

DOI: 10.15593/2224-9400/2020.1.08

УДК 66-9

А.Г. Старостин, О.А. Федотова, А.Р. КобелеваПермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия**ОЧИСТКА СТОЧНЫХ ВОД ОТ МЕЛКОДИСПЕРСНЫХ
ЧАСТИЦ НА ГИДРОЦИКЛОНЕ**

Представлены результаты поисковых и лабораторных исследований по разработке способа очистки оборотной воды с целью снижения количества питающей и сбрасываемой воды при работе водокольцевых насосов на участке разгрузки фторида кальция. Основные достоинства гидроциклонов – высокая производительность и небольшие габаритные размеры.

Благодаря несложной конструкции гидроциклонам присуща и простота в эксплуатации. Кроме того, они энергонезависимы и имеют относительно невысокую стоимость. Большинству гидроциклонов не нужны расходные материалы. При их работе не производятся замена или регенерация фильтрационной среды. Техническое обслуживание гидроциклонов не требует сложного оборудования и квалифицированного персонала. По своим техническим возможностям гидроциклоны могут конкурировать с другими методами водоочистки, имея перед некоторыми из них неоспоримые преимущества. Так, по сравнению с отстаивниками, гидроциклоны не требуют значительных площадей под установку.

В качестве объекта исследования использовали воду с частицами взвеси фторида кальция с концентрацией 1–5 г/л при нормальном режиме работы. Частицы взвеси под действием силы тяжести оседают в коллекторе канализации, забивают фильтры при очистке. Большая часть мелких частиц уносится с водой.

Для определения наиболее эффективного способа очистки оборотной воды от взвеси плавикового шпата проведены лабораторные исследования по изучению granulometricheskogo, fazovogo состава плавикового шпата и наиболее доступных способов очистки воды гравитационным осаждением и осаждением под действием центробежной силы в гидроциклоне.

Определение размеров и внешнего вида частиц фторида кальция проводили методом фотомикроскопического анализа на микроскопе CarlZeiss AxioImager M2.m с использованием светофильтра «темное поле» для снижения бликов при фотосъемке.

Ключевые слова: сточная вода, фторид кальция, осаждение, гидроциклон, очистка, взвешенные частицы.

A.G. Starostin, O.A. Fedotova, A.R. Kobeleva

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

HYDROCYCLONE WASTEWATER TREATMENT FROM FINE PARTICLES

The article shows the results of exploratory research and laboratory studies to develop a wastewater treatment method. The aim of the method is to reduce the amount of feed water and spill water when liquid-ring pumps on calcium fluoride ejection station are in work. The main advantages of hydrocyclones are high performance and small overall dimensions.

Due to its simple design, hydrocyclones are also characterized by ease of use. In addition, they are non-volatile and have a relatively low cost. Most hydrocyclones do not need consumables. During their operation, no replacement or regeneration of the filtration medium is made. Maintenance of hydrocyclones does not require sophisticated equipment and qualified personnel. According to their technical capabilities, hydrocyclones can compete with other water treatment methods, having undeniable advantages over some of them. So, in comparison with sedimentation tanks, hydrocyclones do not require significant areas for installation.

As the object of study used water with particles of a suspension of calcium fluoride with a concentration of 1-5 g / l during normal operation. Particles of suspension under the influence of gravity settle in the sewer collector, clog filters when cleaning. Most of the fine particles are carried away with water.

Granulometric and phase composition of calcium fluoride and the most accessible methods of wastewater treatment by gravitation settling and by centrifugal force setting in hydrocyclone were studied in the laboratory to determine the most effective method for wastewater treatment from calcium fluoride suspension.

Microscopic analysis was made with «CarlZeiss AxioImager M2.m» microscope using a dark field filter to reduce glares during photography. The aim of the analysis was to determine the size and appearance of calcium fluoride particles.

Keywords: waste water, calcium fluoride, precipitation, hydro cyclone, purification, suspended particles.

Темпы потребления водных ресурсов промышленными предприятиями ускоряются с каждым годом. За последнее время возросли требования не только к объему и качеству сбрасываемой воды, но и к стоимости ее очистки перед сбросом. По этой причине возврат отработанной воды в технологический цикл, разработка и внедрение эффективных и недорогих в обслуживании систем очистки позволяют значительно сократить водопотребление и объем сбрасываемых стоков, снизить затраты на водоочистку [1–3].

