

УДК 66.067.122.2:66.067.15

Самоочищающийся фильтр на основе магнитоуправляемых частиц

Канд. техн. наук **И.А. Шорсткий**, i-shorstky@mail**К.Ю. Савенков**, kirsavenkov@mail.ru*Кубанский государственный технологический университет
350072, Россия, Краснодар, ул. Московская, 2*

Обсуждены основные проблемы использования и управления осадкообразованием для повышения эффективности процесса фильтрации. Предложена конструкция и описан принцип работы самоочищающегося фильтра на основе магнитоуправляемых частиц. В качестве основного подхода к разработке конструкции рассмотрен метод управления структурой массива частиц внешним вращающимся магнитным полем. Показана возможность создания динамичной пористой структуры фильтроэлемента с плотной упаковкой частиц, а также процесс самоочистки установки, не требующей дополнительных инженерных коммуникаций. На основе данных рентгенографического анализа получен состав используемых микрочастиц фильтроэлемента, определенных как оксид железа Fe_3O_4 . С использованием сканирующего электронного микроскопа были получены изображения пористой структуры фильтроэлемента. Полученные результаты станут основой для проведения ряда исследований по определению функциональных возможностей разработанной установки, а также для подтверждения или опровержения гипотезы об изменении показателей качества пищевых сред при прохождении через предлагаемый фильтроэлемент с динамичной пористой структурой.

Ключевые слова: фильтровальные материалы; самоочищающийся фильтр; управление осадкообразованием; микрофильтрация; вращающееся магнитное поле; микросферические частицы; фильтроэлемент.

DOI: 10.17586/2310-1164-2017-10-4-20-26

Self-cleaning filter based on magnetically controlled particles

Ph.D. **Ivan A. Shorstky**, i-shorstky@mail**Kirill Yu. Savenkov**, kirsavenkov@mail.ru*Kuban State University of Technology
2, Moskovskaya str., Krasnodar, 350072, Russia*

The main problems of sedimentation using and control to improve efficiency of filtration process are discussed. To solve the problem of precipitation a new machine design is proposed and the principle of the self-cleaning filter operation, based on magnetically controlled particles, is described. As a basic mechanism for machine design a method of particles array structure control by external rotating magnetic field is proposed. The results of research show the possibility of creating a dynamic porous filter cake structure with close packing of particles, as well as the self-cleaning process of filter machine, that does not require additional engineering communications. Based on the X-ray analysis data the composition of the microparticles of filter cake is defined as Iron Oxide Fe_3O_4 . SEM-images of porous structure of the filter cake were obtained using a scanning electron microscope. Results of current work serve as the basis for conducting further researchers related to determining the functionality parameters of filter machine, as well as confirming or refuting the hypothesis of the influence on the quality of food media when their passing through the filter cake with a dynamic porous structure.

Keywords: filtering materials; self-cleaning filter; sedimentation control; microfiltration; rotating magnetic field; microspheroidal particles; filter element.

Введение

Микрофильтрация – широко распространенный процесс очистки различного рода жидкостей от взвешенных частиц в технологиях осветления, пастеризации и стерилизации соков [1], вин [2], пива [3], молочных продуктов, а также в процессах водоподготовки.

В наиболее часто применяемом процессе фильтрации с использованием полупроницаемых мембран пропускаемые через капилляры мембраны компоненты раствора удаляются из напорного канала, тогда как задерживаемые компоненты собираются на поверхности мембран, что приводит к концентрационной поляризации. В такой системе за счет возрастания осмотического давления

и гидравлического сопротивления осадка, концентрационная поляризация и слой осадка уменьшают движущую силу процесса, что негативно сказывается на эффективности мембранных процессов.

При разработке фильтрационных установок основные усилия направлены на выполнение следующих задач:

- удельное сопротивление осадка должно быть минимальным;
- адсорбция частиц на поверхность фильтроэлемента так же, как и взаимодействие частиц друг с другом в пограничном слое должны быть минимальны;
- уменьшение концентрационной поляризации и осаждения частиц за счет механизмов внешнего воздействия на фильтроэлемент.

