

Серпокрялов Николай Сергеевич

Ростовский государственный Строительный Университет
Доктор технических наук, профессор
Serpokrilov Nikolai Sergeevich
Rostov State University of Civil Engineering
Professor
E-Mail: serpokrilov@nm.ru

Баринов Артем Михайлович

Ростовский государственный Строительный Университет
Аспирант
Barinov Artiom Mihailovich
Rostov State University of Civil Engineering
Postgraduate student
E-Mail: artfrost89@yandex.ru

Спиридонова Лариса Гурамовна

Ростовский государственный Строительный Университет
Аспирант
Spiridonova Larisa Guramovna
Rostov State University of Civil Engineering
Postgraduate student
E-Mail: spiridonova-larisa1985@yandex.ru,

Серпокрялов Евгений Николаевич

Ростовский государственный Строительный Университет
Аспирант
Serpokrilov Evgeniy Nikolaevich
Rostov State University of Civil Engineering
Postgraduate student
E-Mail: artfrost89@yandex.ru

Водоснабжение и водоотведение

**Исследование влияния обработки ультразвуком загрузки
при водяной промывке фильтров**

Investigation of the influence of sonication of filter's media during water washing

Аннотация: В ходе разработок альтернативных способов промывки скорых фильтров были проведены исследования по воздействию ультразвуковых волн на качество промывки загрузки. Обрабатываемым материалом являлись кварцевый песок и антрацит, взятые из фильтров перед промывкой. Исследование проводилось по схеме полного факторного эксперимента. На основе положительных результатов была разработана и запатентована полезная модель «Подвижного устройства для интенсификации промывки загрузки скорых фильтров».

Abstract: During the development of alternative methods of flushing rapid filters have been conducted researches on the effects of ultrasonic waves on the quality of the media wash. Processed material was a quartz sand and anthracite, taken from the filters before flushing. The study was

conducted according to the scheme of full factorial experiment. Based on the positive results was developed and patented utility model "of mobile unit to intensify washing media rapid filters."

Ключевые слова: Скорые фильтры; ультразвук; исследование; матрица планирования эксперимента; промывка фильтров.

Key words: Rapid filters; ultrasound; research; experiment planning matrix; flushing filters.

В настоящее время в области коммунального и промышленного водоснабжения при фильтровании воды преобладают зернистые фильтры, большей частью - скорые. При этом основные способы обратной промывки этих фильтров давно известны и хорошо изучены [2,3]. К ним относят: водную, воздушную и водовоздушную промывку. В течение последних десятилетий данные способы совершенствовались, но до сих пор у них остается ряд недостатков. В связи с чем, возникла необходимость в разработке альтернативных методов промывки промышленных фильтров. В основу новой разработки была положена идея воздействия ультразвуковых волн при промывке загрузки фильтров, что потребовало проведения экспериментальных исследований по данной теме.

Целью их являлся анализ влияния и эффективности воздействия ультразвука на качество промывки загрузки скорых фильтров. Под улучшением качества понимается повышение степени очистки загрузки от загрязнений и сокращение расхода промывной воды, т.е. времени промывки.

В качестве обрабатываемого материала использовались кварцевый песок и антрацит, взятые из фильтров перед промывкой. В качестве источника ультразвука – промышленная ультразвуковая машинка.

Интенсивность водяной промывки принималась постоянной в установленных нормативами границ (12 л/с·м²).

Исследования проводились следующим образом: необходимый объем загрузки помещался в стакан (модель фильтра), добавлялся объем воды (300 мл) и на загрузку производилось воздействие ультразвуком при постоянном перемешивании, имитирующем взрыхление загрузки при промывке. Затем загрузка промывалась в течение определенного времени.

Качество промывки характеризовало среднее количество взвешенных веществ в промывной воде и остаточное содержание взвешенных веществ в загрузке, мг/л.

При проведении предварительного эксперимента было установлено, что воздействие ультразвука улучшает качество отмывки загрузки. При этом эффективность отмывки загрузки при времени воздействия 10 мин. и 30 мин. почти равны. Поэтому было решено провести активный эксперимент по оптимизации технологии промывки с применением ультразвука.