Для удаления взвешенных частиц из сточных вод используют гидромеханические процессы, отстаивания и фильтрования [2–6]. Вы-

бор метода зависит от размера частиц, их физико-химических свойств и концентрации, расхода сточных вод и необходимой степени очистки.

В зависимости от размера частиц дисперсные системы делят на три группы:

1) грубодисперсные системы с частицами размером более 0,1 мкм (суспензии и эмульсии);

2) коллоидные системы с частицами размером до 0,1 мкм (1 нм);

3) истинные растворы, содержащие частицы, размеры которых соответствуют размерам отдельных молекул или ионов.

Отстаивание применяют для осаждения из сточных вод грубодисперсных примесей. Осаждение происходит под действием силы тяжести [3]. Для проведения процесса используют песколовки, отстойники и осветлители [3–5]. Песколовки применяют для предварительного выделения загрязнений с размером частиц 1,2–0,25 мм. Отстойники используют для выделения из сточных вод твердых частиц размером менее 0,25 мм.

Очистку сточных вод от взвешенных частиц можно также производить в поле действия центробежных сил. Этот процесс осуществляется в открытых или напорных гидроциклонах и центрифугах [5].

В отличие от центрифуг и центробежных насосов вращательное движение жидкости в гидроциклонах осуществляется не за счет вращения частей этих аппаратов, а посредством тангенциального введения потока в корпус аппарата, имеющего коническую форму, при этом происходит увеличение скорости вращения [2–9]. В этот момент частицы механических примесей и взвесь отбрасываются к стенкам и перемещаются по спиральной траектории по конической поверхности к вершине конуса, а затем попадают в камеру сбора примесей. В то же время осветленный поток перемещается к центру вращения, где находится зона разрежения, и выводится из аппарата.

Основные достоинства гидроциклонов – высокая производительность и небольшие габаритные размеры [10–21]. Благодаря несложной конструкции гидроциклонам присуща и простота в эксплуатации. Кроме того, они энергонезависимы и имеют относительно невысокую стоимость. Большинству гидроциклонов не нужны расходные материалы. При их работе не производится замена или регенерация фильтрационной среды. Техническое обслуживание гидроциклонов не требует сложного оборудования и квалифицированного персонала. По своим техническим возможностям гидроциклоны могут конкурировать

вать с другими методами водоочистки, имея перед некоторыми из них неоспоримые преимущества. Так, по сравнению с отстойниками гидроциклоны не требуют значительных площадей под установку.

Комбинированное использование гидроциклонов – совмещение процессов удаления механических примесей на гидроциклоне и фильтрации на насыпном или складчатом фильтре. При таком сочетании основная доля механических примесей удаляется гидроциклоном, а окончательная (тонкая) доочистка произойдет на фильтре.

В качестве объекта исследований использовали воду с частицами взвеси фторида кальция с концентрацией 1–10 г/л.

Для определения формы и размера частиц фторида кальция в воде был проведен фотомикроскопический анализ на микроскопе CarlZeiss AxioImager M2.m с использованием светофильтра «темное поле» для снижения бликов при фотосъемке. Полученные результаты представлены на рис. 1.

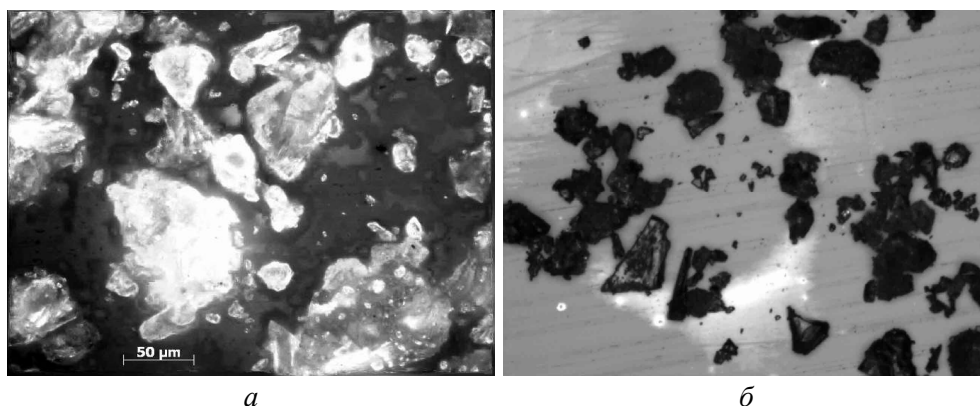


Рис. 1. Микрофотография частиц плавикового шпата:
а – увеличение 50х; б – увеличение 400х

Видно, что частицы фторида кальция имеют неправильную форму с острыми краями. Основная часть частиц имеет размер от 20 до 300 мкм.