На основании этих задач в истории развития фильтрационного оборудования появились самоочищающиеся фильтры. Процесс самоочистки или уменьшения концентрационной поляризации и толщины слоя осадка в таких фильтрах выполняется путем обратной промывки или с использованием механических щеток – сканера [4, 5]. К самоочищающимся фильтрам также относят гидродинамические фильтры с неподвижным фильтроэлементом типа «цилиндр в цилиндре» [6] и фильтры, использующие наложение внешних физических сил [7]. В качестве внешних физических воздействий могут выступать механические колебания [8], направленное ультразвуковое колебание на фильтроэлемент, аэрирование и другие воздействия.

Одной из проблем микрофильтрации, отмеченной в работе [9], является фиксированный размер пор. Причина низкой эффективности прочистки заключается в том, что пористая структура не меняется при фильтрации и прочистке. В результате осадок, забивающий поры, почти невозможно удалить [10]. На основании описанных задач и проблем предложена фильтрационная установка самоочищающегося фильтра с динамичной капиллярной структурой фильтроэлемента на основе магнитоуправляемых частиц.

Термин магнитоуправляемых частиц приобрел широкое применение в области транспортировки лекарственных препаратов. Такие частицы, как правило, изготавливают из композиционных материалов на основе ферромагнитных нанопорошков [11], легко поддающихся манипуляциям внешних магнитных полей. Вращающееся магнитное поле (ВМП) в данной работе представляет собой систему постоянных магнитов, вращающихся вокруг общей оси. Воздействие вращающегося магнитного поля на отдельные цепочки ферромагнитных частиц глубоко изучено [12–14], однако не изучены данные воздействия на объемный массив частиц. Если внести магнитные частицы внутрь ВМП, то частицы увлекаются за перемещением магнитного поля, формируя при этом массив, напоминающий свернутую в рулон бумагу. На основе данного эксперимента построена гипотеза о возможности формирования объемных динамичных массивов частиц одинакового размера с заданной структурой упаковки в качестве фильтроэлемента представляемой фильтрационной установки.

Материалы и методы исследований

Материал фильтроэлемента. В качестве микросферических частиц фильтроэлемента использовались ферромагнитные частицы сферической формы со средним размером 60 ± 10 мкм (рисунок 1). Исследования фазового состава исходных частиц были проведены в ФГБОУ ВО «КубГУ» г. Краснодар. Для определения фазового состава образцов использовался рентгенофазовый анализ (РФА) на дифрактометре Shimadzu XRD-7000 S (Япония). Использовалось $\text{CuK}\alpha$ излучение ($\lambda = 1,541 \text{ \AA}$). Диапазон углов 2θ составлял от 5 до 80° . Напряжение на трубке 40 кВ ; ток – $0,03 \text{ А}$. Шаг сканирования $0,02^\circ$. Идентификация фаз проводилась с использованием базы данных PDF-2. Математическая обработка дифрактограмм осуществлялась с помощью ПО Shimadzu.

При анализе рентгенограммы исследуемых образцов частиц было установлено, что значительная часть вещества находится в рентгенаморфном состоянии. По результатам РФА можно сделать вывод, что исследуемые образцы содержат фазы металлического железа. При сравнении с базой данных PDF-2 и PDF-4 исследуемый материал был определен как Iron Oxide (Fe_3O_4). Использование микросферических частиц фильтроэлемента размером от 10 мкм позволяет формировать капиллярную структуру диаметром капилляров от 1 мкм , через которые будет проходить фильтруемое вещество.

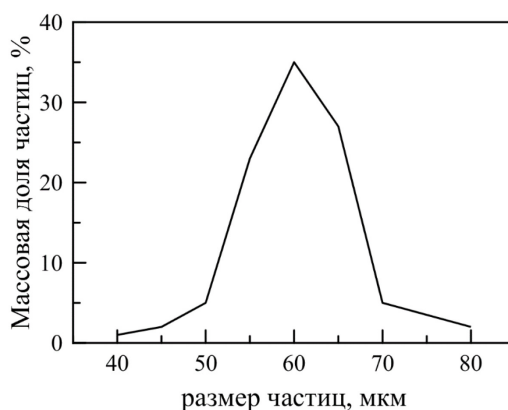


Рисунок 1 – Функция распределения сферических частиц по диаметру

Fig 1 – The distribution of spherical particles according their diameter

Конструкция установки. Конструктивно установка фильтра состоит из платформы, цилиндрической трубы, насадки с постоянными магнитами и двумя шаговыми электродвигателями и пункта управления [15]. В качестве основного сосуда использовалась стеклянная труба 1 (рисунок 2). Дополнительными элементами системы являются насос для подачи фильтруемой жидкости и источник питания для электродвигателей.

