

А. В. Бусарев, И. Г. Шешегова, А. С. Зиганшина,
А. Р. Зайнуллин

ИССЛЕДОВАНИЯ ОЧИСТКИ ШАХТНЫХ СТОЧНЫХ ВОД С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОЦИКЛОННО – ФИЛЬТРОВАЛЬНОЙ СТАНЦИИ

Ключевые слова: шахтные сточные воды, очистка, экспериментальная установка, гидроциклонно-фильтровальная станция, исследования.

В процессе эксплуатации подземных разработок полезных ископаемых формируются шахтные стоки. Они загрязнены главным образом твердыми взвешенными веществами. Объем шахтных стоков зависит от геологических условий, наблюдаемых в подземных выработках. Сброс неочищенных шахтных стоков в поверхностные водоемы или на рельеф местности ведет к загрязнению окружающей среды. Очистка шахтных стоков осуществляется в основном механическими методами: отстаиванием, фильтрованием, воздействием центробежного поля. Их можно усилить добавляя к стокам реагенты (коагулянты и флокулянты). Очистку шахтных стоков от взвеси Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ) предлагает осуществлять в гидроциклонно-фильтровальной станции (ГФС), состоящей из напорных гидроциклонов и автоматизированной сверхскорой фильтровальной станции. Целью данных исследований является изучение процессов очистки шахтных вод от взвешенных веществ в гидроциклонно-фильтровальной станции. Задачей исследований является выявление оптимальных технологических параметров работы установки, а также типа применяемого напорного гидроциклона конструкции КГАСУ. В ходе экспериментальных исследований была определена требуемая геометрия напорных гидроциклонов конструкции КГАСУ, а также давление на их входе и противодавления на их сливах. Была выявлена скорость фильтрования в сверхскорых фильтрах, обеспечивающая максимальную эффективность работы этих аппаратов. Результаты экспериментальных исследований показали высокую эффективность гидроциклонно-фильтровальной станции для очистки шахтных стоков от взвеси. В данной работе также описана технология промышленной установки для очистки шахтных стоков от взвешенных веществ. На ней концентрация взвеси в сточных водах снижается с 500-600 мг/л до 5 мг/л.

А. V. Busarev, I. G. Sheshegova, A. S. Ziganshina,
A. R. Zainullin

RESEARCH ON MINE WASTEWATER TREATMENT USING A HYDROCYCLONE FILTER STATION

Keywords: mine wastewater, purification, experimental setup, hydrocyclone filtration station, research.

During the operation of underground mineral deposits, mine drainage is formed. It is mainly contaminated with solid suspended matter. The volume of mine drainage depends on the geological conditions observed in underground workings. The discharge of untreated mine drainage into surface water bodies or onto the terrain leads to environmental pollution. Mine drainage is mainly treated using mechanical methods: settling, filtration, and centrifugal field action. These methods can be enhanced by adding reagents (coagulants and flocculants). Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE) proposes to treat mine wastewater from suspended solids in a hydrocyclone-filter station (HFS) consisting of pressure hydrocyclones and an automated ultra-fast filter station. The purpose of these studies is to investigate the processes of cleaning mine water from suspended solids in a hydrocyclone-filter station. The objective of the research is to identify the optimal technological parameters for the operation of the installation, as well as the type of pressure hydrocyclone used in the KSUACE design. During the experimental studies, the required geometry of the KSUACE-designed pressure hydrocyclones was determined, as well as the pressure at their inlet and the back pressure at their outlets. The filtration rate in ultra-fast filters that ensures maximum efficiency of these devices was identified. The results of experimental studies showed the high efficiency of the hydrocyclone-filtering station for cleaning mine effluents from suspended solids. This paper also describes the technology of an industrial plant for cleaning mine effluents from suspended solids. It reduces the concentration of suspended solids in wastewater from 500-600 mg/l to 5 mg/l.