Для определения химического состава плавикового шпата проведен рентгенофазовый анализ на дифрактометре Shimadzu XRD-7000. Обработка результатов РФА проведена с использованием специального программного модуля для ПО рентгенофазового дифрактометра STD Kensa 5. Результаты представлены в табл. 1.

Таблица 1

Распределение фаз, входящих в состав плавикового шпата

№ п/п	Вещество	Массовая доля, мас. %
1	Флюорит (CaF_2)	98,3
2	Кварц (SiO_2)	1,7

Из полученных данных видно, что основная доля суспензии плавикового шпата (98,3 мас. %) представлена фторидом кальция. Кроме того, в составе плавикового шпата также содержится небольшое количество кварца SiO_2 (1,7 мас. %).

Гранулометрический состав плавикового шпата проведен с использованием лазерного анализатора частиц Malvern Mastersizer 2000 (табл. 2).

Таблица 2

Гранулометрический состав суспензии фторида кальция

Размер фракции, мкм	Содержание фракции, %	Размер фракции, мкм	Содержание фракции, %
0,1–40,0	39,58	63,0–100,0	17,15
40,0–63,0	15,05	100,0–2000,0	28,21

Из полученных результатов гранулометрического анализа можно сделать вывод, что основная доля фторида кальция (60,41 %) имеет размер более 40 мкм. Доля менее 40 мкм составляет 39,56 %.

Разделение суспензии фторида кальция осветлением. Для определения эффективности очистки суспензии плавикового шпата, образующейся при работе водокольцевых насосов методом отстаивания, проведен анализ степени осветления (T) суспензии плавикового шпата с концентрацией 10 г/л на фотоколориметре КФК-2, светофильтр 540 нм. Фоновым значением (T) принимали фоновое значение чистой воды ($T_{\text{воды}} = 100$ %). Затем предварительно приготовленную суспензию с концентрацией 10 г/л (данная концентрация соответствует наибольшей концентрации плавикового шпата в воде при работе водокольцевых насосов, не учитывая аварии – 40 г/л) интенсивно перемешивали и переливали в кювету для измерения. Далее фиксировали

значение степени осветления по отношению к $T_{\text{воды}}$ в начальный момент времени и далее через каждые 5 мин в течение 1 ч.

После того как суспензия стала прозрачной из кюветы, не прекращая анализ на КФК, произвели отбор 1 мл осветленной воды для определения массы сухого остатка на аналитических весах ВСЛ-200/0,1А. Для этого полученный образец был высушен в предварительно тарированной бюретке при 110 °С в течение 30 мин. Масса сухого остатка составила меньше порога определения весов – менее 0,0001 г. Таким образом, в 1 л будет содержаться менее 0,1 г/л фторида кальция.

На рис. 2 представлен график изменения степени осветления суспензии фторида кальция во времени.

