



**УДК 628.162.1:628.112.2**

**Б.М. БОРИСОВ**, к.т.н., заведующий лабораторией

Крымский научно-исследовательский центр Института гидротехники и мелиорации УААН, г. Симферополь

## ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА ОЧИСТКИ ВОДЫ В УГОЛЬНО-ГРАНОДИОРИТНЫХ ФИЛЬТРАХ

Приведены результаты исследований устойчивости процесса очистки воды в угольно-гранодиоритных фильтрах. Для оптимизации процесса очистки выбран размер зерен обеих загрузок и найдены режимные параметры работы фильтра по высоте слоя, скорости фильтрования и концентрации загрязнения.

**устойчивость, очистка, вода, гранулированный активированный уголь (ГАУ), угольно-гранодиоритный фильтр**

Устойчивость системы водоочистки заключается в ее способности нормально функционировать под влиянием различных факторов внешней среды и возвращаться к исходному состоянию после прекращения их воздействия [1–8]. Стабильность систем очистки воды во многих научных исследованиях и производственной практике рассматривается как отсутствие сбоев в качестве очистки [9–11]. Устойчивость системы обеспечивается сохранением уровня ее нормативных параметров,

а именно эффекта очистки воды, продолжительности фильтровального периода (фильтроцикла), остаточных явлений (деформаций) в фильтрующей загрузке. Последний фактор наряду с ремонтпригодностью является элементом надежности системы. Устойчивость водоочистных систем должна обеспечивать нормативное качество очистки воды также в чрезвычайных условиях (при стихийных бедствиях, терактах и т.п.).

Эффективность работы двухслойных фильтровальных сооружений в значительной степени зависит от санитарно-технологической надежности фракционного состава и размеров фильтрующих слоев, режима фильтрования, доз реагентов и других факторов. Устойчивость процесса очистки, его эффективность и надежность определяются адгезионно-сорбционной способностью фильтрующих загрузок, влияющих на эффект фильтрования в двухслойном фильтре.

Для обеспечения высокой степени очистки воды в исследуемых фильтрах оптимизировали размер зерен обеих загрузок. Экспериментально апробированный фракционный состав загрузок корректировали таким образом, чтобы гидравлическая крупность  $\omega$  (мм/с) наибольших по размеру гранул активированного угля (ГАУ) была меньше, чем у наименьших зерен гранодиоритного слоя загрузки, то есть

$$\omega_{\text{ГАУ}}^{\text{max}} < \omega_{\text{гран}}^{\text{min}} \quad (1)$$

При соблюдении условия (1) по завершении проточной водной промывки крупные угольные гранулы оседают медленнее, чем гранодиоритные, тем самым предотвращается смешение слоев в зоне их контакта. Полная ликвидация или минимизация смешения угольных и гранодиоритных зерен в пограничном слое предотвращает накопление в нем коллоидно-дисперсных частиц загрязнений и прилипание друг к другу зерен и гранул. Благодаря этому устраняется снижение эффекта очистки воды в пограничном слое. Опытным путем установлено, что почти полное отсутствие смешения (взаимопроникновение слоев не превышает 2–3 мм) угольного и гранодиоритного слоев достигается тогда, когда диаметр наименьших зерен крымского песка  $d_n \geq 0,7$  мм, а диаметр наибольших гранул ГАУ марки «Сорбер» –  $d_{\text{гран}} \leq 2,5$  мм. На основании результатов экспериментальных исследований процессов очистки воды в однослойных гранодиоритных фильтрах и в слое ГАУ двухслойных фильтров была построена устойчивая и оптимизированная (с точки зрения выполнения условия  $t_3 = 1,1 - 1,3t_{\text{н}}$ , где  $t_3$  – продолжительность санитарно-защитного периода;  $t_{\text{н}}$  – время достижения предельных потерь напора) структурная модель двухслойного угольно-гранодиоритного фильтра. Высота гранодиоритного слоя с эквивалентным диаметром зерен 0,84 мм была принята равной 0,9 м, а толщина угольного слоя марки «Сорбер», имеющего эквивалентный диаметр  $d_s = 1,3$  мм, – 0,35 м.

В соответствии с результатами исследований время санитарно-защитного действия  $t_3$  такого угольного слоя равняется 13 часам (табл. 1), а гранодиоритного слоя – 16 часам (табл. 2).

