

7. Mennen, L. I., Sapinho, D., Ito, H., Bertrais, S., Galan, P., Hereberg, S., and Scalbert, A. Urinary flavonoids and phenolic acids as biomarkers of intake for polyphenol-rich foods. *Br J Nutr* 2006;96(1):191-198. 16870009.
8. Anandarama S., Reineccius C.A. Stability of encapsulated orange peel oil // *Food technol* 1986. - Vol. 40, № 11. - P. 88-93.
9. Ameer, B., Weintraub, R. A., Johnson, J. V., Yost, R. A., and Rouseff, R. L. Flavanone absorption after naringin, hesperidin, and citrus administration. *Clin Pharmacol Ther* 1996;60(1):34-40. 8689809.
10. Lee, Y. S., Lorenzo, B. J., Koufís, T., and Reidenberg, M. M. Grapefruit juice and its flavonoids inhibit 11 beta-hydroxysteroid dehydrogenase. *Clin Pharmacol Ther* 1996;59(1):62-71. 8549035.

УДК 66.047

DOI

РАЗРАБОТКА ВИХРЕВОГО КЛАССИФИКАТОРА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЕГО ФРАКЦИОННОЙ РАЗДЕЛЯЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ

А.В. Акулч, доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе*

E-mail: mti@mogilev.by

В.М. Лустенков, кандидат технических наук, доцент*

В.М. Акулч, кандидат технических наук, доцент, зав. кафедрой инженерной графики*

*Могилевский государственный университет продовольствия

пр. Шмидта, 3, Могилев, Республика Беларусь, 212027

Анотация. У роботі представлено новий спосіб вихрової класифікації дисперсних матеріалів на три фракції і пристрій для його реалізації. Відмінною особливістю розробленого способу є подача газосуспензії периферійним потоком, який по ходу спадного обертання уздовж вертикальної осі вихрового класифікатора східчасто зменшується в діаметрі, відводячи при цьому виділені частинки різної дисперсності. При цьому в центральний потік подається чистий газ. Взаємодія в розробленому пристрої двох вихрових потоків забезпечує можливість управління гідродинамікою класифікатора.

Виготовлено експериментальний зразок і створено лабораторну установку для проведення експериментальних досліджень гідродинаміки вихрового класифікатора. Проведено комплекс досліджень фракційної роздільної здатності. Представлені диференціальні та інтегральні криві розподілення дисперсного складу пшеничного борошна вищого сорту. Встановлено, що дисперсність матеріалу, у тому числі медіана, зменшується по щаблях поділу.

Ключові слова: класифікація, вихрові потоки, вихровий класифікатор, спосіб, зразок, гідродинаміка, фракційна розділяє здатність.

Аннотация. В работе представлен новый способ вихровой классификации дисперсных материалов на три фракции и устройство для его реализации. Отличительной особенностью разработанного способа является подача газозвеси периферийным потоком, который по ходу нисходящего вращения вдоль вертикальной оси вихрового классификатора ступенчато уменьшается в диаметре, отводя при этом выделенные частицы различной дисперсности. При этом в центральный поток подается чистый газ. Взаимодействие в разработанном устройстве двух вихровых потоков обеспечивает возможность управления гидродинамикой классификатора.

Изготовлен экспериментальный образец и создана лабораторная установка для проведения экспериментальных исследований гидродинамики вихрового классификатора. Проведен комплекс исследований фракционной разделяющей способности. Представлены дифференциальные и интегральные кривые распределения дисперсного состава пшеничной муки высшего сорта. Установлено, что дисперсность материала, в частности медиана, уменьшается по ступеням разделения.

Ключевые слова: классификация, вихровые потоки, вихровой классификатор, способ, образец, гидродинамика, фракционная разделяющая способность.

Введение

В настоящее время в ряде технологических процессов пищевых технологий, связанных с использованием порошкообразных материалов, важным показателем является дисперсный состав исходного или готового продукта. В большинстве случаев в порошках содержатся частицы различного фракционного состава, что не всегда удовлетворяет требованиям эффективного протекания последующих технологических процессов. Поэтому для получения определенного по фракционному составу мелкодисперсного порошкообразного сырья на

производстве в технологических линиях используются классификаторы различного принципа действия [1-4].