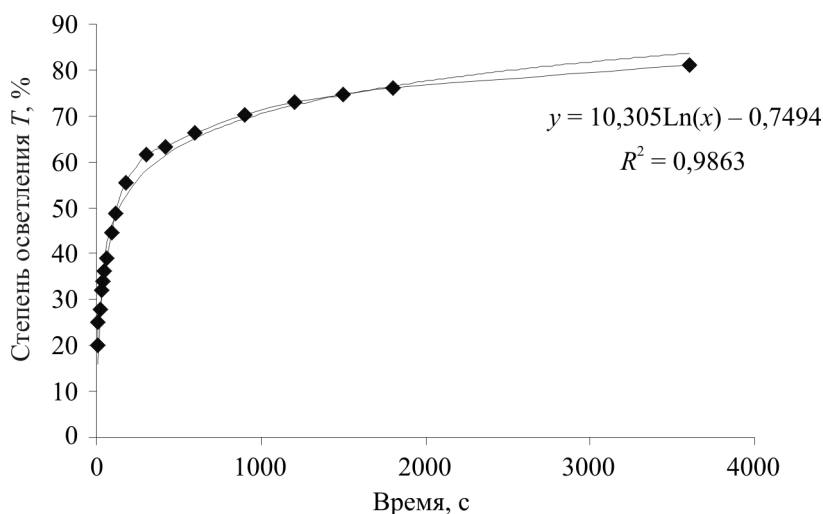


Рис. 2. Зависимость степени осветления суспензии плавикового шпата с концентрацией 10 г/л от времени осаждения

На графике видно, что степень осветления увеличивается с увеличением времени. Так, при времени 20 с степень осветления составляет 20 %, а при времени 1500 с – 74,7 %. Анализ зависимости степени осветления от времени показал, что она изменяется по логарифмическому закону со значением достоверности аппроксимации $R = 0,9863$.

Можно заключить, что для предварительной очистки суспензии плавикового шпата можно использовать метод отстаивания в отстойнике с тонкослойным модулем при условии пребывания воды в аппарате 30 мин и высоте тонкослойной ячейки 20 мм.

Разделение суспензии фторида кальция на гидроциклоне. Рассмотрим использование гидроциклона на пилотной установке для интенсификации скорости очистки воды от взвеси фторида кальция, снижения габаритных размеров оборудования.

На основании ориентировочных значений размеров гидроциклонов разной производительности [4] для обеспечения очистки от наиболее мелких частиц плавикового шпата и поддержания производительности работы одного гидроциклона, равной расходу воды одного водокольцевого насоса, выбираем следующие размеры, мм: $d_{ц} - 50$; $(h_{ц} + h_{к}) - 250$; $d_{вх} - 12$; $d_{в} - 16$; $d_{н} - 6-7$; расход до $4,3 \text{ м}^3$; давление на входе $0,5-3 \text{ кгс/см}^2$. Схема гидроциклона представлена на рис. 3.

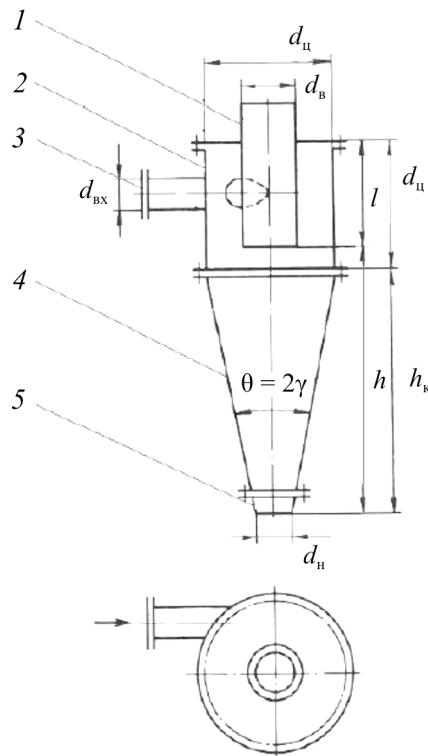


Рис. 3. Гидроциклон: 1 – центральный (шламовый) патрубок; 2 – песковая насадка; 3 – камера для слива; 4 – корпус; 5 – резиновый вкладыш

Выбранный типоразмер гидроциклона отвечает необходимым теоретическим выкладкам либо близок к ним при математическом моделировании работы гидроциклонов:

$$\frac{h_{\text{ц}} + h_{\text{к}}}{d_{\text{ц}}} = 5; \quad \frac{d_{\text{вх}}}{d_{\text{ц}}} = 0,28; \quad \frac{d_{\text{в}}}{d_{\text{ц}}} = 0,34.$$

На основании типовых размеров гидроциклона с диаметром 50 мм был изготовлен пилотный гидроциклон из листовой жести и полимерных элементов для проведения лабораторных исследований разделения суспензии фторида кальция.

Лабораторные испытания гидроциклона проводили при концентрациях фторида кальция от 1 до 10 г/л в водопроводной воде. Объем воды составлял 20 л.