**Таблица 1 – Исходные опытные данные для определения зависимости  $t_3 = f(x_1, \dots, x_5)$  и расчета значений  $t_3$  для ГАУ марки «Сорбер»**

№№ опытов	$t_3$ , час	$x_1$ , м	$x_2$ , мм	$x_3$ , м/час	$x_4$ , мг/дм <sup>3</sup>	$x_5$ , мг/дм <sup>3</sup>
1	0,0	0,10	1,3	7,0	12,1	1,25
2	0,0	0,15	1,3	7,1	12,1	1,20
3	2,0	0,20	1,3	7,0	11,9	1,21
4	6,0	0,25	1,3	6,9	11,9	1,27
5	8,0	0,30	1,3	7,2	12,2	1,25
6	13,0	0,35	1,3	7,0	11,8	1,22
7	16,0	0,40	1,3	7,3	12,0	1,25
8	22,0	0,45	1,3	6,8	11,9	1,24
9	23,0	0,50	1,3	7,2	12,1	1,27
10	32,0	0,50	1,3	5,0	11,8	1,25
11	28,0	0,50	1,3	6,1	12,0	1,30
12	23,0	0,50	1,3	7,2	12,1	1,28
13	19,0	0,50	1,3	8,0	12,0	1,23
14	16,0	0,50	1,3	9,1	12,3	1,27
15	12,0	0,50	1,3	10,2	11,8	1,21
16	9,0	0,50	1,3	11,0	11,9	1,27
17	6,0	0,50	1,3	12,1	11,7	1,25
18	1,5	0,50	1,3	13,0	12,4	1,30
19	55,0	0,50	1,3	7,0	2,1	1,19
20	51,0	0,50	1,3	7,0	3,3	1,28
21	49,0	0,50	1,3	6,9	4,0	1,27
22	46,0	0,50	1,3	7,0	4,9	1,25
23	38,0	0,50	1,3	7,3	6,1	1,24
24	39,0	0,50	1,3	7,2	7,0	1,28
25	35,0	0,50	1,3	7,1	8,2	1,27
26	31,0	0,50	1,3	7,3	9,2	1,25
27	29,0	0,50	1,3	7,2	10,0	1,24
28	23,0	0,50	1,3	7,0	12,0	1,28
29	17,0	0,50	1,3	7,0	14,1	1,27
30	11,0	0,50	1,3	7,0	16,2	1,29

Примечание:  $t_3$  – время санитарно-защитного действия слоя ГАУ;  $x_1$  – высота слоя, м;  $x_2$  – эквивалентный диаметр  $d_s$ , мм;  $x_3$  – скорость фильтрования, м/час;  $x_4$  и  $x_5$  – концентрация загрязнений и дозы реагентов в воде перед ГАУ «Сорбер», мг/дм<sup>3</sup>.

**Таблица 2 – Исходные данные (база) для регрессионного анализа полученных экспериментальных данных**

№№ опытов	$t_3$ , час	$x_1$ , м	$x_2$ , мм	$x_3$ , м/час	$x_4$ , мг/дм <sup>3</sup>	$x_5$ , мг/дм <sup>3</sup>
1	4,50	0,13	0,84	8,00	3,30	5,00
2	5,00	0,27	0,84	8,00	3,20	4,90
3	13,00	0,39	0,84	8,00	3,40	4,80
4	14,50	0,50	0,84	8,00	3,20	4,90
5	17,50	0,63	0,84	8,00	3,30	4,70
6	18,50	0,76	0,84	8,00	3,30	5,00



№№ опытов	$t_3$ , час	$x_1$ , м	$x_2$ , мм	$x_3$ , м/час	$x_4$ , мг/дм <sup>3</sup>	$x_5$ , мг/дм <sup>3</sup>
7	22,00	0,88	0,84	8,00	3,30	5,00
8	28,50	1,00	0,84	8,00	3,30	5,00
9	52,50	1,00	0,84	4,00	3,30	4,90
10	46,00	1,00	0,84	5,00	3,20	4,80
11	39,00	1,00	0,84	6,00	3,30	4,70
12	33,00	1,00	0,84	7,00	3,40	4,90

Примечание:  $t_3$  – время санитарно-защитного действия гранодиоритного слоя, час;  $x_1$  – высота слоя, м;  $x_2$  – эквивалентный диаметр, мм;  $x_3$  – скорость фильтрования  $u_{\text{ф}}$ , м/час;  $x_4$  и  $x_5$  – концентрация загрязнений и дозы реагентов в воде перед гранодиоритным слоем, мг/дм<sup>3</sup>.

