



УДК 628.16

**Бусарев Андрей Валерьевич**

кандидат технических наук, доцент

E-mail: [red1@myrambler.ru](mailto:red1@myrambler.ru)

**Шешегова Ирина Геннадьевна**

старший преподаватель

E-mail: [ig-7@mail.ru](mailto:ig-7@mail.ru)

**Казанский государственный архитектурно-строительный университет**

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зелёная, д. 1

**Тазмиева Ильнара Наилевна**

инженер

E-mail: [ilnara\\_tazmieva@mail.ru](mailto:ilnara_tazmieva@mail.ru)

**ООО «Маяк-НК»**

Адрес организации: 420029, Россия, г. Казань, Сибирский тракт, д. 39, пом. 2

### **Исследования процесса подготовки технической воды для заводнения нефтеносных горизонтов с использованием напорных гидроциклонов**

#### **Аннотация**

*Постановка задачи.* Для увеличения нефтеотдачи продуктивных горизонтов применяется метод поддержания пластового давления (ППД). Суть этого метода заключается в закачке в нефтеносные горизонты через нагнетательные скважины воды из поверхностных источников. С целью предотвращения засорения поровых каналов нефтеносных горизонтов необходима очистка воды, закачиваемой в нагнетательные скважины от взвешенных веществ. Данная статья посвящена очистке воды для заводнения нефтеносных горизонтов от взвеси с использованием установок типа «блок гидроциклон-отстойник». Целью этих исследований является определение времени отстаивания, необходимое для очистки воды, обработанной в напорных цилиндрикоконических гидроциклонах конструкции Казанского государственного архитектурно-строительного университета (КГАСУ).

*Результаты.* Основные результаты данных исследований состоят в определении времени отстаивания необходимого для очистки от взвеси воды, обработанной в напорных гидроциклонах.

*Выводы.* Значимость полученных результатов для строительной отрасли заключается в определении времени отстаивания, необходимого для очистки от взвешенных веществ воды, которая была обработана в напорных гидроциклонах, что позволяет осуществить технологические расчеты установок типа «блок-гидроциклон-отстойник».

**Ключевые слова:** техническая вода для заводнения нефтеносных горизонтов, очистка воды из поверхностных источников от взвешенных веществ, установки типа «блок гидроциклон-отстойник», определение времени отстаивания для очистки от взвеси воды, обработанной в напорных гидроциклонах.

#### **Введение**

С целью увеличения коэффициента нефтеотдачи нефтяных месторождений используется метод поддержания пластового давления (ППД). В продуктивные горизонты закачивается вода, вытесняющая и вымывающая сырую нефть из пор пласта, тем самым увеличивая дебит добывающих нефтеносных скважин. Для закачки в пласт используются нефтепромысловые сточные воды (НСВ) образующиеся в местах добычи и первичной переработки нефти или воды поверхностных источников [1, 2].

С целью предотвращения засорения поровых каналов нефтяных пластов необходима очистка технической воды, закачиваемой в нагнетательные скважины, от взвешенных веществ.

Содержание взвеси в воде, подаваемой в нагнетательные скважины, составляет 10-50 мг [1]. Основная масса воды, используемой на предприятиях ПАО «Татнефть» для

заводнения нефтеносных горизонтов, поступает из р. Кама. При этом воды по трубопроводам подается на нефтепромыслы, расположенные на расстоянии 100-120 км от водозабора (г. Набережные Челны).

При длительной транспортировке технической воды происходит ее вторичное загрязнение, из-за которого концентрация взвешенных веществ возрастает до 30-50 мг/л [3].

#### Установка очистки технической воды от взвеси

Для очистки воды от взвешенных веществ авторы работ [4-7] предлагают использовать напорные гидроциклоны. В КГАСУ для этих целей используются напорные цилиндрикоконические гидроциклоны диаметром 40-100 мм [4].

Очистка воды от взвеси может быть проведена на установках типа «блок гидроциклон-отстойник» (БГО), в состав которых кроме напорных гидроциклонов входят отстойники различных конструкций [1, 2, 4]. В работе [4] предлагается использовать в составе установок типа БГО тонкослойные напорные горизонтальные отстойники.

На рис. 1 представлена технологическая схема установки типа БГО, разработанная в КГАСУ для подготовки технической воды. Данный аппарат состоит из гидроциклонной установки 1 и отстойника 2, работающего в напорном режиме.