Полученные образцы фильтровали на фильтровальной бумаге «синяя лента» и высушивали в сушильном шкафу при температуре 110 °С в течение 40 мин для удаления свободной воды. По разнице массы фильтровальной бумаги до и после фильтрации рассчитывали массу сухого остатка, пошедшего в слив и в пески на гидроциклоне. Расчет степени очистки проводили по следующим соотношениям:

$$X = \frac{m_{\text{CaF}_2}}{m_{\text{сух.сл}}} \cdot 100 \%,$$

X – степень очистки суспензии к исходной концентрации фторида кальция, %; m_{CaF_2} – масса навески фторида кальция, г; $m_{\text{сух.сл}}$ – масса сухого остатка слива гидроциклона, г;

$$X_1 = \frac{m_{\text{сух.ост}}}{m_{\text{сух.сл}}} \cdot 100 \%,$$

где X_1 – степень очистки суспензии к сливу в песке, %; $m_{\text{сух.ост}}$ – масса сухого остатка песковой насадки, г; $m_{\text{сух.сл}}$ – масса сухого остатка слива гидроциклона, г.

Степень очистки слива по отношению к сливу в пески учитывает неравномерное перемешивание при работе гидроциклона на цикл в условиях лаборатории. В промышленных условиях грубая взвесь фторида кальция не успевает осесть в трубопроводе подачи и имеет стабильный характер.

Результаты очистки суспензии на гидроциклоне при различных концентрациях плавикового шпата и диаметре песковой насадки представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты очистки суспензии на гидроциклоне при различных концентрациях плавикового шпата и диаметре песковой насадки

Концентрация CaF_2 в исходной суспензии, г/л	Диаметр насадки, мм	Концентрация очищенного стока на выходе, г/л	Концентрация слива гидроциклона, г /л	X , %	X_1 , %
1	6	0,039	3,713	96,10	98,95
1	7	0,019	1,544	98,10	98,77
2	7	0,050	1,074	97,52	95,38
5	7	0,407	6,037	91,85	93,25
5	6	0,651	8,969	86,97	92,74
10	6	1,154	17,781	88,46	93,51

Результаты обработки лабораторных данных наглядно демонстрируют высокую степень очистки воды от фторида кальция при различных концентрациях на гидроциклоне малого диаметра. С увеличением концентрации от 1 до 10 г/л степень очистки снижается с 98,95 до 93,50 % по отношению сухого остатка очищенного слива и пескового слива.

При диаметре песковой насадки 7 мм были получены лучшие варианты очистки, чем при диаметре 6 мм, что отражает возможности управления степенью очистки таким путем.

С увеличением концентрации фторида кальция до 10 г/л увеличивается доля крупных частиц, которые при циркуляции воды в емкости успевают осесть и тем самым влияют на результат анализа, так как насос закачивает суспензию со дна емкости. Поэтому результаты очистки были рассчитаны по отношению массы частиц, пошедших в очищенный слив, к массе частиц, пошедших в песок.

Проведен фотомикроскопический анализ частиц плавикового шпата, полученных из верхнего и нижнего слива гидроциклона. Результаты представлены на рис. 4.

Видно, что частицы плавикового шпата, полученные из нижнего слива гидроциклона, более крупные, по сравнению с частицами плавикового шпата, полученных из верхнего слива гидроциклона. Так, средний размер частиц, полученных из нижнего слива гидроциклона составляет 78 мкм, а средний размер частиц, полученных из нижнего слива, составляет 5 мкм.