Поскольку для нижнего гранодиоритного слоя в ходе опытов установлено, что  $t_3 = 1,29 t_{\text{н}}$ , то опытное  $t_{\text{н}} = 12,5$  часа. В результате имеем  $t_3^{\text{ГАЗ}} \approx t_{\text{н}}^{\text{гран}}$ , т.е. продолжительность санитарно-защитного действия угольной загрузки примерно равна времени достижения величины предельных потерь напора в нижнем гранодиоритном слое, что обосновывает возможность одновременной промывки обоих слоев.

Полученные данные позволяют сформулировать условия устойчивой работы угольно-гранодиоритного двухслойного фильтра в оптимальном режиме:

1. Скорость фильтрования  $u_{\text{ф}}$  должна равняться 7 м/час.
2. Вода, поступающая на очистку, должна иметь следующие физико-химические показатели: мутность – не более 12,0 мг/дм<sup>3</sup>, запах – 5 баллов (200 п.ч.); цветность – 70 градусов ПКС;  $t$  – до 24,5 °С; концентрацию хлорреагента – 1,3 мг/дм<sup>3</sup>; окисляемость – до 7 мг/дм<sup>3</sup>.

3. Качество очищенной воды должно соответствовать нормативным санитарно-гигиеническим требованиям.

4. Продолжительность устойчивой работы фильтра до промывки должна составлять не менее 12 часов.

Результатом оптимизации работы фильтра является достижение равенства значений  $t_3^{\text{ГАЗ}}$  и  $t_{\text{н}}^{\text{гран}}$ , обеспечение нормативных эффектов очистки воды и продолжительности санитарно-защитного действия, а также одновременность промывки обеих фильтрующих загрузок.

Ухудшение качества исходной воды, например, увеличение ее мутности до 20 мг/дм<sup>3</sup> при неизменных цветности, запахе, окисляемости, или потребность в большей производительности предлагаемых современных двухслойных фильтров изменят структурно-технологические условия устойчивости и оптимизации их работы. Это подтверждают рассмотренные ниже примеры.

#### Пример № 1

Мутность исходной воды  $M_{\text{исх}} = 16,2$  мг/дм<sup>3</sup> и  $u_{\text{ф}} = 7$  м/час;  $x^{\text{ГАЗ}} = 0,5$  м;  $x^{\text{гран}} = 1,0$  м;  $C_{\text{Cl}_2} = 1,29$  мг/дм<sup>3</sup>;  $D_{\text{к}}$  – доза реагента.

Для процесса очистки воды величина опытного  $t_3^{\text{ГАЗ}} =$

$$11 \text{ часов, а } t_{\text{н}}^{\text{гран}} = \frac{t_3^{\text{гран}}}{1,20}.$$

$$t_3^{\text{гран}} = 52,2 + 23,3x - 0,03d_3 - 4,8u_{\text{ф}} - 1,4M_{\text{исх}} - 1,6D_{\text{к}}. \quad (2)$$

По формуле (2) определяем

$$t_3^{\text{гран}} = 52,2 + 23,3 - 0,03 \cdot 0,84 - 4,8 \cdot 7,0 - 1,4 \cdot 16,2 - 1,6 \cdot 5 = 12,02 \text{ часа.}$$

$$\text{Тогда } t_{\text{н}}^{\text{гран}} = \frac{t_3^{\text{гран}}}{1,20} = 10,1 \text{ часа.}$$

Получаем, что  $t_3^{\text{ГАЗ}}$  вновь по величине примерно равно  $t_{\text{н}}^{\text{гран}}$ .

Результаты расчетов и проведенных ранее исследований показывают, что при ухудшении качества исходной воды и той же производительности устойчивая работа фильтра будет обеспечиваться на основе оптимизации режима фильтрования (здесь  $t_3^{\text{ГАЗ}} \approx t_{\text{н}}^{\text{гран}}$ ), но уже при измененных параметрах его структурной модели, а именно увеличении высоты слоя ГАЗ до 0,5 м и толщины гранодиоритной фильтрующей загрузки до 1,0 м.