Введение

В процессе разработки и эксплуатации шахт для добычи подземным способом полезных ископаемых происходит просачивание воды в подземные горизонты. Это ведет к образованию шахтных стоков [1,2]. В шахтных водах преобладает содержание твердых взвешенных частиц, а также ряда других соединений, требующих обязательной очистки перед их последующим использованием или сбросом в водоёмы [1,3]. Показатели качества таких вод определяются типом добываемого сырья, а также геологическими и гидрогеологическими особенностями подземных слоёв [3].

Величина стока шахтных вод находится в прямой зависимости от гидрогеологической обстановки, характерной для конкретных горных выработок. [1,3].

Основным методом удаления взвеси из шахтных стоков является механическая очистка (отстаивание, фильтрование, обработка в поле центробежных сил [5-8]). В процессе отстаивания концентрация твердых частиц в шахтных стоках снижается с диапазона 100–200 мг/л до показателя 10 мг/л. При прохождении через слой взвешенного осадка уровень взвеси падает с 0,15 г/л до 0,01 г/л [5]. Фильтрация позволяет уменьшить содержание твердых частиц в сточных водах с 50 мг/л до 10 мг/л

[9]. Очистные установки с гидроциклонами демонстрируют результативность в удалении взвешенных веществ на уровне 55–65% [7]. Гидроциклонно-фильтровальная установка (ГФУ), разработанная в Казанском государственном архитектурно-строительном университете (КГАСУ), обеспечивает очистку шахтных стоков от твердых частиц с эффективностью 90–94% [10, 11].

Для удаления из шахтных стоков взвешенных веществ применяется методика, называемая «Дон-3». При данном методе они вначале обрабатываются отстаиванием в шахтах, а затем фильтруются через породы выработанных лав. Глубокая очистка шахтных вод проводится вне шахт методом фильтрования [7].

Добавление коагулянтов и флокулянтов повышает эффективность механической очистки шахтных стоков [8]. В качестве флокулянта применяется ВПК – 402 [8].

Методом флотации шахтные стоки обрабатываются при наличии в них загрязнений легче воды (минеральные масла и нефтепродукты) [3]. Иногда шахтные воды очищаются фильтрованием через слой анионитов в напорных ионитовых фильтрах для удаления из этих стоков ионов железа, никеля, марганца, кобальта, меди, хрома [1,8].

К нейтрализации шахтных стоков гашеной известью прибегают, если они имеют кислую реакцию [1,3,12]. Сильные окислители (технический кислород, озон, хлор) используются для дезинфекции шахтных вод [1,8].

Для очистки шахтных вод от железа, трехвалентного хрома, мышьяка, ртути, сероводорода они обрабатываются водными растворами гашеной извести или едкого натра, а также соды простой или кальцинированной [1].

При удалении из шахтных вод загрязнений способных к биохимическому окислению применяют биофильтры или аэротенки [1]. Глубокая очистка этих сточных вод может производиться биологическими методами в биопрудах различных конструкций [1].

Технологическая схема процесса очистки шахтных стоков от взвешенных веществ с применением гидроциклонно-фильтровальной станции (ГФС) представлена на рис. 1, где 1 – тонкослойный самотечный отстойник; 2 – резервуар; 3 – гидроциклонная установка; 4 – сверхскорые напорные фильтры; 5 – подача воды на очистку; 6 – отвод воды в резервуар; 7 – подача воды в гидроциклонную установку; 8 – отвод осадка; 9 – отвод нижнего слива гидроциклонов; 10 – отвод верхнего слива гидроциклонов; 11 – отвод очищенной воды; 12 – подача воздуха в скорые напорные фильтры; 13 – отвод загрязненной промывной воды.

Представленная технология допускает снижение концентрации взвеси в шахтных стоках с 0,5-0,6 г/л до 0,005 г/л.

Теоретические основы работы данной технологии представлены в источниках [1,13].

Целью работы явилось изучение процесса очистки шахтных стоков с использованием гидроциклонно-фильтровальной станции и выявление технологических параметров ее работы.