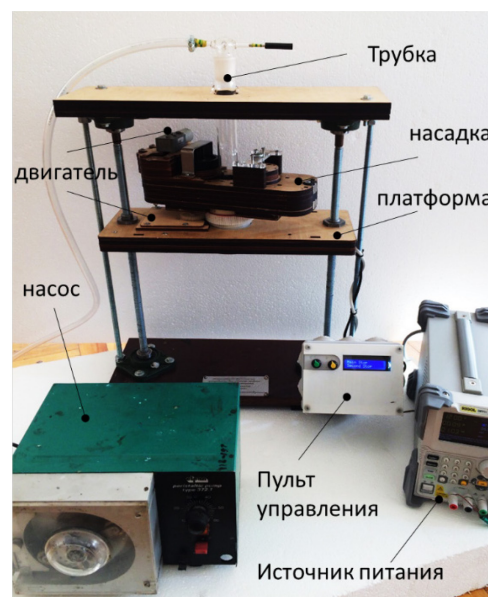
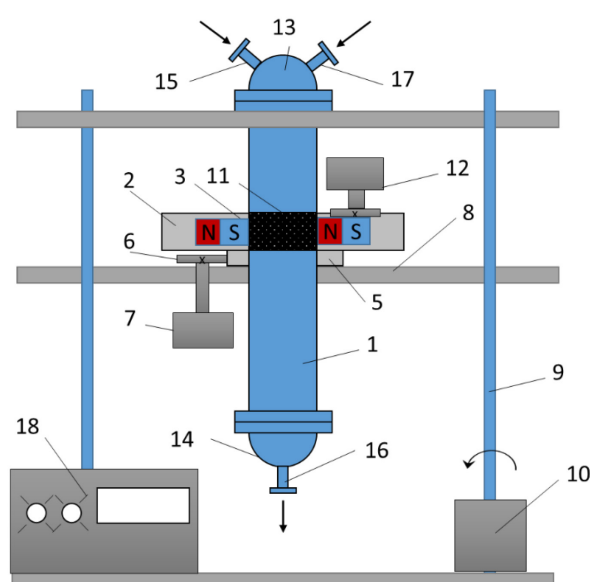


Рисунок 2 – Схема установки (слева) и фильтрационная установка (справа)

Fig. 2 – filtration plant diagram (left) and filtration plant (right)

С внешней стороны трубы 1 расположена цилиндрическая насадка 2, с диаметрально противоположно расположенными в ней двумя постоянными магнитами 3, и механический переключатель полюсов постоянного магнита 12. Цилиндрическая насадка имеет зубчатую передачу 5, через нее она соединена с зубчатым колесом 6, соединенным с электродвигателем 7, которые установлены на двигающейся возвратно-поступательно платформе 8 с помощью шпильки 9, управляемой электродвигателем 10. Внутри корпуса помещен ферромагнитный порошок 11. Корпус содержит крышку загрузки ферромагнитного порошка 13, и крышку выгрузки 14 для удаления фильтрующего элемента. Также корпус снабжен патрубками 15 и 16 для подачи неочищенных и выпуска очищенных веществ. Для обслуживания фильтрующего элемента, корпус содержит промывочный патрубок 17. Контроль электродвигателей осуществляется с помощью пульта управления 18. Постоянные магниты обеспечивают создание внешнего вращающегося магнитного поля вокруг трубы. Неодимовые магниты закреплены в насадке и тесно контактируют торцевой поверхностью с трубой.