Постановка проблемы. Литературный обзор

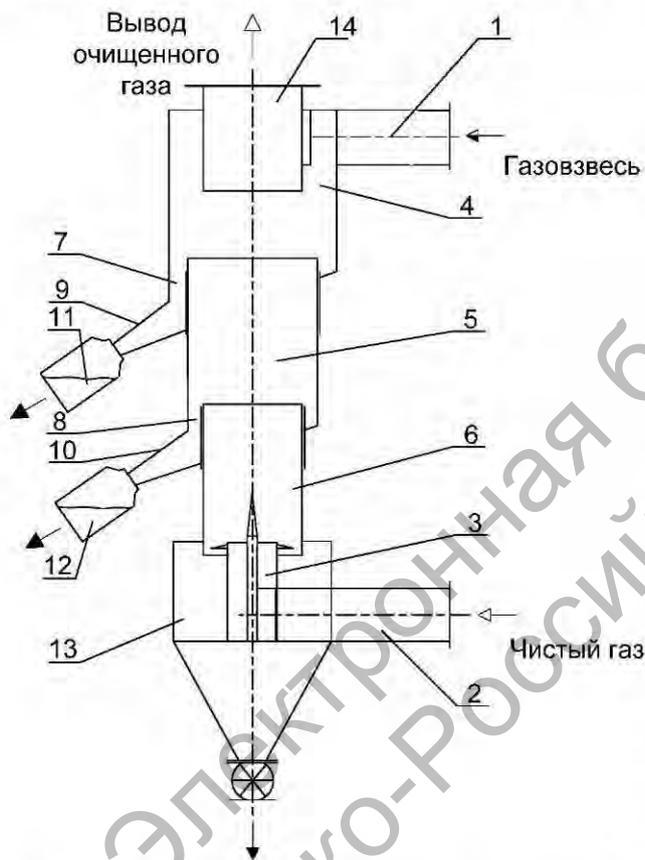
Широкое распространение в производственных условиях получили различные типы центробежных классификаторов: центробежные воздушно-проходные, центробежные воздушно-замкнутые и роторные, обеспечивающие разделение дисперсных материалов на две фракции с преимущественным содержанием в них мелких и крупных частиц [1-5].

В последнее время разработаны новые способы классификации, в том числе в вихревых потоках. Устройства, реализующие данный принцип способны повысить эффективность процесса классификации с разделением дисперсных материалов на две и более фракций [1–2, 4].

Разработка нового способа вихревой классификации

Авторами разработан новый способ вихревой классификации и устройство для его реализации (рис. 1) [6–8]. Принципиальное отличие разработанного способа заключается в том, что в

периферийный поток подают газозвесь и по ходу его нисходящего вращения вдоль вертикальной оси вихревого классификатора ступенчато уменьшают в диаметре путем выполнения цилиндрического корпуса, по меньшей мере, из трех цилиндрических обечайек с возможностью их взаимного осевого перемещения с образованием, по меньшей мере, двух кольцевых камер, к которым посредством отводов промежуточных фракций подключают камеры сбора материала, при этом в центральный поток тангенциально подают чистый газ, а отвод мелкой фракции осуществляют в цилиндроконический бункер (рис. 1).



1 – периферийный тангенциальный поток газозвеси; 2 – центральный тангенциальный поток чистого газа; 3 – завихритель; 4, 5, 6 – цилиндрические обечайки ступенчатого корпуса; 7, 8 – кольцевые камеры; 9, 10 – отводы промежуточных фракций; 11, 12 – камеры сбора материала; 13 – цилиндроконический бункер мелкой фракции; 14 – осевой вывод очищенного газа
Рис. 1. Схема устройства для реализации способа вихревой классификации дисперсных материалов

Наличие в аппарате двух входных патрубков позволяет изменять соотношения расходов газа, подаваемого в периферийный и центральный потоки. Таким образом, обеспечивается управление гидродинамикой вихревого классификатора для достижения эффективного режима работы в зависимости от физических свойств разделяемого материала и его дисперсного состава [7].

Создан экспериментальный образец вихревого классификатора с диаметрами цилиндрических обечайек ступенчатого корпуса $D_1=0,2$ м; $D_2=0,17$ м; $D_3=0,14$ м; при максимальной высоте аппарата 1,2 м.