Были определены факторы эксперимента: время воздействия ультразвука (x_1), мин., время промывки водой (x_2), мин, объем загрузки (x_3), см³. Параметры оптимизации: остаточное содержание взвешенных веществ в загрузке (y_1), мг/г, среднее количество взвешенных веществ в промывной воде (y_2), мг/л. Количество взвешенных веществ принималось в пересчете на 1 см³ загрузки.

Исходя из априорной информации, была установлена факторная область исследований эксперимента (табл.1).

Таблица 1

Уровни и интервалы варьирования факторов

Фактор	Размерность	Уровни факторов			Интервал варьирования
		-	0	+	
x ₁	мин	0,5	3,5	6,5	3
x ₂	мин	1	3	5	2
x ₃	см ³	50	150	250	100

Было реализовано два дробных факторных эксперимента типа ДФЭ 2³⁻¹: 1 – на загрузке из антрацита, 2 – песка. Размер фракций загрузки в обоих случаях составлял 1,2 – 2,2 мм.

Опыты проводились согласно матрице планирования экспериментов [1], с двумя повторностями в каждой точке. Исследования проводили по блокам: 1 – на антрацитовой и 2 – на песчаной загрузке.

Матрица планирования и результаты эксперимента на антрацитовой загрузке приведены в табл.2.

Таблица 2

Матрица планирования и результаты эксперимента на антрацитовой загрузке

№ п/п	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁			y ₂		
				y ₁ '	y ₁ ''	y ₁	y ₂ '	y ₂ ''	y ₂
1	+	+	+	2,61	4,18	3,40	0,38	0,412	0,396
2	+	-	-	2,06	4,24	3,15	0,90	0,78	0,84
3	-	+	-	1,70	2,42	2,06	0,06	0,10	0,08
4	-	-	+	5,77	6,29	6,03	0,48	0,46	0,47

Примечание: две серии опытов y' и y'' необходимы для проверки воспроизводимости опыта в каждой точке факторной области.

Далее результаты по y₁ и y₂ обрабатывались по отдельности.

Для проверки воспроизводимости опытов ставилась нулевая гипотеза [3] об отсутствии различий между дисперсиями по критерию Кохрена (табл.3).

Таблица 3

Расчет дисперсии воспроизводимости

№	y ₁ '	y ₁ ''	y ₁	(y ₁ ' - y ₁) ²
1	2,61	4,18	3,40	0,616
2	2,06	4,24	3,15	1,19
3	1,70	2,42	2,06	0,13
4	5,77	6,29	6,03	0,07

$$\Sigma D = 2,006$$

Тогда критерий Кохрена определяется как:

$$G_p = D_{\max} / \Sigma D,$$

$$G_p = 1,19 / 2,006 = 0,593$$

Определялось табличное значение критерия (G_{st}) при α = 0,05 и k = n - 1, где n – число повторных опытов, G_{st} = 0,907.

$$G_p < G_{st} ,$$

следовательно, дисперсии однородны, что говорит о воспроизводимости опытов.

Далее определялись коэффициенты в уравнении регрессии $y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3$ по зависимостям [3]:

$$b_0 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \quad b_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N y_j \cdot x_{ji} ,$$

где N – количество опытов (N = 4).

$$b_0 = 1/4(3,4 + 3,15 + 2,06 + 6,03) = 3,66;$$

$$b_1 = 1/4(3,4 + 3,15 - 2,06 - 6,03) = - 0,39;$$

$$b_2 = 1/4(3,4 - 3,15 + 2,06 - 6,03) = - 0,93;$$

$$b_3 = 1/4(3,4 - 3,15 - 2,06 + 6,03) = 1,06.$$

Определение значимости полученных коэффициентов проверялось с помощью нулевой гипотезы о значимости коэффициентов при проверке следующего неравенства:

$$|b_i| \geq S_b \cdot t_{st},$$

где t_{st} - табличное значение критерия Стьюдента при $\alpha = 0,05$ и $k = N(n - 1)$, $t_{st} = 2,776$;