Перед началом работы установки частицы 11 засыпаются в трубу и улавливаются магнитным полем постоянных магнитов 3. Благодаря наложению фактора вращения на цилиндрическую насадку 2 металлические частицы фильтроэлемента перестраиваются из волокнистой диспергированной в плотную

упаковку, формируя капиллярную структуру. Фильтрационная установка работает следующим образом: неочищенное вещество со взвешенными частицами под давлением через патрубок 15 подается в трубу 1, где проходит через слой сферических частиц, удерживаемых постоянным магнитным полем и освобождается от частиц твердых загрязнений, чей размер больше размера капилляров фильтроэлемента. Далее очищенное вещество удаляется из фильтра через патрубок выгрузки 16.

Наличие механического переключателя 12 в виде шагового двигателя для смены полярности одного из постоянных магнитов путем вращения обеспечивает функцию самоочистки или сброса осадка, которая заключается в следующем. В процессе фильтрации твердые загрязнения закупоривают поры, увеличивая в свою очередь гидравлическое сопротивление фильтроэлемента. При достижении критического значения разности давлений на входе и выходе фильтроэлемента происходит запуск работы механического переключателя 12. Вращение насадки прекращается, происходит смена полярности одного из магнитов с помощью электродвигателя путем вращения постоянного магнита, установленного на подшипниковом узле. Происходит смена полярности, при этом частицы фильтроэлемента продолжают удерживаться магнитной силой вдоль стенки трубы, разрушая только структуру укладки частиц, как показано на рисунке 3. Начинается очистка промывкой путем ввода очистительной жидкости в том же направлении, что и фильтруемое вещество. Данный фактор позволяет избежать использования противоточной системы очистки и сопровождающих ее инженерных коммуникаций. После окончания промывки полярность магнита возвращается в исходное положение, восстанавливается структура укладки частиц и фильтр возобновляет процесс фильтрации.

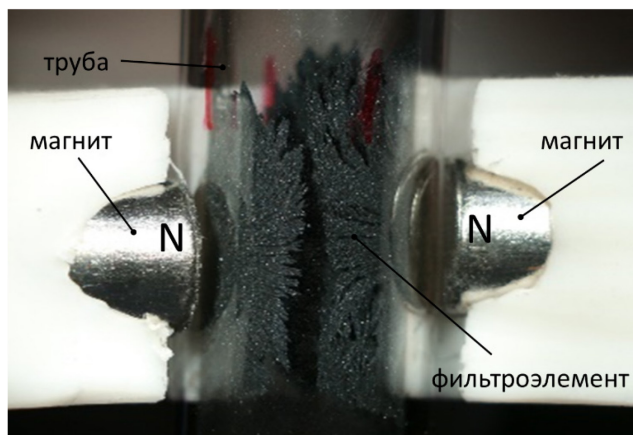


Рисунок 3 – Смена полярности магнитов N-N вокруг фильтроэлемента
 Fig. 3 – The changes of magnet polarity (N-N) around filter element

Визуализация формирования фильтроэлемента. В качестве инструмента для визуализации движения частиц использовалась цифровая камера Canon EOS 70D со скоростью съемки 7 кадров в секунду [16]. Для фотофиксации изменения структуры фильтроэлемента использовался режим фото серии с разрешением 5472 на 3648 пикселей и временным интервалом 500 мс. Для видеофиксации перехода структуры массива волокнистой в плотно упакованную, использовался видеорежим фронтальной и поверхностной камеры с разрешением 1920 на 1080. Для фронтальной съемки из цилиндрической насадки был вырезан сектор под углом 120°. Полученные изображения и видеоматериалы движения частиц записывались на компьютер, где в последующем обрабатывались в фото- и видео редакторе (Vegas Pro 13.0, Sony).

Метод сканирующей электронной микроскопии использовался для анализа структуры укладки частиц фильтроэлемента. Изображения были получены на электронном сканирующем микроскопе (JSM 6300, Jeol).

В таблице представлена динамика изменения структуры укладки частиц фильтроэлемента за один оборот насадки. Процесс изменения зафиксирован поверхностной и фронтальной камерами. При отсутствии вращательного движения насадки частицы выстраиваются вдоль силовых линий магнитного поля, формируя диспергированную структуру в виде волокон (таблица, угол поворота 0°).