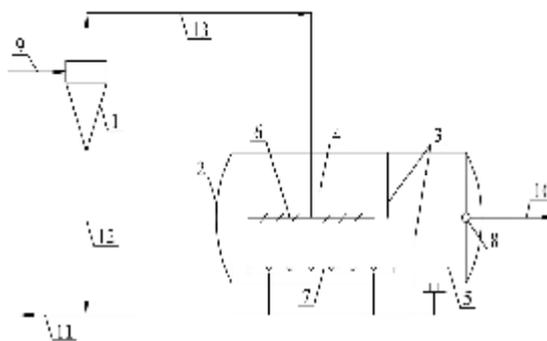


Рис. 1. Схема аппарата типа БГО: 1 – гидроциклонная установка; 2 – напорный отстойник; 3 – перегородка; 4 – отсек предварительного отстаивания; 5 – отсек дополнительного отстаивания; 6 – водораспределитель; 7 – сборник осадка; 8 – водосборник; 9 – подача воды на очистку; 10 – отвод очищенной воды; 11 – отвод уловленного осадка; 12 – нижний слив гидроциклонов; 13 – верхний слив гидроциклонов

Вода подается на очистку в установку типа БГО под избыточным давлением не менее 0,3-0,4 МПа.

Часть взвешенных веществ отводится от напорных гидроциклонов через их нижние сливные отверстия (нижний слив). Очищенная в гидроциклонах вода (верхний слив) поступает в напорный отстойник 2. Нижний слив гидроциклонов, а также осадок, образующийся в отстойнике, под остаточным давлением 0,1-0,2 МПа отводятся в шламонакопитель.

Очищенная вода под остаточным давлением 0,1-0,2 МПа поступает в систему ППД.

Гидроциклонная обработка природной воды перед ее поступлением в отстойники значительно снижает нагрузку на эти аппараты. Кроме того использование после напорных гидроциклонов отстойников повышает инерционность (снижает влияние внешних условий на эффективность очистки) этих аппаратов.

Такая установка типа БГО уменьшает содержание взвеси в воде с 50 мг/л до 10 мг/л. При концентрации взвеси в воде, поступающей на очистку в БГО, равной 100-150 мг/л необходимо предусматривать доочистку технической воды в скорых или сверхскорых фильтрах с зернистой загрузкой [2, 4].

#### Описание экспериментальной установки

Для совершенствования конструкции установок типа БГО, предназначенных для подготовки природных вод с целью их использования в системах ППД нефтепромыслов,

в КГАСУ проводились экспериментальные исследования. Они проходили с применением экспериментальной установки, технологическая схема которой представлена на рис. 2.

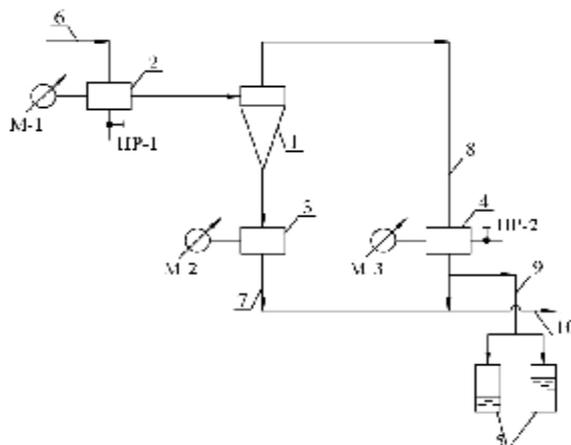


Рис. 2. Экспериментальная гидроциклонная установки: 1 – напорный гидроциклон; 2 – успокоительная ёмкость; 3 – напорная емкость нижнего слива; 4 – напорная емкость верхнего слива; 5 – цилиндры для отстаивания; 6 – подача воды на очистку; 7 – нижний слив гидроциклона; 8 – верхний слив гидроциклона; 9 – подача воды в стеклянные цилиндры; 10 – отвод воды в канализацию

Успокоительная емкость 2 служит для моделирования подключения напорного гидроциклона к трубопроводу большого диаметра [8]. Емкости 3 и 4 служат для создания противодействия на соответствующих сливах гидроциклонов [5].

Стеклянные цилиндры 5 предназначены для определения времени отстаивания воды, обработанной в напорных гидроциклонах. Общий вид цилиндров представлен на рис. 3. Геометрические размеры цилиндров приняты по рекомендациям, представленным в работе [6].