Создание лабораторной установки для исследования гидродинамики вихревого классификатора

Для проведения гидродинамических экспериментальных исследований создана лабораторная установка (рис. 2), которая состоит из вихревого классификатора 1 с периферийным входным тангенциальным патрубком подачи газозвеси 2 и входным центральным патрубком подачи чистого газа 3, центробежного вентилятора 4, подключенного через частотный преобразователь для регулирования расходных характеристик установки посредством изменения частоты вращения рабочего колеса вентилятора,

сети воздухопроводов 5, микроманометров наклонных (ММН – 240) 6 для измерения динамического давления, подключенных к трубкам Пито-Прандтля, U-образных дифференциальных манометров 7 для измерения статических давлений. Для изменения кратности расходов путем

перераспределения общего расхода газа между входными тангенциальными патрубками периферийного и центрального потоков на них устанавливаются диафрагмы с различными диаметрами внутренних отверстий.



Рис. 2. Общий вид лабораторной установки для гидродинамических исследований новой конструкции вихревого классификатора

1 – вихревой классификатор дисперсных материалов; 2 – тангенциальный патрубок периферийного потока газовой взвеси; 3 – патрубок центрального потока чистого воздуха; 4 – центробежный вентилятор; 5 – система отводящих воздухопроводов; 6 – микроманометры наклонные ММН-240; 7 – U-образные дифференциальные манометры

Исследование фракционной разделяющей способности вихревого классификатора

Для исследования фракционной [9-10] разделяющей способности вихревого классификатора проведены экспериментальные исследования на пшеничной муке при общем расходе газа $V=400$ м³/ч и относительной высоте установки камер крупной и промежуточной фракций (H_2), а также камер промежуточной и мелкой фракций (H_3) в соотношениях (H_2/H_3)=40/40; 90/80; 140/120; 190/160 (мм/мм), в интервале кратности расходов $k=0,4\div 0,7$ [11]. На лазерном дифрактометре LS-100Q исследован дисперсный состав проб пшеничной муки высшего сорта, отобранных после I, II и III ступеней при различных значениях H_2/H_3 и k , а также пробы исходного материала. Результаты дисперсного анализа при $H_2/H_3=40/40$ и кратности расходов

$k=0,4$; 0,6 и 0,7 представлены в таблице 1.

Из анализа полученных экспериментальных данных, установлено, что дисперсность материала, в частности медиана, уменьшается по ступеням разделения, а удельная поверхность увеличивается. Чем выше разделяющая способность первой ступени, тем меньше разница дисперсного состава проб исходного материала и отобранного [11].

В результате исследований также определено, что для пробы, полученной в результате исследований при относительной высоте $H_2/H_3 = 40/40$ на первой ступени при кратности расходов $k=0,4$ среднее значение диаметра отобранных частиц 59,48 мкм, при $k=0,6$ соответственно – 51,92 мкм, а при $k=0,7$ – 46,19 мкм (табл. 1). Такой характер изменения размера частиц в зависимости от кратности расходов сохраняется и на II и III ступенях разделения.

Таблиця 1 – Результати дисперсного аналізу пшеничної муки высшего сорта на лазерном дифрактометре LS-100Q

Соотношение высот установки камер	Кратность расходов	Наименование показателей									
		Среднее (Mean), мкм	Медиана (Median), мкм	Средний диаметр (D 0;0), мкм	Среднеквадратичное отклонение (SD) (geometric)	Мода (Mode), мкм	Изменение (Variance)	Асимметрия (Skewness)	Экцесс (Kurtosis)	Удельная поверхность (SSA), см ² /мл	Среднее/Медиана (Mean/Median)
Исходная проба		53,4566	69,6348	3,47241	2,62178	127,646	6,87372	-0,94623	0,289453	2027,08	0,767671
I ступень	H_2/H_3 0,4	59,4794	76,2688	4,8532	2,19869	127,46	4,83424	-1,31013	1,51155	1553,53	0,779866
	40/40 0,6	51,9157	67,6898	0,65583	2,58506	105,922	6,68251	-1,83834	4,30589	2731,18	0,766965
	0,7	46,1887	58,3298	0,658717	2,6261	96,489	6,89642	-1,63855	3,40619	2976,35	0,791853
II ступень	H_2/H_3 0,4	44,8189	54,6133	0,639808	2,58773	96,489	6,69632	-1,51064	3,26117	2952,37	0,820659
	40/40 0,6	35,6211	40,7512	0,661535	2,82877	96,489	8,00194	-1,05847	1,33664	3711,86	0,874113
	0,7	35,6496	41,2725	0,644888	2,91888	105,922	8,51988	-1,04753	1,26733	3894,08	0,863762
III ступень	H_2/H_3 0,4	36,6474	39,6394	0,641227	2,69393	34,584	7,25728	-0,96401	1,75746	3391,25	0,924518
	40/40 0,6	28,9138	30,5023	0,646345	2,8307	23,8143	8,01285	-0,87295	1,17525	4424,49	0,947922
	0,7	33,7684	39,5792	0,623656	2,91413	105,922	8,49213	-1,11737	1,60609	4233,6	0,853185