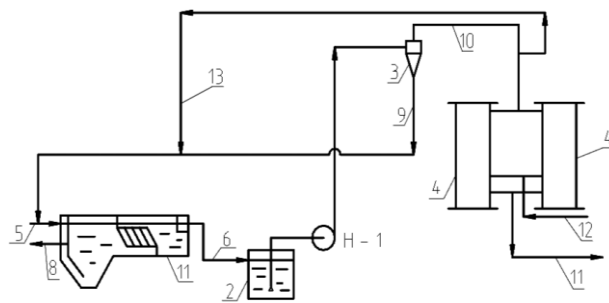


Рис. 1 – Технологическая схема установки очистки шахтных вод от взвеси

Fig. 1 – Flow chart of the mine water purification plant for suspended matter removal

Материалы и методы исследования

Задачей экспериментальных исследований является определение эффекта очистки шахтных вод от взвеси в ГФС, а также технологических параметров ее работы. Для решения данной задачи проводились исследования на опытной установке, схема которой представлена на рис. 2, где 1 – емкость; 2 – сменный напорный гидроциклон; 3 – сверхскорый фильтр; 4 – успокоительная емкость; 5 – напорная емкость нижнего слива; 6 – напорная емкость верхнего слива; 7 – подача водопроводной воды; 8 – подача воды на очистку; 9 – подача суспензии; 10 – сброс воды в канализацию; 11 – сброс воды с нижнего слива гидроциклона в канализацию; 12 – подача воды с верхнего слива гидроциклона в сверхскорый фильтр; 13 – сброс воды от сверхскорого фильтра в канализацию; 14 – отвод очищенной воды; 15 – подача промывной воды; 16 – подача сжатого воздуха; 17 – отвод промывной воды в канализацию.

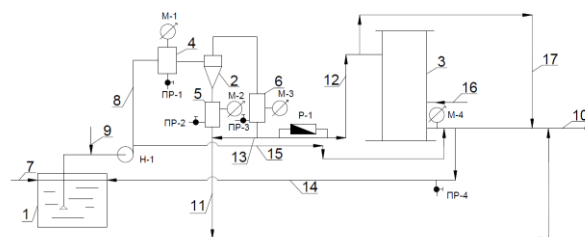


Рис. 2 – Схема опытной гидроциклонно-фильтровальной станции

Fig. 2 – Scheme of the experimental hydrocyclone-filtration station

Геометрические данные испытанных гидроциклонов представлена в таблице 1.

Манометр М-1 осуществляет контроль давления в точке входа в технологическую установку. Для мониторинга давления в процессе слива гидроциклона задействованы манометры М-2

и М-3. Манометр М-4 производит замеры давления на завершающей стадии работы установки. Скорость прохождения воды через сверхскоростной фильтр фиксируется при помощи расходомера Р-1. Для забора образцов воды, направляемой на очистку, используется специальный пробоотборник ПР-1.)

Таблица 1 – Геометрические данные испытанных гидроциклонов

Table 1 – Geometrical data of the tested hydrocyclones (beginning)

Марка гидроциклона	Диаметр, мм				Угол конусности, град	Высота цилиндри- ческой части, мм	Общая высота гидроциклона, мм
	гидроциклона	патрубка					
		входного	верхнего слива	нижнего слива			
GC-75-I	75	15	20	10	5	75	790
GC-80-I	80	20	20	10	5	80	805
GC-100-I	100	20	20	10	5	100	1235

Таблица 2 – Опытные данные (начало)

Table 2 – Experimental data (beginning)

Марка гидроциклона	Температура стоков, °C	Давление, МПа			начальная скорость фильтрования, м/ч
		на входе в гидроциклон	на сливах гидроциклона	на выходе из ГФС	
1	2	3	4	5	6
GC-75-I	19,8	0,4	0,2	0,11	25
		0,4	0,3	0,1	
	20,0	0,5	0,2	0,09	
		0,5	0,3	0,09	
	20,2	0,6	0,3	0,1	
		0,6	0,4	0,08	
GC-80-I	20,3	0,4	0,2	0,12	25
		0,4	0,3	0,11	
	20,1	0,5	0,2	0,1	
		0,5	0,3	0,09	
	19,9	0,6	0,3	0,09	
		0,6	0,4	0,08	
GC-100-I	20,4	0,4	0,2	0,12	25
		0,4	0,3	0,11	
	19,7	0,5	0,2	0,11	
		0,5	0,3	0,1	
	20,2	0,6	0,3	0,09	
		0,6	0,4	0,09	