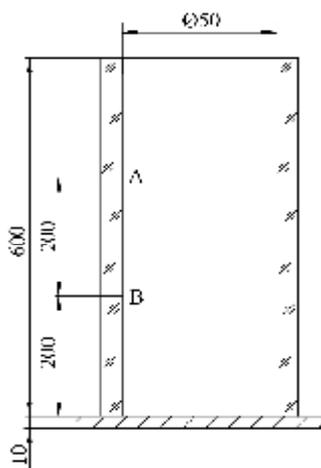


Рис. 3. Стеклянный цилиндр для отстаивания

Давление на входе гидроциклонов регулируется по показаниям манометра М-1, а противодействие на сливах этих аппаратов – по показаниям манометров М-2 и М-3. В экспериментальную установку исходная вода подается под избыточным давлением. Пробоотборник ПР-1 служит для получения проб исходной воды, пробоотборник ПР-2 служит для отбора проб воды очищенной в напорных гидроциклонах.

Очищенная в напорных гидроциклонах вода для определения времени отстаивания подается в цилиндры 5.

Геометрические характеристики гидроциклонов, применяемых для очистки природные воды, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Обозначение гидроциклона	Диаметр, мм				Угол конусности, α, град	Высота цилиндрической части, Н <sub>ст</sub> , мм	Общая высота гидроциклона, Н <sub>общ</sub> , мм
	гидроциклона, Д	входного патрубка, d <sub>вх</sub>	патрубка верхнего слива, d <sub>в.сл.</sub>	патрубка нижнего слива, d <sub>н.сл.</sub>			
1	2	3	4	5	6	7	8
ГЦ-40-I	40	15	10	5	5	40	565
ГЦ-80-I	80	20	20	10	5	80	745
ГЦ-100-I	100	20	20	10	5	100	1120

Работает экспериментальная установка следующим образом. Устанавливается требуемое давление на входе в гидроциклон, а также противодействие на него сливах. Через 15 мин после начала работы экспериментальной установки, когда движение воды стало установившимся, отбираются пробы из пробоотборников ПР-1 и ПР-2 [8].

Концентрация взвешенных веществ в пробах определяется весовым методом [10].

Эффект очистки от взвеси  $\mathcal{E}_{в.в.}$  %, определяется по формуле [8]:

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

где  $C_{в.в.}$  – концентрация взвешенных веществ в воде, поступающей на очистку, мг/л,

$C_{в.в.}^{в.сл.}$  – концентрация взвешенных веществ в очищенной воде (с верхнего слива гидроциклонов), мг/л.

Концентрация взвешенных веществ в пробах воды, определялась весовым методом [8, 10]. Температура воды определялась с помощью ртутного термометра с ценой деления 0,1 °С. Расход воды со сливов гидроциклонов измерялся объемным методом с помощью секундомера и мерного цилиндра объемом 1 л с ценой деления 0,01 л [8].

### Результаты экспериментальных исследований

Результаты экспериментов по очистке воды в напорных гидроциклонах представлены в табл. 2-2а.

Таблица 2

### Результаты исследований очистки природных вод в напорных гидроциклонах

Обозначение гидроциклона	Температура воды, °С	Давление, МПа		Расход воды, л/с	
		на входе в гидроциклон	на сливах гидроциклона	через верхний слив гидроциклона	через нижний слив гидроциклона
1	2	3	4	5	6
ГЦ-40-I	19,8	0,3	0,1	0,24	0,05
		0,4	0,1	0,26	0,06
		0,4	0,2	0,24	0,05
		0,5	0,1	0,28	0,09
		0,5	0,2	0,27	0,08
		0,5	0,3	0,25	0,07
		0,6	0,1	0,35	0,14
		0,6	0,2	0,31	0,12
		0,6	0,3	0,29	0,1
ГЦ-90-I	20,1	0,3	0,1	1,15	0,27
		0,4	0,1	1,33	0,29
		0,4	0,2	1,28	0,27
		0,5	0,1	1,54	0,37
		0,5	0,2	1,5	0,35
		0,5	0,3	1,47	0,33
		0,6	0,1	1,71	0,43
		0,6	0,2	1,69	0,41
		0,6	0,3	1,66	0,4
		0,6	0,4	1,63	0,32

Продолжение таблицы 2

ГЦ-100-I	20,2	0,3	0,1	2,4	0,37
		0,4	0,1	2,26	0,45
		0,4	0,2	1,90	0,43
		0,5	0,1	2,42	0,58
		0,5	0,2	2,29	0,51
		0,5	0,3	1,92	0,44
		0,6	0,1	2,47	0,61
		0,6	0,2	2,44	0,59
		0,6	0,3	2,42	0,56
		0,6	0,4	2,4	0,43
		0,3	0,1	2,4	0,37