S_b – дисперсия по коэффициентам, определяемая по формуле:

$$S_b = \frac{\sqrt{S_{bi}^2}}{N \cdot (n - 1)}, S_b^2 = \Sigma D.$$

$$S_b = \frac{\sqrt{2,006}}{4 \cdot (2 - 1)} = 0,334$$

$$S_b \cdot t_{st} = 0,334 \cdot 2,776 = 0,927$$

Отсюда сделали вывод, что коэффициент b_1 незначим для уравнения регрессии (содержание взвешенных веществ в загрузке), которое будет иметь вид:

$$y_1 = 3,66 - 0,93 x_2 + 1,06 x_3. \quad (1)$$

По этой же методике аналогично была произведена обработка данных по y_2 (среднее количество взвешенных веществ в промывной воде).

В результате уравнение регрессии приняло вид:

$$y_2 = 0,447 + 0,172 x_1 - 0,209 x_2 - 0,054 x_3 \quad (2)$$

По критерию Фишера уравнение регрессии адекватно описывает процесс.

Полученные уравнения регрессии было необходимо преобразовать в уравнения с натуральными значениями факторов (не кодированными). Для этого использовалась следующая зависимость[3]:

$$y = b_0 + b_1 \frac{x_1 - x_{01}}{\Delta x_1} + b_2 \frac{x_2 - x_{02}}{\Delta x_2} + b_3 \frac{x_3 - x_{03}}{\Delta x_3},$$

где x_{0i} – основной уровень фактора,

Δx_i – интервал варьирования.

Преобразованные в натуральные размерности уравнения имели следующий вид:

$$y_1 = 3,465 - 0,465 x_2 + 0,01 x_3, \text{ мг/г}, \quad (4)$$

$$y_2 = 0,64 + 0,06 x_1 - 0,11 x_2 - 0,00054 x_3, \text{ мг/л}. \quad (5)$$

Для уравнения регрессии, описывающего среднее содержание взвешенных веществ в промывной воде, был произведен расчет крутого восхождения. Смысл крутого восхождения заключается в следующем: поверхность отклика имеет вид холма с вершиной в точке «0». Наиболее короткий путь к вершине (достижение оптимального результата) – направление градиента функции отклика. Составляющие градиента представляют собой частные производные функции отклика, оценками которых являются коэффициенты в уравнении регрессии. Изменяя факторы пропорционально величинам коэффициентов, мы двигались в направлении градиента функции отклика по самому крутому пути, т.е. совершали крутое восхождение.

Фактор x_3 (объем загрузки) был закреплен на основном уровне 150 см³. При этом уравнение преобразовывалось таким образом:

$$y_2^{\text{код}} = 0,46 + 0,184 x_1 - 0,22 x_2 \text{ (с кодированными значениями переменных);}$$

$$y_2^{\text{нат}} = 0,58 + 0,06 x_1 - 0,11 x_2 \text{ (с натуральными значениями переменных).}$$

Для удобства расчеты проведены в табличной форме (табл.4).

Таблица 4

Расчет крутого восхождения для содержания взвешенных веществ в промывной воде (y_2)

Опыт	Кодированные значения		y_2
	x_1	x_2	
1	+	+	0,396
2	+	-	0,84
3	-	+	0,08
4	-	-	0,47
b_j	0,184	- 0,22	
$b_j \cdot I_j$	0,552	- 0,44	

I_j – интервал варьирования; для x_1 $I_j = 3$, для x_2 $I_j = 2$.

$b_j \cdot I_j$ – составляющая градиента.

1. Были прибавлены составляющие градиента к основному уровню:

$$x_1 = 3,5 + 0,552 = 4,052;$$

$$x_2 = 3 - 0,44 = 2,56.$$

2. Был выбран больший шаг движения по градиенту. Для x_1 принят шаг, равный 1, для x_2 пропорционально соотношению составляющих градиента - (- 0,797), округленный до - 0,8. Последовательно прибавлялся шаг к основному уровню (табл. 5).

Таблица 5

Опыт	Натуральные значения		y ₂
	x ₁	x ₂	
5	4,5	2,2	0,61
6	5,5	1,4	0,756
7	6,5	0,6	0,904
8	8,5	0,6	1,024

Примечание: значение y рассчитано по уравнению регрессии.