Пробоотборник ПР-2 служит для отбора проб с нижнего слива гидроциклона, а пробоотборник ПР-3 – с верхнего слива гидроциклона. Пробоотборник ПР-4 отбирает пробы очищенных стоков на выходе из установки.

Высота фильтрующей загрузки сверхскоростного фильтра 3 принята равной 2,6 м. Начальная скорость фильтрования в этом агрегате не превышает 25 м/ч.

Температура воды измеряется термометром с ценой деления 0,1 °C.

Концентрация взвешенных веществ в воде определяется весовым методом [14].

Эффективность работы гидроциклонов $\mathcal{E}_{г.ц.}$, %, составляет [15].

$$\mathcal{E}_{г.ц.} = \frac{C_{в.в.}^{исх} - C_{в.в.}^{оч}}{C_{в.в.}^{исх}} \times 100, \quad (1)$$

где $C_{в.в.}^{исх}$ – концентрация взвешенных веществ в исходной воде, мг/л; $C_{в.в.}^{оч}$ – концентрация взвешенных веществ в очищенной в гидроциклоне воде, мг/л.

Эффективность работы ГФС $\mathcal{E}_{г.ф.с.}$, %, составляет [12]

$$\mathcal{E}_{г.ф.с.} = \frac{C_{г.ф.с.}^{исх} - C_{г.ф.с.}^{оч}}{C_{г.ф.с.}^{исх}} \times 100, \quad (2)$$

где $C_{г.ф.с.}^{исх}$ – концентрация взвешенных веществ в воде очищенной в ГФС, мг/л.

Результаты и обсуждение

Полученные результаты опытных данных представлены в таблице 2.

Температура сточных вод во время опытов находилась в пределах + 19,7...+ 20,4 °C.

Таблица 2 – Опытные данные (продолжение)

Table 2 – Experimental data (continued)

Марка гидроциклона	Содержание взвеси, мг/л				Э _{г.ц.} , %	Э _{гфс.} , %
	в воде, поступающей на очистку	на верхнем сливе гидроциклонов	на нижнем сливе гидроциклонов	в воде на выходе из ГФС		
1	6	7	8	9	10	11
GC-75-I	51	24	128	6	53	88
	54	28	134	7	48	87
	48	23	115	5	52	90
	49	24	123	6	51	88
	50	24	129	7	52	86
	46	23	108	6	50	87
GC-80-I	52	19	130	5	63	90
	53	21	129	6	60	89
	49	17	125	5	65	90
	51	19	122	5	63	90
	46	17	111	5	63	89
	48	18	118	6	62	88
GC-100-I	45	17	114	5	62	89
	48	19	124	6	60	88
	47	17	126	5	64	89
	49	18	123	6	63	88
	52	17	135	5	67	90
	50	18	127	6	64	88

Согласно данным табл. 2 потери напора в сверхскорых фильтрах достигают 8-12 м.

Анализ данных табл. 2 показывает: содержание твёрдых частиц в сточных водах на входе в систему очистки находится в пределах 46–54 мг/л. После прохождения через гидроциклонно-фильтровальную станцию этот показатель снижается до уровня не более 5–7 мг/л. При этом концентрация взвеси в потоке, возвращаемом от гидроциклонов обратно в начало установки, варьируется в диапазоне 108–134 мг/л.

ГФС снижает содержание взвешенных веществ в шахтных водах с 0,05 г/л до 0,005 г/л. Рекомендуется применять напорный гидроциклон типа GC-80-I.