Таблица 2а

Результаты исследований очистки природных вод в напорных гидроциклонах  
(продолжение)

Концентрация взвеси, мг/л		Эффект очистки от взвеси $\mathcal{E}_{в.в.}, \%$
в исходной воде, $C_{в.в.}$	в очищенной воде, $C_{в.в.}^{в.с.}$	
7	8	9
52	22	58
49	17	65
47	19	60
54	16	70
48	16	67
46	17	63
51	17	67
49	18	63
55	22	60
56	24	57
54	26	52
49	20	59
51	25	51
53	20	63
48	19	60
47	21	55
55	18	67
53	19	64
54	20	63
52	21	60
56	29	48
54	26	52
51	26	49
49	21	57
52	24	54
53	26	51
48	17	65
54	20	63
55	21	62
52	21	60

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет сделать следующие выводы:

- содержание взвеси в исходной воде составила 46-56 мг/л;
- концентрация взвеси в очищенной воде не превышала 16-26 мг/л;
- с ростом давления на входе в гидроциклоны эффективность очистки природных вод от взвеси возрастает, а с увеличением противодействия на сливах она снижается;

г) с увеличением давления на входе в гидроциклоны производительность этих аппаратов растет, а с увеличением противодавления на их сливах она снижается;

д) для очистки природных вод от взвешенных веществ целесообразно применять гидроциклон типа ГЦ-80-II, имеющего достаточно высокие эффективность и производительность.

Объем отстойника для подготовки природной воды, используемой в системах ППД,  $W_{отс}$ , м<sup>3</sup>, составляет [9]:

$$W_{отс} = Q_p \cdot T_{отс}, \quad (2)$$

где  $Q_p$  – расчетный расход воды, подаваемой на очистку, м<sup>3</sup>/ч;

$T_{отс}$  – необходимое время пребывания воды в отстойнике, ч.

Величина  $T_{отс}$ , ч, составляет [9]:

$$T_{отс} = t_2 \left( \frac{H_p}{h_2} \right)^n, \quad (3)$$

где  $H_p$  – рабочая глубина отстойника;

$t_2$  – время необходимое для достижения в цилиндре с глубиной воды  $h_2 = 0,4$  м эффекта очистки от взвешенных веществ  $\mathcal{E}_n$ , ч;

$n$  – показатель степени.

Величина  $n$  составляет [9]:

$$n = \frac{\lg t_2 - \lg t_1}{\lg h_2 - \lg h_1}, \quad (4)$$

где  $t_1$  – время необходимое для достижения в цилиндре глубиной  $h_1 = 0,2$  м эффекта очистки от взвешенных веществ  $\mathcal{E}_n$ , ч.

Величина  $\mathcal{E}_n$ , %, составляет [9]:

$$\mathcal{E}_n = \frac{C_{в.в.}^{ср} - 10}{C_{в.в.}^{ср}} \times 100, \quad (5)$$

где  $C_{в.в.}^{ср}$  – средняя концентрация взвеси в воде, заливаемой в цилиндры, до начала отстаивания, мг/л.

На рис. 4 представлена схема определения величин  $t_1$  и  $t_2$ .

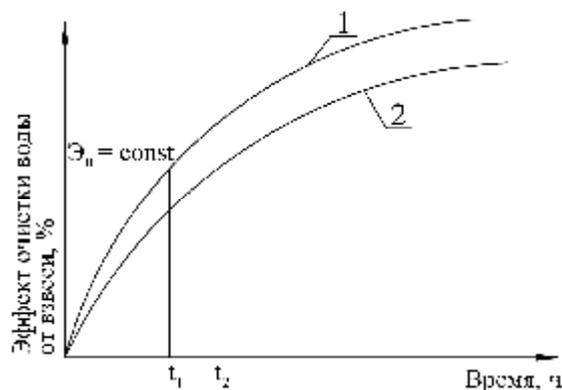


Рис. 4. Определение времени отстаивания в цилиндрах:

1 – зависимость  $\mathcal{E}_{в.в.} = f(t)$  при глубине отстаивания  $h_1$ ;