При возникновении процесса вращения насадки с постоянными магнитами вокруг цилиндрической трубы происходит уплотнение сферических частиц с равномерным распределением плотности частиц

в объеме фильтроэлемента, и поверхность фильтроэлемента приобретает равномерную структуру. Одного оборота насадки достаточно для формирования структуры частиц фильтроэлемента. При этом стоит отметить, что за счет вращения насадки происходит постоянное изменение структуры пор фильтроэлемента, что положительно влияет на эффективность процесса фильтрации.

Таблица – Динамика изменения структуры массива микросферических частиц во ВМП
 Table – The changes of microspheric particles in RMF

Угол поворота	Линии магнитных частиц	Поверхностная камера	Фронтальная камера
0°		(1)	
30°		(2)	
60°		(3)	
120°		(4)	
180°		(5)	
360°		(6)	

Переход от диспергированной волокнистой структуры частиц фильтроэлемента к плотной упаковке за счет наложения ВМП также зафиксирован по данным фронтальной камеры. На изображениях таблицы представлены изменения высоты слоя фильтроэлемента. В начальном состоянии высота слоя частиц максимальная и соответствует двум диаметрам сосуда, где преобладает волокнистая структура частиц фильтроэлемента (таблица, угол поворота 0°) вдоль силовых линий магнитного поля. При вращении насадки высота слоя частиц уменьшается, а частицы уплотняются.

Таким образом, получаемый фильтроэлемент предлагаемой установки является динамичной пористой структурой (рисунок 4), что является важной составляющей процесса фильтрации.

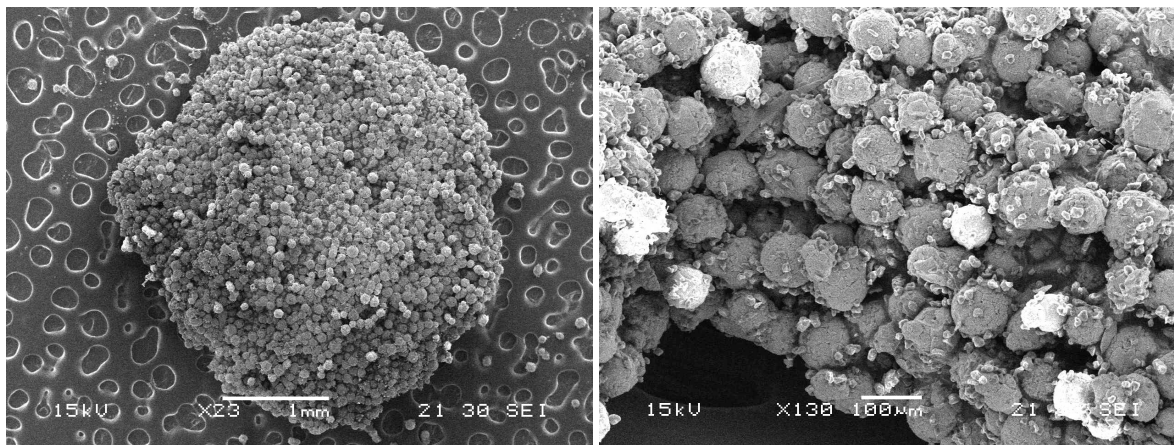


Рисунок 4 – SEM-изображение фильтроэлемента при 23 кратном увеличении (слева) и слою частиц в структуре фильтроэлемента (справа)

Fig. 4 – SEM picture of filter element at 23x magnification (left) and particle layers in filter element structure (right)

Получаемая динамичная пористая структура фильтроэлемента служит основанием для выдвижения гипотезы о возможных положительных изменениях качества пропускаемой через фильтроэлемент среды.

Заключение

Возможность управления и манипулирования упорядоченными массивами частиц фильтроэлемента при наложении ВМП представляет интерес в области фильтрации жидких пищевых сред. Представленная функция самоочистки фильтра обладает следующими основными преимуществами: подача очистительной жидкости по направлению основного очищаемого потока; отсутствие дополнительных инженерных коммуникаций для процесса фильтрации по сравнению с существующими видами фильтров; возможность изменения диапазона фильтрования от 1–100 мкм без изменения основы установки. Однако наряду с преимуществами установка имеет ряд недостатков: высокое гидравлическое сопротивление фильтроэлемента и ограниченность производительности установки.