Заключение

- 1) Эффект очистки шахтных вод в ГФС 86-90%;
- 2) Увеличение давления на входе в установку повышает эффект очистки, а повышение давления на сливах напорных гидроциклонов уменьшает;
- 3) Максимальный эффект очистки шахтных вод от взвеси дает гидроциклон типа GC-80-I, а минимальный – GC-75-I.

Применение для очистки шахтных сточных вод схемы «гидроциклон-сверхскорые фильтры» по сравнению с гидроциклонно-фильтровальной установкой (см. работу [1]) позволяет без потери эффективности:

- а) увеличить удельную производительность установки;
- б) осуществить автоматизацию процесс очистки шахтных вод;
- в) сократить размеры очистных сооружений.

Гидроциклонно-фильтровальная станция с успехом может использоваться для очистки природных и сточных вод от взвешенных веществ.

Литература

1. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Шарипова К.Г. *Водоочистка, водоподготовка, водоснабжение*, **3**, 147, 42-45 (2020).
2. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Шарипова К.Г. *Яковлевские чтения: XIV международной научно-технической конференции, посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева и 90-летию со дня создания факультета «ВиВ»* (Москва, 14-15 марта 2019), Изд-во МИСИ-МГСУ, Москва, 2019, 231-235.
3. Долина Л.Ф. *Сточные воды предприятий горной промышленности и методы их очистки: справочное пособие*. Молодежная экологическая организация, Днепропетровск, 2000. 61 с.
4. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Бражникова К.Г. *VIII Национальной конференции с участием «Проблемы и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения»* (Саратов. 15-16 ноября 2018), Наука, Саратов, 2018, 74-78.
5. Пилипенко А.Т., Горюновский И.Т., Гребенюк В.Д. *Комплексная переработка шахтных вод*. Техника, Киев, 1985. 183 с.
6. Харюновский А.А. *Комплексная очистка шахтных и карьерных вод от техногенных загрязнений*. Изд-во ЮРОАГН, Шахты, 2000. 238 с.
7. Технологические схемы очистки от взвешенных веществ и обеззараживание шахтных вод: Каталог. ЦНИЭуголь, Москва, 1985. 425 с.
8. Красавин А.П. *Защита окружающей среды в угольной промышленности*. Недра, Москва, 1991. 221 с.
9. Адельшин А.Б., Барлев А.А. *Автоматизация установок скоростных методов очистки воды*. КИСИ, Казань, 1993. 88 с.

10. Бусарев А.В., Шешегова И.Г., Нестеров Н.В. VI международная научно-практическая конференция «Современное состояние и перспективы развития строительства, теплогазоснабжения и энергообеспечения», (Саратов, 9-10 ноября 2017), Саратовский государственный аграрный университет, Саратов, 2017, 58-63.
11. Шешегова И.Г., Бусарев А.В., Нестеров Н.В. Яковлевские чтения: XII Международной научно-технической конференции посвященной памяти академика РАН С.В. Яковлева, (Москва, 3 марта 2017), Изд-во Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-та, Москва, 2017, 217-220.
12. Милованов Л.В. Очистка сточных вод предприятий цветной металлургии. Металлургия, Москва, 1971. 384 с.
13. Бусарев А.В., Селюгин А.С., Шешегова И.Г., Урмитова Н.С. Нефтегазовое дело, 4, 199-215 (2015).
14. Бусарев А.В., Селюгин А.С., Хисамеева Л.Р., Зубарев А.М. Энергосбережение и водоподготовка, 4, 138, 28-34 (2022).
15. Ю.М. Ласков, Ю.В. Воронов, В.И. Калицун, Примеры расчетов канализационных сооружений. ИД «Альянс», Москва, 2008. 255 с.