#### Пример № 2

$$M_{\text{исх}} = 20,8 \text{ мг/дм}^3 \text{ и } u_{\text{ф}} = 9 \text{ м/час; } x^{\text{ГАЗ}} = 0,5 \text{ м; } x^{\text{гран}} = 1,0 \text{ м; } C_{\text{Cl}_2} = 2,5 \text{ мг/дм}^3.$$

$$t_3^{\text{ГАЗ}} = 67,74 + 71,10x - 15,60d_3 - 3,68u_{\text{ф}} - 3,14M + 1,97C_{\text{Cl}_2}. \quad (3)$$

По формуле (3) определяем расчетное значение  $t_3^{\text{ГАЗ}}$ :

$$t_3^{\text{ГАЗ}} = 67,74 + 71,10 \cdot 0,5 - 15,6 \cdot 1,3 - 3,14 \cdot 20,8 + 1,97 \cdot 2,5 - 3,68 \cdot 9,0 = 0.$$

По формуле (2) рассчитываем величину  $t_3^{\text{гран}}$ :

$$t_3^{\text{гран}} = 52,2 + 23,3 - 0,03 \cdot 0,84 - 4,8 \cdot 9,0 - 1,4 \cdot 20,8 - 1,6 \cdot 5 = 0.$$

В данном режиме фильтрования работа двухслойного фильтра неустойчива, поскольку  $t_3^{\text{ГАЗ}}$  и  $t_{\text{н}}^{\text{гран}} = 0$ .

Возможным вариантом повышения устойчивости работы фильтров для условий процесса (пример № 2) будет увеличение высоты гранодиоритного слоя до 1,5 м. Данный вопрос планируется исследовать в дальнейшем.

Таким образом, изменяя параметры структурной модели двухслойного угольно-гранодиоритного фильтра в сторону увеличения, можно добиться устойчивого процесса очистки воды даже при значительном уровне ее

загрязненности и необходимом росте производительности фильтров, а также очистных сооружений в целом.

На рис. 1 и 2 приведены кривые послойной кинетики процесса очистки воды от запаха, мутности, хлороформа и ацетона, а также суммарной концентрации токсичных растворенных органических ингредиентов цветности и запаха в обеих фильтрующих загрузках угольно-гранодиоритного фильтра. Показано, что устойчивая и эффективная работа угольно-гранодиоритного фильтра обеспечивает мутность фильтрата менее  $1,5 \text{ мг/дм}^3$ ; запах – 0 баллов; снижение суммарной концентрации ингредиентов – с  $163,6 \text{ мг/дм}^3$  до  $39,0 \text{ мг/дм}^3$ , а токсичных хлороформа и ацетона – более чем в 2–3 раза, что значительно ниже существующих требований ОБУВ и ПДК [12, 13].

Кривые 1, 2, 3 (рис. 1) – для фильтров с общей высотой фильтрующей загрузки 1,25 м (0,35 м – ГАУ, 0,9 м – гранодиоритного песка), кривые 4 и 5 (рис. 2) – для угольно-гранодиоритных фильтров с общей высотой фильтрующего слоя 1,5 м (0,5 м – ГАУ «Сорбер», 1,0 – гранодиоритный песок). Анализ построенных зависимостей подтверждает устойчивость и эффективность процессов улучшения качества и безопасности воды в обоих фильтрах. Запах в очищаемой воде снижается с 5 до 2,0 и 0 баллов, мутность – с  $16,2\text{--}12,0 \text{ мг/дм}^3$  до  $1,5\text{--}0,8 \text{ мг/дм}^3$ , а суммарная концентрация растворенных токсичных органических соединений (РОС) – с  $167 \text{ мг/дм}^3$  до  $39,3 \text{ мг/дм}^3$ . То есть сбоев в качестве очистки воды не наблюдается, а концентрация растворенных органических ингредиентов, среди которых 70 %

– опасных и вредных, снижается практически в несколько раз.

К числу остаточных явлений (деформаций) в фильтрующей загрузке нормативные требования относят глинистые колонии, воронки на горизонтальной поверхности слоя, а также сверхнормативные истираемость, измельчаемость и условную механическую прочность.