На рис. 3 и 4 представлены дифференциальные и интегральные кривые распределения дисперсного состава пшеничной муки высшего сорта, разделенной в вихревом классификаторе при

общем расходе газа $V=400 \text{ м}^3/\text{ч}$ и различных значениях кратности расходов k и относительной высоте камер H_2/H_3 [11].

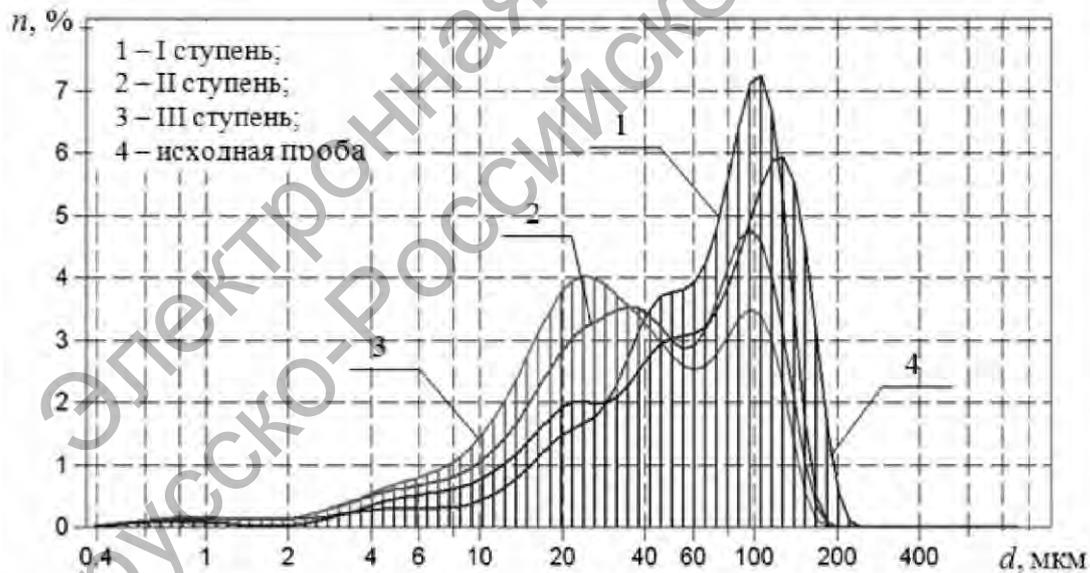


Рис. 3. Дифференциальные кривые распределения дисперсного состава пшеничной муки высшего сорта, разделенной в вихревом классификаторе при общем расходе газа $V=400 \text{ м}^3/\text{ч}$, $k = 0,6$ и $H_2/H_3=40/40 \text{ мм}$

Комплексный анализ дифференциальных кривых распределения (рис. 3) показал, что в результате разделения пшеничной муки в вихревом классификаторе проба материала после первой ступени характеризуется большим содержанием более крупных частиц, чем в исходном материале. Так для диаметра частиц 110 мкм их содержание

после первой ступени составляет 7,3 %, а в исходном материале 5,2 %. При этом доля мелкой фракции уменьшилась.

В пробах материала после второй и третьей ступеней разделения увеличивается содержание мелкой фракции. Это объясняется тем, что на каждой предыдущей ступени отделяются, в

основном, крупные частицы, а большая центробежная сила последующей ступени с меньшим поперечным сечением обеспечивает отделение частиц меньшего размера.

Анализ дифференциальных кривых

распределения, полученных при других соотношениях исследуемых параметров, также показал, что наиболее крупная фракция пшеничной муки отделяется на первой ступени вихревого классификатора.

