Processing: Techniques and Technology*, 2016, vol. 41, no. 2, pp. 101–107 (in Russ.).

Киркор Максим Александрович
канд. техн. наук, доцент, заведующий кафедрой прикладной механики и инженерной графики, УО «Могилевский государственный университет продовольствия», 212027, Республика Беларусь, г. Могилев, пр. Шмидта, 3, тел.: (+375222) 45-35-78, e-mail: mgup@mogilev.by

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

Maxim A. Kirkor
Cand.Sci.(Eng.), Associate Professor, Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, Mogilev State University of Foodstuffs, 3, Schmidt's Ave., Mogilev, 212027, Republic of Belarus, phone: (+375222) 45-35-78, e-mail: mgup@mogilev.by

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