### ВЫВОДЫ

В результате проведенных исследований работы фильтров установлено следующее:

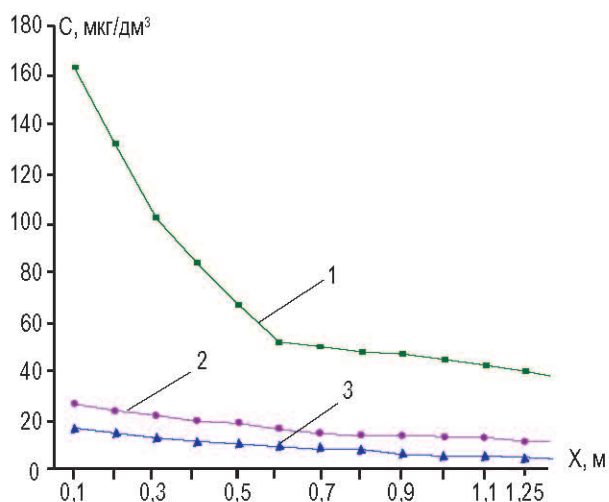
1. Уменьшение высоты фильтрующих слоев в результате фактической истираемости и измельчаемости за два года работы установки оказалось в угольном слое равным 4 см, в гранодиоритном – 7,5 см (8 и 9 % соответственно при норме 20 %) [12, 13].

2. Содержание глинистых колоний (конкреций), образовавшихся в слое ГАУ, не превышает 1 % общей площади поверхности ГАУ марки «Сорбер» в фильтре, в гранодиоритном слое – 0 % (не регламентируется).

3. Образование дестабилизирующих режимов фильтрования воронок на поверхности угольного и гранодиоритного слоев зафиксировано не было.

4. Проверка сорбционной способности ГАУ методом метиленовой сини показала, что за двухлетний период снижение сорбционной емкости не превысило 15–20 % начальной, равной  $0,47 \text{ см}^3/\text{г}$ .

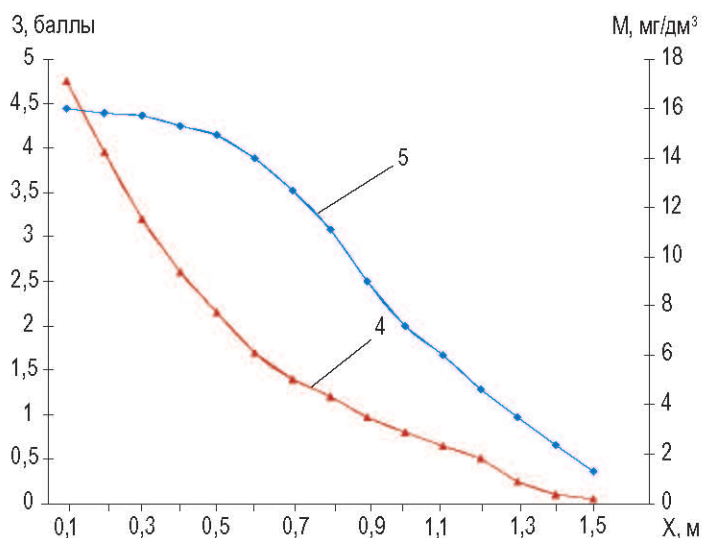
Таким образом, исследования процесса очистки и повышения безопасности воды в двухслойных угольно-



**Рисунок 1 – Эффективность очистки воды от токсичных ингредиентов в угольно-гранодиоритном фильтре**

( $x = 1,25 \text{ м}$ ;  $d_{cp} = 1,1 \text{ мм}$ ;  $u_{\phi} = 7,1 \text{ м/час}$ ;  $C_{Cl2} = 1,27 \text{ мг/дм}^3$ ):

1 – уменьшение суммарной концентрации токсичных органических ингредиентов; 2 – хлороформа; 3 – ацетона,  $\text{мг/дм}^3$



**Рисунок 2 – Результаты улучшения качества воды в угольно-гранодиоритном фильтре**

( $x = 1,5 \text{ м}$ ;  $d_{cp} = 1,1 \text{ мм}$ ;  $u_{\phi} = 7,1 \text{ м/час}$ ;  $C_{Cl2} = 1,27 \text{ мг/дм}^3$ ):