Дальнейшим направлением исследований данного вида фильтрационного оборудования представляется в областях исследования качественных показателей пищевых и непищевых сред, в частности в процессе водоподготовки.

Литература

1. Водяков В.Н., Кувшинова О.А., Кузнецов В.В., Паксеваткин Е.Н. Анализ нестационарного процесса проточной микрофильтрации соков //Хранение и переработка сельхозсырья. 2013. №. 5. С. 11–14.
2. El Rayess Y., Albasi, C., Bacchin, P., Taillandier, P., Mietton-Peuchot, M., & Devatine, A. Analysis of membrane fouling during cross-flow microfiltration of wine. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012, V. 16, pp. 398–408.
3. Кретов И.Т., Шахов С.В., Попов Е.С., Потапов А.И. Исследование процесса отделения пива от суспензии избыточных дрожжей на установке с тангенциально-поточной микрофильтрацией //Вестник Воронежского государственного университета инженерных технологий. 2010. №. 1. С. 38–41.
4. Исакиева О.Г., Крищенко Е.А. Самоочищающиеся фильтры //Науковий вісник будівництва. 2014. №. 4. С. 201–204.
5. Yao L., He J. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology—From surface engineering to functional surfaces. *Progress in Materials Science*. 2014, V. 61, pp. 94–143.
6. Финкельштейн З.Л., Финкельштейн Л.З. Опыт применения фильтров сверхвысокой производительности для очистки промышленных стоков //Вестник МАНЭБ. 2003. Т. 8. №. 5. С. 94–97.
7. Sutherland K.S., Chase G. *Filters and filtration handbook*. Elsevier Science, 2011. 520 p.
8. Максимов Н.П., Мазко А.И. Теоретические основы расчета пропускной способности по жидкой фазе фильтрующего элемента вибрационного фильтра сгустителя // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2000. № 2. С. 198–200.
9. Мусеев Т.С., Солдатов К.В. Конструкция и принцип работы микрофильтров с переменной структурой пор //Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2017. №. 1-1. С. 77–82.
10. Tan X., Qixin Z.H.U., Xu Chen, Wenping L.I. Equivalent cake filtration model. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2008. V. 16, no. 2, pp. 214–217.

11. Галанов А.И., Юрмазова Т.А., Савельев Г.Г., Булдаков М.А., Рудык Ю.В., Литвяков Н.В., Нечаев К.А., Тузиков С.А., Чердынцева Н.В., Яворовский Н.А. Разработка магнитоуправляемой системы для доставки химиопрепаратов на основе наноразмерных частиц железа // Сибирский онкологический журнал. 2008. №3. С 50–57.
12. Gao Y., Hulsen M.A., den Toonder J.M.J. Dynamics of rotating magnetic micro-bead chains. *14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science*. Groningen; Netherlands; October, 2010, V. 2, pp. 1055–1057.
13. Li Y.H., Chen C.Y., Sheu S.T., Pai J.M. Dynamics of a microchain of superparamagnetic beads in an oscillating field. *Microfluidics and nanofluidics*. 2012. V. 13, no. 4, pp. 579–588.
14. Promislow J.H.E., Gast A.P., Fermigier M. Aggregation kinetics of paramagnetic colloidal particles. *J. Chem. Phys.*, 1995, V. 102(13), pp. 5492–5498.
15. Шорсткий И.А. Динамическое фильтрующее устройство: патент 2544695 Российская Федерация. 2013.
16. Шорсткий И.А., Савенков К.Ю. Магнитная фильтрация с регулируемой скважностью под воздействием внешнего магнитного поля. Научные труды Кубан. гос. техн. ун-та. 2014. № 1. С. 96–103.