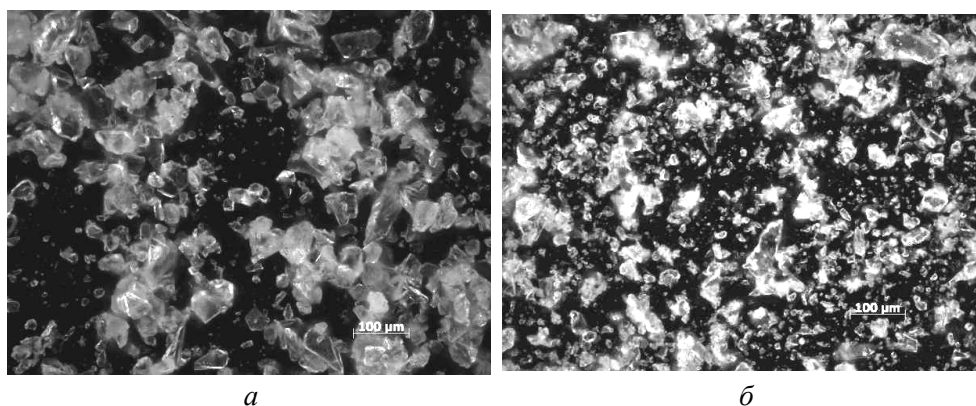


Рис. 4. Частицы плавленого шпата, полученные из нижнего (а) и верхнего (б) слива гидроциклона при концентрации $\text{CaF}_2 = 10 \text{ г/л}$

Результаты лабораторных испытаний показали высокую степень удаления частиц фторида кальция из модельных образцов оборотной воды цикла водокольцевых насосов. Очистка на гидроциклоне при низкой концентрации плавленого шпата в воде (1 г/л) эффективна даже без применения фильтров доочистки. Однако для получения стабильного результата очистки при любых возможных концентрациях фторида кальция (до 5 и до 40 г/л) необходимо предусмотреть доочистку на двух насыпных фильтрах, позволяющих оперативно доочистить оборотную воду и провести регенерацию в поочередном режиме работы.

На основании проведенной научно-исследовательской работы рекомендованы следующие оптимальные размеры гидроциклона D50 для очистки оборотной воды от плавленого шпата при давлении $P = 2,0 \text{ кгс/см}^2$:

диаметр гидроциклона $d_{\text{ц}}$	50 мм
угол конусности θ°	8–10
производительность.....	4,3 м ³ /ч
диаметр питающего отверстия $d_{\text{вх}}$	13,6 мм
диаметр сливного патрубка $d_{\text{в}}$	17,0 мм
диаметр песковой насадки $d_{\text{п}}$	9,3 мм
высота гидроциклона h	250 мм
длина сливного патрубка внутри гидроциклона l	57 мм
высота цилиндрической части $h_{\text{ц}}$	50

Выводы. Полученные лабораторные и расчетные значения работы гидроциклона показывают, что данный тип аппарата можно использовать

в качестве основного аппарата для очистки оборотной воды водокольцевых насосов с доочисткой на насыпном фильтре. Использование отстойника с тонкослойным модулем требует большого времени пребывания суспензии фтористого кальция в аппарате, больших затрат на оборудование и средства КИПиА, большей площади для оборудования.

Список литературы

1. Проблема пресной воды. Глобальный контекст политики России / А.А. Орлов, А.Л. Чечевишников [и др.]. – М.: МГИМО-Университет, 2011. – 87 с.
2. Башаров М.М., Сергеева О.А. Устройство и расчет гидроциклонов: учеб. пособие. – Казань: Вестфалика, 2012. – 92 с.
3. Богданов О.С. Справочник по обогащению руд: в 4 т. – Т. 2. Основные процессы. – М.: Недра, 1982. – 1500 с.
4. Новый справочник химика и технолога: Процессы и аппараты химических технологий: в 2 ч. / Г.М. Островский, Р.Ш. Абиев, В.М. Барабаш [и др.]; под ред. Г.М. Островского. – СПб.: Профессионал, 2007. – Ч. 2. – 916 с.
5. Разделение суспензий в химической промышленности: учеб. пособие / Т.А. Малиновская, И.А. Кобринский, О.С. Кирсанов [и др.]. – М.: Химия, 1983. – 264 с.
6. Лаптев А.Г., Башаров М.М., Фарахова А.И. Эффективность турбулентной сепарации мелкой фазы в тонкослойных отстойниках // Энергосбережение и водоподготовка. – 2011. – Вып. 73, № 5. – С. 43–46.
7. Дик И.Г., Крохина А.В., Миньков Л.Л. Управление характеристиками гидроциклона дополнительным инжектированием воды // Теоретические основы химической технологии. – 2012. – Вып. 46, № 3. – С. 342–352.
8. Моделирование и расчет контрвихревых течений: учеб. пособие / В.К. Ахметов, В.В. Волшаник, А.Л. Зуйков, Г.В.Орехов; НИУ Моск. гос. стр. ун-т. – М., 2012. – 252 с.
9. Кармазин В.В., Торопов О.А. Теоретический анализ технологических возможностей гидроциклонов // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2009. – Вып. 15, № 12. – С. 215–228.
10. Исследование гидродинамики гидроциклона с дополнительным двуструйным инжектором / А.В. Крохина, И.Г. Дик, Т. Неессе, Л.Л. Миньков, Г.П. Павлихин // Теоретические основы химической технологии. – 2011. – Вып. 45, № 2. – С. 227–235.
11. Расчет разделяющей способности цилиндрикоконического гидроциклона на основе детерминированного подхода / М.Г. Лагуткин, Д.А. Баранов, С.Ю. Булычев, Е.Ю. Баранова // Химическое и нефтегазовое машиностроение. – 2004. – № 5. – С. 3–6.