4 – запах; 5 – мутность



гранодиоритных фильтрах подтвердили устойчивость их работы, возможность оптимизации режима фильтрации с целью обеспечения нормативного и безопасного качества очистки воды и снижение эксплуатационных затрат.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Владимиров, В.А.** Риск, устойчивое развитие, синергетика [Текст] / В.А. Владимирова, Г.Г. Малинецкий. – М. : Наука, 2000. – С. 430–432.
2. **Ляпунов, А.М.** Общая задача об устойчивости движения [Текст] / А.М. Ляпунов. – М. : ГИТТЛ, 1950. – С. 470–471.
3. **Насонкина, Н.Г.** Повышение экологической безопасности систем питьевого водоснабжения [Текст] / Н.Г. Насонкина. – Макеевка : Донбасс, 2005. – С. 77–79.
4. **Проданчук, Н.Г.** Эколого-гигиенические проблемы охраны окружающей среды и здоровья человека на современном этапе [Текст] / Н.Г. Проданчук, И.В. Мудрый // Доклілля та здоров'я. – 2000. – № 4 (15). – С. 3–5.
5. **Bieber, T.I.** Water chlorination: environmental impact and health effects [Text] / T.I. Bieber, M.L. Trehu // Ed. by R.L. Yolly, P.C. Singer – Michigan : Ann Arbor. Sci, 1983. – 4, № 1. – P. 81–85.
6. **Петросов, В.А.** Эколого-экономическая безопасность хозяйственно-питьевого водоснабжения [Текст] / В.А. Петросов, Р.И. Агаджанов, С.Л. Василенко, В.Я. Кобылянский // Коммунальное хозяйство городов. – К. : Техника, 2004. – Вып. 55. – С. 11–14.
7. **Борисов, Б.М.** Условия и факторы обеспечения надежности процесса очистки воды в двухслойных угольно-гранодиоритных фильтрах [Текст] / Б.М. Борисов, В.С. Замлынний // III Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»: Збірник наукових статей. Т. 1 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2007. – С. 33–37.
8. **Кузин, А.К.** Анализ хода реализации Общегосударственной программы охраны и восстановления окружающей среды Азовского и Черного морей и предложения по ее развитию [Текст] / А.К. Кузин, В.С. Кресин, Е.Б. Уткина // III Міжнародна науково-практична конференція «Екологічна безпека: проблеми і шляхи вирішення»: Збірник наукових статей. Т. 1 / УкрНДІЕП. – Х. : Райдер, 2007. – С. 84–87.
9. **Качинский, А.Б.** Экологічна безпека України: системний аналіз перспектив покращення [Текст] / А.Б. Качинский. – К. : НіСД, 2001. – 312 с.
10. **Гончарук, В.В.** Вода: проблемы устойчивого развития цивилизации в XXI веке [Текст] / В.В. Гончарук. – К. : ИКХХВ НАН України, 2003. – С. 45–47.
11. **Гончарук, В.В.** Современные проблемы технологии подготовки питьевой воды [Текст] / В.В. Гончарук, Н.А. Клименко, Л.А. Савчина, Т.Л. Врубель, И.П. Козятник // Химия и технология воды. – 2006. – Т. 28. – № 1. – С. 16–19, 21–23, 26–28, 30–31.
12. **Державні санітарні правила і норми «Вода питна. Гігієнічні вимоги до якості води централізованого господарсько-питного водопостачання».** Затверджені наказом МОЗ України від 23.12.96 № 383.
13. **Цебрєнко, М.В.** Бактерицидные фильтрующие материалы [Текст] / И.А. Мельник, Н.М. Резанова, И.А. Цебрєнко // Збірник трудів МНПК: Сучасні проблеми охорони довкілля, раціонального використання водних ресурсів та очистки природних і стічних вод. – Миргород – Київ: «Знання», 2007. – С. 40–43.

У роботі наведено результати досліджень стійкого процесу очищення води у вугільно-гранодиоритних фільтрах. Для оптимізації процесу очищення води обрано розмір зерен обох завантажень та знайдено режимні параметри роботи фільтру за висотою шару, швидкістю фільтрування і концентрацією забруднення.

The article informs about investigation results of stability of water treatment process in coal-granodiorite filters.

*Поступила в редакцію 28.03.2008*