2 – зависимость  $\mathcal{E}_{в.в.} = f(t)$  при глубине отстаивания  $h_2$

Величина  $C_{в.в.}^{ср}$ , мг/л, составляет [6]:

$$C_{в.в.}^{ср} = \frac{\sum_{i=1}^5 C_{в.в.}^i}{5}, \quad (6)$$

где  $C_{в.в.}^i$  – концентрация взвеси в пробе, отобранной с нижнего слива гидроциклонов перед заливкой цилиндров для отстаивания, мг/л. Из пробоотборника ПР-1 отбирается

проба воды объемом 10 мл, в которой определяется взвеси ( $C_{в.в.}^i$ ). Заливаются цилиндра для отстаивания: один до отметки  $B$ , а второй – до отметки  $A$ . Через 10 мин с помощью сифона из каждого цилиндра отбираются пробы воды, в которых определяется концентрация взвеси ( $C_{в.в.}^k$ ).

Эффект отстаивания  $\mathcal{E}_{от}$ , %, определяется по формуле [6]:

$$\mathcal{E}_{от} = \frac{C_{в.в.}^i - C_{в.в.}^k}{C_{в.в.}^i} \cdot 100, \quad (7)$$

Описанные выше действия повторяются при времени отстаивания в цилиндрах равном 20, 30, 60 и 120 минут.

Строятся зависимости  $\mathcal{E} = f(t)$  для глубины отстаивания  $h_1 = 200$  мм и  $h_2 = 400$  мм.

Результаты определения времени  $T_{отс}$  при  $H_p = 1,5$  м представлены в табл. 3-3а. Таким образом, время пребывания в отстойнике для снижения концентрации взвеси в природной воде до 10 мг/л составляет при  $H_p = 1,5$  м 50-60 мин.

Таблица 3

### Определение времени отстаивания

Обозначение гидроциклона	Температура воды, °С	Давление, МПа		Средняя концентрация взвеси в воде до начала отстаивания, $C_{в.в.}^{ср}$ , мг/л
		на входе в гидроциклон	на выходе в гидроциклон	
1	2	3	4	5
ГЦ-40-І	20,1	0,4	0,2	20
ГЦ-80-І	19,8	0,4	0,2	24
ГЦ-100-І	19,9	0,4	0,2	25

Таблица 3а

### Определение времени отстаивания (продолжение)

$\mathcal{E}_n$ , %	$t_1$ , мин	$t_2$ , мин	$n$	$H_p$ , мм	$T_{отс}$ , мин
6	7	8	9	10	11
50	18	25	0,47	1500	47
58	16	24	0,6	1500	53
60	17	26	0,6	1500	57

### Заключение

Проведенные экспериментальные исследования определили оптимальный тип гидроциклона и технологические параметры его работы при очистке воды из поверхностных источников от взвеси. Кроме того определено время отстаивания, необходимое для очистки воды, которая подвергалась гидроциклонной обработке, от взвешенных веществ. Все это позволяет проектировать установки типа БГО для подготовки технической воды, используемой на нефтепромыслах для заводнения продуктивных горизонтов.

### Список библиографических ссылок

1. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Шешегова И. Г., Урмитова Н. С. Гидроциклонные установки подготовки воды для заводнения нефтеносных горизонтов с целью повышения их нефтеотдачи // Нефтегазовое дело. 2015. № 4. С. 199–215.
2. Адельшин А. А., Адельшин А. Б., Урмитова Н. С. Гидродинамическая очистка нефтепромысловых сточных вод на основе применения закрученных потоков. Казань : КГАСУ, 2011. 245 с.

3. Бусарев А. В., Шешегова И. Г., Низамова А. Х. Подготовка технической воды для заводнения продуктивных нефтеносных горизонтов // Известия КГАСУ. 2017. № 4 (42). С. 273–279.
4. Бусарев А. В., Шешегова И. Г., Степанов В.О. Некоторые аспекты очистки стоков, образующихся при промывке скорых фильтров // Известия КГАСУ. 2018. № 2 (44). С. 193–200.
5. Zhu G., Liow I. L. Experimental Study of particle separation and the fishhook effect in mini-hydrocyclone. // Chemical engineering science. 2014. V. 111. P. 94–105.
6. Nageswararao K., Medronho R. F. Fish hook effect in centrifugal classifiers – a further analysis. International Journal of Mineral Processing. 2014. V. 132. P. 43–58.
7. Dueck I., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone. – Minerals Engineering. 2014. V. 62. P. 25–30.
8. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Каюмов Ф. Ф. К вопросу очистки поверхностных стоков в гидроциклонных установках // Современные наукоемкие технологии. 2016. № 10. С. 229–232.
9. Пономарев В. Г., Иоакимис З. Г., Монгайт И. Л. Очистка сточных вод нефтеперерабатывающих заводов. М. : Химия, 1985. 256 с.
10. Калицун В. И., Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Алексеев Е. В. Лабораторный практикум по водоотведению и очистки сточных вод. М. : Стройиздат, 2000. 272 с.