References

1. Vodyakov V.N., Kuvshinova O.A., Kuznetsov V.V., Paksevatkin E.N. Analiz nestatsionarnogo protsessa protochnoi mikrofil'tratsii sokov [Analysis of the non-stationary process of flowing microfiltration of juices] *Storage and processing of agricultural raw materials*. 2013, no. 5, pp. 11–14.
2. El Rayess Y., Albasi, C., Bacchin, P., Taillandier, P., Mietton-Peuchot, M., & Devatine, A. Analysis of membrane fouling during cross-flow microfiltration of wine. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2012, V. 16, pp. 398–408.
3. Kretov I.T., Shakhov S.V., Popov E.S., Potapov A.I. Issledovanie protsessa otdeleniya piva ot suspenzii izbytochnykh drozhzhei na ustanovke s tangentsial'no-potochnoi mikrofil'tratsiei [Investigation of the process of beer separation from a suspension of excess yeast in a plant with tangential-flow microfiltration]. *Bulletin of Voronezh State University of Engineering Technologies*. 2010, no. 1, pp. 38–41.
4. Isakieva O.G., Krishchenko E.A. Samoochishchayushchiesya fil'try [Self-cleaning filters]. *Scientific Herald of Construction*. 2014, no. 4, pp. 201–204.
5. Yao L., He J. Recent progress in antireflection and self-cleaning technology—From surface engineering to functional surfaces. *Progress in Materials Science*. 2014, V. 61, pp. 94–143.
6. Finkel'shtein Z. L., Finkel'shtein L. Z. Opyt primeneniya fil'trov sverkhvysokoi proizvoditel'nosti dlya ochistki promyshlennykh stokov [Experience with ultra-high performance filters for industrial effluent treatment]. *Westnik IAELPS*. 2003, V. 8, no. 5, pp. 65.
7. Sutherland K.S., Chase G. *Filters and filtration handbook*. Elsevier Science, 2011. 520 p.
8. Maksimov N.P., Mazko A.I. Teoreticheskie osnovy rascheta propusknoi sposobnosti po zhidkoi faze fil'truyushchego elementa vibratsionnogo fil'tra sgustitelya [Theoretical basis for calculating the throughput through the liquid phase of the filter element of the thickener vibration filter]. *Mining Informational and Analytical Bulletin*. 2000, no. 2, pp. 198–200.
9. Museev T.S., Soldatov K.V. Konstruktsiya i printsip raboty mikrofil'trov s peremennoi strukturoi por [Construction and the principle of operation of microfilters with variable structure of pores]. *Actual problems of the humanities and natural sciences*. 2017, no. 1-1, pp. 77–82.
10. Tan X., Qixin Z.H.U., Xu Chen, Wenping L.I. Equivalent cake filtration model. *Chinese Journal of Chemical Engineering*. 2008. V. 16, no. 2, pp. 214–217.
11. Galanov A.I., Yurmazova T.A., Savel'ev G.G., Buldakov M.A., Rudyk Yu.V., Litvyakov N.V., Nechaev K.A., Tuzikov S.A., Cherdyntseva N.V., Yavorovskii N.A. Razrabotka magnitoupravlyaemoi sistemy dlya dostavki khimiopreparatov na osnove nanorazmernykh chastits zheleza [Development of a magnetically controlled system for the delivery of chemotherapy drugs based on nanoscale iron particles]. *Siberian Oncological Journal*. 2008, no. 3, pp. 50–57.
12. Gao Y., Hulsen M.A., den Toonder J.M.J. Dynamics of rotating magnetic micro-bead chains. *14th International Conference on Miniaturized Systems for Chemistry and Life Science*. Groningen; Netherlands; October, 2010, V. 2, pp. 1055–1057.
13. Li Y.H., Chen C.Y., Sheu S.T., Pai J.M. Dynamics of a microchain of superparamagnetic beads in an oscillating field. *Microfluidics and nanofluidics*. 2012. V. 13, no. 4, pp. 579–588.
14. Promislow J.H.E., Gast A.P., Fermigier M. Aggregation kinetics of paramagnetic colloidal particles. *J. Chem. Phys.*, 1995, V. 102(13), pp. 5492–5498.
15. Шорсткий И.А. *Динамическое фильтрующее устройство* [Dynamic filtering device]. Patent RF 2544695, 2013.
16. Шорсткий И.А., Савенков К.Ю. Магнитная фильтрация с регулируемой скважностью под воздействием внешнего магнитного поля [Magnetic filtering with adjustable duty cycle under the influence of an external magnetic field]. *Scientific works of Kuban State Technical University*. 2014, no 1, pp. 96–103.