Для подтверждения расчета были проведены дополнительные экспериментальные опыты 7 и 8. При этом получены результаты:

Опыт №7: $y_1 = 3,46$, $y_2 = 1,36$.

Опыт №8: $y_1 = 3,49$, $y_2 = 2,05$.

Таким образом, оптимальной длительностью воздействия ультразвука на загрузку из антрацита является период, равный 6,5 - 8,5 мин.

Во 2-м блоке исследований, по аналогии с экспериментом с антрацитовой, было исследовано воздействие ультразвука на загрузку из кварцевого песка (табл. 6).

Таблица 6

Матрица планирования и результаты эксперимента на песчаной загрузке

№ п/п	x ₁	x ₂	x ₃	y ₁			y ₂		
				y ₁ '	y ₁ ''	y ₁	y ₂ '	y ₂ ''	y ₂
1	+	+	+	0,75	1,26	1,005	3,37	5,66	4,515
2	+	-	-	16,56	16,46	16,51	21,78	18,46	20,12
3	-	+	-	7,82	14,98	11,4	4,96	3,24	4,10
4	-	-	+	12,02	6,08	9,05	6,06	6,38	6,22

В результате регрессионной обработки экспериментальных данных для y₁, (остаточное содержание взвешенных веществ в песчаной загрузке) коэффициенты в уравнении регрессии оказались незначимыми.

Уравнение регрессии y₂ (среднее количество взвешенных веществ в промывной воде) имеет вид:

$$y_2 = 8,74 + 3,58 x_1 - 4,43 x_2 - 3,37 x_3 \quad (6)$$

По критерию Фишера уравнение регрессии адекватно описывает процесс.

При преобразовании кодифицированных значений факторов в натуральные уравнение регрессии приобретает следующий вид:

$$\begin{aligned} y_2 &= 16,27 + 1,19 x_1 - 2,22 x_2 - 0,0337 x_3 \\ &= 0,46 + 0,184 x_1 - 0,22 \\ &= 0,58 + 0,06 x_1 - 0,11 x_2 \end{aligned}$$

Преобразованные уравнения имели следующий вид:

$$\begin{aligned} y_2^{\text{код}} &= 3,465 - 0,465 x_2 + 0,01 x_3 \quad (\text{с кодированными значениями переменных}); \\ y_2^{\text{нат}} &= 0,64 + 0,06 x_1 - 0,11 x_2 - 0,00054 x_3 \quad (\text{с натуральными значениями переменных}). \end{aligned}$$

Результаты расчета крутого восхождения для песчаной загрузки были схожими с антрацитовой, и оптимум воздействия ультразвука на загрузку из песка равен 6,5 - 8,5 мин.

Сравним средние остаточные загрязнения в антрацитовой (табл.2) и песчаной (табл. 6) загрузках, мг/г: 3,66 и 9,49. Аналогично и для содержания взвешенных веществ в промывной воде, мг/л: 0,45 и 8,74.

Можно видеть, что при одинаковых начальных условиях загрязненности загрузки и ее промывки в антрацитовой остаточные загрязнения меньше приблизительно в 2,6 раза, чем в песчаной. При этом она в 19,4 раза быстрее отмывается от загрязнений. Следовательно, по расходу промывной воды и затратам электроэнергии, а также последующей обработке промывных вод можно сделать вывод, что для донской воды более предпочтительной является антрацитовая загрузка фильтров, а не песчаная, что чаще имеет место на практике.

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод о том, что применение ультразвукового генератора является эффективным способом интенсификации промывки фильтров. При внедрении этой технологии на очистной станции необходимо уточнить время воздействия ультразвука в зависимости от конкретных условий работы фильтров, а также параметры генератора (частоту).

После лабораторного этапа экспериментов, были проведены опытно-промышленные исследования интенсификации промывки скорых фильтров, на основании которых была разработана и запатентована полезная модель «Подвижного устройства для интенсификации промывки загрузки скорых фильтров» [4].