12. Павлихин Г.П., Крохина А.В., Львов В.А. Гидродинамические характеристики гидроциклона с дополнительным инжектором // *Безопасность в техносфере*. – 2009. – № 6. – С. 21–25.
13. Мустафаев А.М., Гутман М.Б. Теория и расчет гидроциклона. – Баку: Маариф, 1969. – 172 с.
14. Bourgeois F., Majumder A.K. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon? // *Powder Technology*. – 2013. – Vol. 237. – P. 367–375.
15. Dueck J., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone // *Minerals Engineering*. – 2014. – Vol. 62. – P. 25–30.
16. Dueck J., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection // *Minerals Engineering*. – 2010. – Vol. 23, no. 4. – P. 289–294.
17. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of the hydrocyclone with water injection / J. Dueck, A. Krokhina, L. Minkov, T. Neesse // *Separation processes: summaries of 19th International Congress of 219. Chemical and Process Engineering CHISA*. – Prague, Czech Republic, 2010. – P. 800–801.
18. Finch J.A. Modeling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves // *Powder technology*. – 1983. – No. 36. – P. 127–129.
19. Nageswararao K. Comment on: ‘Experimental study of particle separation and the fish Hook effect in a mini-hydrocyclone’ by G. Zhu and J.L. Liow // *Chemical engineering science*. – 2014. – Vol. 122. – P. 182–184.
20. Wang B., Yu A.B. Computational investigation of the mechanisms of particle separation and «fish-hook» phenomenon in hydrocyclones // *AIChE*. – 2010. – Vol. 56, no. 7. – P. 1703–1715.
21. Zhu Guofeng, Liow Jong-Leng Experimental study of particle separation and the fish-hook effect in a mini-hydrocyclone // *Chemical Engineering Science*. – 2014. – Vol. 111. – P. 94–105.

References

1. Orlov A.A., Chechevishnikov A.L. Problema presnoj vody. Globalnyj kontekst politiki Rossii. – Moscow: MGIMO-Universitet, 2011. – 87 p.
2. Basharov M.M., Sergeeva O.A. Ustrojstvo i raschet gidrociklonov: uchebnoe posobie [The device and calculation of hydrocyclones: a training manual]. Kazan, Vestfalika, 2012, 92 p.
3. Bogdanov O.S. Spravochnik po obogashcheniyu rud. Tom 2. Osnovnye processy. [Handbook of ore dressing. Vol. 2. Basic processes]. Moscow, Nedra, 1982, 1500 p.
4. Ostrovskii G.M., Abiev R. Sh., Barabash V.M., et. al. Novyi spravochnik khimika i tekhnologa: Protsessy i apparaty khimicheskikh tekhnologii. Chast 2 [A new directory of chemical and technological products: Processes and apparatuses of chemical technologies. Part 2]. Ed. G.M. Ostrovskii. Saint Petersburg, Professional, 2007, 916 p.