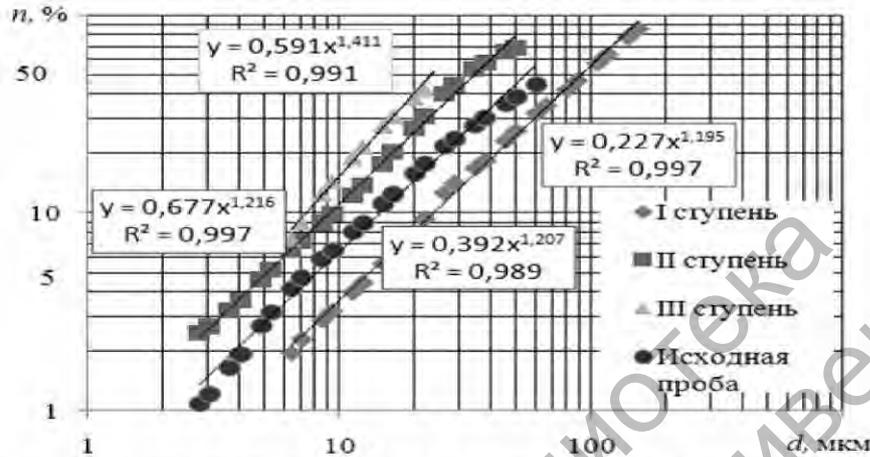


Рис. 4. Интегральные кривые распределения дисперсного состава пшеничной муки высшего сорта, разделенной по ступеням вихревого классификатора при общем расходе газа $V = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$, $k = 0,4$ и $H_2/H_3 = 90/80 \text{ мм/мм}$

Из анализа распределения дисперсного состава пшеничной муки, разделенной в вихревом классификаторе (рис. 4) при относительной высоте камер $H_2/H_3=90/80 \text{ мм}$ и $k=0,4$ следует, что для 50 % содержания частиц в пробах, на I, II и III ступенях их диаметры соответственно имеют значения 90 мкм, 35 мкм и 23 мкм. При этом для пробы исходного материала диаметр частиц равен 55 мкм. Сравнивая распределение проб исходного

материала и после I ступени, установлено, что происходит увеличение размера частиц в пробе, а с переходом к последующей ступени происходит его уменьшение. Это объясняется наибольшей степенью выделения крупной фракции на первой ступени, следовательно, на каждую последующую ступень поступает материал, содержащий большую долю мелкой фракции.

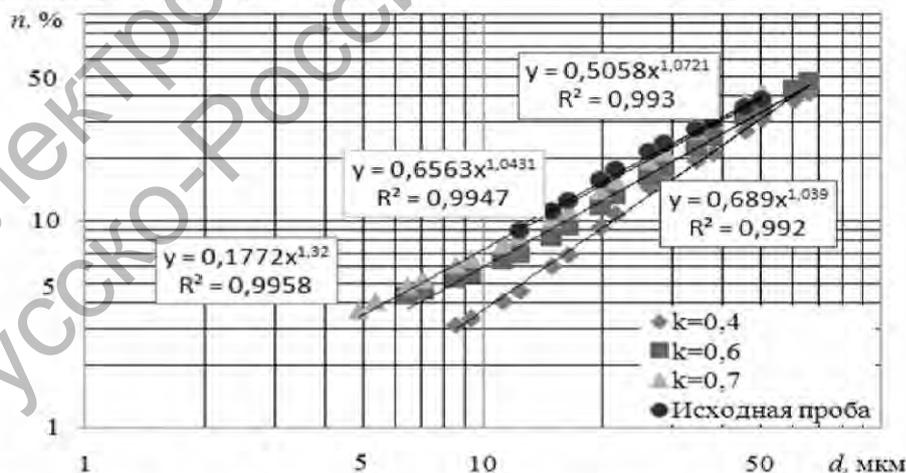


Рис. 5. Интегральные кривые распределения дисперсного состава пшеничной муки высшего сорта, отобранной после I ступени вихревого классификатора при общем расходе газа $V = 400 \text{ м}^3/\text{ч}$, относительной высоте $H_2/H_3 = 40/40 \text{ мм}$ и различных значениях кратности расходов k

В результате экспериментальных исследований, установлено, что содержание частиц определённого размера в отобранных пробах по ступеням увеличивается с увеличением кратности расходов. Так на I ступени при $k=0,4$ содержание

частиц диаметром 50 мкм составляет 31 %, а с увеличением кратности до $k=0,6 - 35 \%$, при $k=0,7 - 39 \%$ (рис. 5). Проба исходного материала характеризуется 40 % содержанием частиц данного диаметра.