**Busarev Andrey Valerevich**

candidate of technical sciences, assistant professor

E-mail: [reder1@myrambler.ru](mailto:reder1@myrambler.ru)

**Sheshegova Irina Gennadievna**

senior lecturer

E-mail: [ig-7@mail.ru](mailto:ig-7@mail.ru)

**Kazan State University of Architecture and Engineering**

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

**Tazmieva Inara Nailevna**

E-mail: [inara\\_tazmieva@mail.ru](mailto:inara_tazmieva@mail.ru)

**ООО «Mayak-NK»**

The organization address: 420029, Russia, Kazan, Sibirskii tract, 39

**Research of the process of preparation of technical water  
for flooding oil-bearing horizons using pressure hydrocyclones****Abstract**

*Problem statement.* To increase the oil recovery of productive horizons, a method of maintaining reservoir pressure is used. The essence of this method is the injection of water from surface sources into the oil-bearing horizons through injection wells. In order to prevent clogging of the porous channels of the oil-bearing horizons, it is necessary to purify the water pumped into the injection wells from suspended solids. This article is devoted to water purification for flooding of oil-bearing horizons from suspended matter using «hydrocyclone-sedimentation unit» units. The purpose of these studies is to determine the settling time necessary for the purification of water treated in the pressure cylindrical hydrocyclones of the Kazan State University of Architecture and Engineering (KSUAE).

*Results.* The main results of these studies consist in determining the settling time of the water necessary for cleaning water from suspended matter, treated in pressure hydrocyclones.

*Conclusions.* The significance of the results obtained for the construction industry is to determine the settling time necessary for the purification from suspended solids of water, which has been treated in pressure hydrocyclones, which makes it possible to perform technological calculations for units such as «hydrocyclone-sedimentation unit».

**Keywords:** technical water for waterflooding of oil-bearing horizons, purification of water from surface sources from suspended solids, «hydrocyclone-settler» type unit,

determination of sedimentation time for purification from suspended water processed in pressure hydrocyclones.

### References

1. Busarev A. V., Selyugin A. S., Sheshcheva I. G., Urmitova N. S. Hydrocyclone water treatment plants for water flooding of oil-bearing horizons with the purpose of increasing their oil recovery // *Neftegazovoye delo*. 2015. № 4. P. 199–215.
2. Adelshin A. A., Adelshin A. B., Urmitova N. S. Hydrodynamic cleaning of oilfield sewage based on the use of swirling flows. Kazan : KGASU, 2011. 245 p.
3. Busarev A. V., Sheshegova I. G., Nizamova A. Kh. Preparation of technical water for flooding productive oil-bearing horizons // *Izvestiya KGASU*. 2017. № 4 (42). P. 273–279.
4. Busarev A. V., Sheshegova I. G., Stepanov V. O. Some aspects of wastewater treatment, formed during the washing of fast filters // *Izvestiya KGASU*. 2018. № 2 (44). P. 193–200.
5. Zhu G., Liov J. L. Experimental study of particle separation and the fishhook effect in mini-hydrocyclone // *Chemical Engineering Science*. 2014. V. 111. P. 94–105.
6. Nageswararao K., Medronho R. F. Fish hook effect in centrifugal classifiers – a further analysis // *International Journal of Mineral Processing*. 2014. V. 132. P. 43–58.
7. Dueck I., Farghaly M., Neesse Th. The theoretical partition curve of the hydrocyclone // *Minerals Engineering*. 2014. V. 62. P. 25–30.
8. Busarev A. V., Selyugin A. S., Kayumov F. F. On the issue of cleaning surface runoff in hydrocyclone installations // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. 2016. № 10. P. 229–232.
9. Ponomarev V. G., Ioakimis Z. G., Mongajt I. L. Waste water treatment of oil refineries. M. : Chemistry, 1985. 256 p.
10. Kalitsun V. I., Laskov Yu. M., Voronov Yu. V., Alekseyev Ye. V. Laboratory workshop on wastewater disposal and treatment. M. : Stroyizdat, 2000. 272 p.