Устройство (рис.1) работает следующим образом. Ультразвуковая установка 7, с помощью кабеля электропитания 8, подключается к источнику электропитания. Далее она опускается в скорый фильтр 1 до уровня верха зернистой загрузки 5, через дренажную распределительную систему 3, находящуюся в поддерживающем слое 4, подается вода обратным током. Производится погружение установки во взвешенный слой во время промывки 6. Промывная вода отводится с помощью сборных желобов 2. По истечении расчетного времени промывки конструкция поднимается выше поверхности расширенного слоя загрузки, отключается подача воды, затем установка отключается от источника электропитания. Устройство перемещается к следующему фильтру.

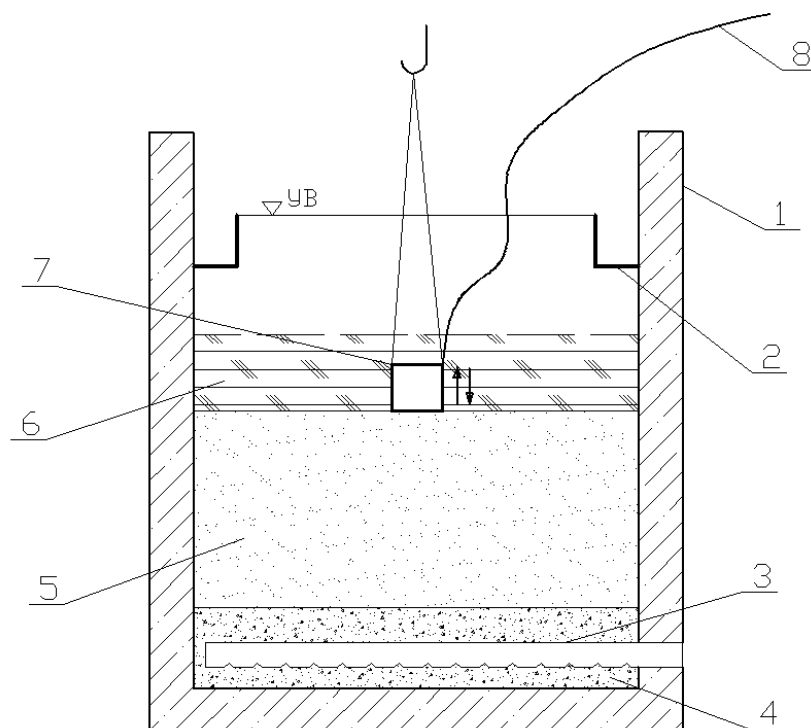


Рис. 1. Подвижная ультразвуковая установка

1 - скорый фильтр; 2 - сборный желоб; 3 - дренажная распределительная система; 4 - поддерживающий слой; 5 - зернистая загрузка; 6 - взвешенный слой во время промывки; 7 - ультразвуковая установка; 8 – кабель электропитания.

Опытно-промышленные исследования показали повышение качества промывки зернистой загрузки скорого фильтра за счет воздействия на загрязненную часть зернистой загрузки кавитационных сил, возникающих под действием мощных ультразвуковых колебаний. При этом время промывки сократилось до 3-х минут, а, соответственно, и расход промывной воды.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахназарова С.Л., Кафаров В.В., Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.- технол. спец. вузов.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Высш. шк., 1985 - 327с., ил.
2. Баринов А.М., Серпоккрылов Н.С., Рождов И.И., Визуализация процесса как метод контроля промывки фильтров. Водоснабжение и канализация, 2012, №7-8, с.24-31.
3. Минц Д. М., Шуберт С.А. Фильтры АКХ и расчеты промывки скорых фильтров . — М. ; Л.: Изд-во М-ва коммуна. хоз-ва РСФСР, 1951. - 174 с.
4. Пат.132736 Российская Федерация, МКП⁵¹ B01D24/00. Подвижное устройство для интенсификации промывки загрузки скорых фильтров / Серпоккрылов Н.С., Баринов А.М., заявитель и патентообладатель Ростов. Гос. Строит. Универ. – №2013116861/05. заявл. 12.04.13, опубли. 27.09.13.

Рецензент: Марочкин Алексей Александрович, директор, к. т. н., ООО "Акватрат"