References

1. Busarev A.V., Sheshegova I.G., Sharipova K.G. Water purification, water treatment, water supply, 3, 147, 42-45 (2020).
2. Busarev A.V., Sheshegova I.G., Sharipova K.G. Yakovlev readings: XIV international scientific and technical conference dedicated to the memory of academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovlev and the 90th anniversary of the faculty «ViV» (Moscow, March 14-15, 2019), Izd-vo MISI-MGSU, Moscow, 2019, 231-235.
3. Dolina L.F. Wastewater from mining enterprises and methods of their treatment: a reference manual. Youth environmental organization, Dnepropetrovsk, 2000. 61 p.
4. Busarev A.V., Sheshegova I.G., Brazhnikova K.G. VIII National Conference with International Participation

- «Problems and Prospects for the Development of Construction, Heat and Gas Supply and Energy Supply» (Saratov. November 15-16, 2018), Science, Saratov, 2018, 74-78.
5. Pilipenko A.T., Goronovsky I.T., Grebenyuk V.D. Complex processing of mine waters. Tekhnika, Kyiv, 1985. 183 p.
6. Khariyonovsky A.A. Comprehensive treatment of mine and quarry waters from technogenic pollutants. Publishing house of YUROAGN, Shakhty, 2000. 238 p.
7. Technological schemes for cleaning suspended solids and disinfecting mine waters: Catalog. TsNIEugol, Moscow, 1985. 425 p.
8. Krasavin A.P. Environmental protection in the coal industry. Nedra, Moscow, 1991. 221 p.
9. Adelshin A.B., Barlev A.A. Automation of installations for high-speed water purification methods. KISI, Kazan, 1993. 88 p.
10. Busarev A.V., Sheshegova I.G., Nesterov N.V. VI International Scientific and Practical Conference «Current State and Prospects for the Development of Construction, Heat and Gas Supply and Energy Supply» (Saratov, November 9-10, 2017), Saratov State Agrarian University, Saratov, 2017, 58-63.
11. Sheshegova I.G., Busarev A.V., Nesterov N.V. Yakovlev readings: XII International scientific and technical conference dedicated to the memory of academician of the Russian Academy of Sciences S.V. Yakovlev, (Moscow, March 3, 2017), Izd-vo Nats. will investigate. Moscow. state. builds. there, Moscow, 2017, 217-220.
12. Milovanov L.V. Wastewater Treatment at Non-Ferrous Metallurgy Enterprises. Metallurgy, Moscow, 1971. 384 p.
13. Busarev A.V., Selyugin A.S., Sheshegova I.G., Urmitova N.S. Oil and Gas Affairs, 4, 199-215 (2015).
14. Busarev A.V., Selyugin A.S., Khisameeva L.R., Zubarev A.M. Energy Saving and Water Treatment, 4, 138, 28-34 (2022).
15. Yu. M. Laskov, Yu. V. Voronov, V. I. Kalitsun, Examples of Calculations of Sewerage Facilities. Publishing House «Alliance», Moscow, 2008. 255 p.

© **А. В. Бусарев** – канд. техн. наук, доцент каф. «Водоснабжение и водоотведение» (ВВ), Казанский государственный архитектурно-строительный университет (КГАСУ), Казань, Россия, reder100@rambler.ru; **И. Г. Шешегова** – старший преподаватель каф. ВВ, КГАСУ, ig-7@mail.ru; **А. С. Зиганшина** – канд. хим.наук, доцент каф. Технологии пластических масс, Казанский национальный исследовательский технологический университет, Казань, Россия, aygul.ziganshina.89@mail.ru; **А. Р. Зайнуллин** – магистрант 1 курса КГАСУ.

© **А. V. Busarev** – PhD (Technical Sci.), Associate Professor, Department of Water Supply and Sanitation (WSS), Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KSUACE), Kazan, Russia, reder100@rambler.ru; **I. G. Sheshegova** – Senior Lecturer, the WSS department, KSUACE, ig-7@mail.ru; **A. S. Ziganshina** – PhD (Chemical Sci.), Associate Professor, Department of Plastics Technology, Kazan National Research Technological University, Kazan, Russia, aygul.ziganshina.89@mail.ru; **A. R. Zainullin** – 1st year Master-student of KSUACE.

Дата поступления рукописи в редакцию – 15.10.25.

Дата принятия рукописи в печать – 29.10.25.