Совпадение интегральных кривых распределения частиц по размерам для проб исходного материала и отобранного на первой ступени вихревого классификатора свидетельствует о высокой эффективности разделения первой ступени (рис. 5).

Выводы

Общим результатом работы является разработка нового способа вихревой классификации и устройства для его реализации на основе взаимодействующих вихревых потоков, в котором через периферийный поток подают газозвесь и по ходу его нисходящего вращения вдоль вертикальной оси вихревого классификатора

ступенчато уменьшают в диаметре путем выполнения цилиндрического корпуса, по меньшей мере, из трех цилиндрических обечайек с возможностью их взаимного осевого перемещения. При этом вихревой классификатор является аппаратом с управляемой гидродинамикой, что позволяет изменять его режимно-конструктивные параметры в зависимости от свойств разделяемого материала.

Результаты проведенных экспериментальных исследований положены в основу режимно-конструктивной оптимизации вихревого классификатора и определения рациональных режимов его работы в условиях управляемой гидродинамики.

Список литературы:

1. Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация порошков: производственное издание / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков. – Москва: «Химия», 1989. – 83 с.
2. Мизонов, В.Е. Аэродинамическая классификация тонко дисперсных сыпучих материалов и оборудование для ее реализации / В.Е. Мизонов, С.Г. Ушаков // Хим. и нефт. машиностроение. – 1992. – №1. С. 7-12.
3. Шевчук, С.В. Классификация тонкодисперсных материалов в аппарате с вращающейся зоной разделения: автореф. дис... канд. техн. наук: 05.17.08 / С.В. Шевчук; Санкт-Петербургский, гос. технич. ун-т. – С.Пб., – 2007. – 20 с.
4. Барский, М. Д. Фракционирование порошков / М.Д.Барский. – М.: Недра. – 1980. – 327 с.
5. Сажин, Б.С. Вихревые пылеуловители / Б.С. Сажин, Л.И. Гудим. – Москва: Химия, 1995. – 144 с.
6. Акулич, А.В. Разработка и исследование новых установок для классификации полидисперсных материалов / А.В. Акулич, М.А. Киркор, В.М. Лустенков // Вестник МГУП. – 2013. – № 1 (14). – С. 76–80.
7. Способ вихревой классификации дисперсных материалов на фракции в классификаторе: пат. 18154 Респ. Беларусь, МПК2006 В07В 7/08 / А.В. Акулич, В.М. Лустенков, заявитель Могил. гос. ун-т продовольствия.– № а 20111551; заявл. 21.11.2011; опубл. 30.06.2012 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці.– 2014.
8. Зеленкевич, А.Г. Разработка способа вихревой классификации дисперсных материалов / А.Г. Зеленкевич, Ю.В. Третьякевич, Ю.И. Гриневич: тезисы докладов VIII Междунар. науч. конф. студентов и аспирантов, Могилев, 26–27 апреля 2012 г. / Могил. гос. ун-т продовольствия; редкол.: А.В. Акулич (отв. ред.) [и др.]. – Могилев, 2012. – 35 с.
9. Коузов, П.А. Основы анализа дисперсного состава промышленных пылей и измельченных материалов / П.А. Коузов. – Л.: Химия, 1974. – 280 с.
10. Ушаков, С.Г. Алгоритм построения кривых разделения процессов классификации / С.Г. Ушаков, Ю.Н. Муромкин // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 1977. - Т.20, №4. - С. 604-605.
11. Акулич, А. В. Исследование фракционной эффективности вихревого классификатора / А. В. Акулич, В.М. Лустенков, В.М. Акулич, Ю.А. Кадрова, А.Л. Кожевникова: материалы IX международной научно-технической конференции «Техника и технология пищевых производств», Могилев, 25–26 апреля 2013 г. / Учреждение образования «Могил. гос. ун-т продовольствия»; редкол.: А.В. Акулич (отв. Ред.) [и др.]. – Могилев, 2013. – С. 246.