5. Malinovskaia T.A., Kobrinskii I.A., Kirsanov O.S. et al. Razdelenie suspensii v khimicheskoi promyshlennosti [Separation of suspensions in the chemical industry]. Moscow, Khimiia, 1983, 264 p.
6. Laptev A.G., Basharov M.M., Farakhova A.I. Effektivnost turbulentnoi separatsii melkoi fazy v tonkosloinykh odstoinikakh [Efficiency of turbulent separation of the shallow phase in thin-layer sedimentation tanks]. *Energy Saving and Water Treatment*, 2011, iss.73, no. 5, pp. 43–46.
7. Dueck J., Krokhina A.V., Minkov L.L. Controlling characteristics of hydrocyclone via additional water injection. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2012, iss. 46, no. 3, pp. 342–352.
8. Akhmetov V.K., Volshanik V.V., Zuikov A.L., Orekhov G.V. Modelirovanie i raschet kontrvikhrevykh techenii [Modeling and calculation of counter-vortex flows]. Moscow, MGSU, 2012, 252 p.
9. Karmazin V.V., Toropov O.A. Teoreticheskii analiz tekhnologicheskikh vozmozhnostei gidrotsiklonov [Theoretical analysis of technological capabilities of hydrocyclones]. *Mountain News and Analysis Bulletin*, 2009, iss. 15, no. 12, pp. 215–228.
10. Krokhina A.V., Pavlikhin G.I., Dueck J., Neesse T., Minkov L.L. An investigation into hydrodynamics of a hydrocyclone with an additional double-jet injector. *Theoretical Foundation of Chemical Engineering*, 2011, iss. 45, no 2, pp. 227–235.
11. Lagoutkin M.G., Baranova E.Yu., Boulychev S.Yu., Peegarev V.M. Calculation of Cylindrical-Conical Hydro-Cyclones Separation Ability Based on the Concept of Boundary Grain of Separation. *Chemical and Petroleum Engineering*, 2004, no. 5, pp. 3–6.
12. Pavlikhin G.P., Krokhina A.V., Lvov V.A. [Hydrodynamic characteristics of a cyclone with an additional wash water injector]. *Bezopasnost v tekhnosfere*, 2009, no. 6, pp. 21–25.
13. Mustafaev A.M., Gutman M.B. Teoriia i raschet gidrotsyklona [Theory and calculation of a hydrocyclone]. Baku: MAARIF, 1969, 172 p.
14. Bourgeoisa F., Majumderb A. K. Is the fish-hook effect in hydrocyclones a real phenomenon? *Powder Technology*, 2013, vol. 237, pp. 367–375.
15. Dueck J., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone. *Minerals Engineering*. 2014, vol. 62, pp. 25–30.
16. Dueck J., Neesse Th., Minkov L. Mechanism of hydrocyclone separation with water injection // *Minerals Engineering*, 2010, vol. 23, no 4, pp. 289–294.
17. Dueck J., Krokhina A., Minkov L., Neesse T. Experimental and numerical investigation of hydrodynamic characteristics of the hydrocyclone with water injection. *Separation processes: summaries of 19th International Congress of 219. Chemical and Process Engineering CHISA*. Prague, Czech Republic, 2010, pp. 800–801.
18. Finch J.A. Modeling a fish-hook in hydrocyclone selectivity curves. *Powder technology*, 1983, no. 36, pp. 127–129.

19. Nageswararao K. Comment on: 'Experimental study of particle separation and the fish Hook effect in a mini-hydrocyclone' by G. Zhu and J. L. Liow. *Chemical engineering science*, 2014, vol. 122, pp. 182–184.

20. Wang B., Yu A. B. Computational investigation of the mechanisms of particle separation and «fish-hook» phenomenon in hydrocyclones. *AIChE*, 2010, vol. 56, no. 7, pp. 1703–1715.

21. Zhu Guofeng, Liow Jong-Leng, Experimental study of particle separation and the fish-hook effect in a mini-hydrocyclone. *Chemical Engineering Science*, 2014, vol. 111, pp. 94–105.

Получено 01.02.2020

Об авторах

Старостин Андрей Георгиевич (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национально-го исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: starostin26@yandex.ru).

Федотова Ольга Александровна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национально-го исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

Кобелева Асия Рифовна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры химических технологий Пермского национального исследовательского политехнического университета (614990, Пермь, Комсомольский пр., 29; e-mail: kobelevaasya@mail.ru).

About the authors

Andrei G. Starostin (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: starostin26@yandex.ru).

Olga A. Fedotova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: chydinova.olga@rambler.ru).

Asiya R. Kobeleva (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Chemical Technologies, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, e-mail: kobelevaasya@mail.ru).