

УДК 628.147

А.М. Тугай, И.С. Кузьмич, Д.В. Чарный

ФИЛЬТРОВАНИЕ ВОДЫ С ФИТОПЛАНКТОНОМ НА ПЕНОПОЛИСТИРОЛЬНОЙ ЗАГРУЗКЕ

Национальный университет строительства и архитектуры,
г. Киев, Украина
egor_ks@i.ua

Исследована кинетика задерживания клеток фитопланктона по высоте пенополистирольного фильтрующего слоя. Приведены закономерности их извлечения в зависимости от времени и скорости фильтрования. Приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных.

Ключевые слова: водозаборно-очистные сооружения, извлечение фитопланктона, сине-зеленые водоросли, фильтрование.

Введение. Анализируя динамику забора воды по Киевской области, территория которой расположена в пределах бассейна р. Днепр (на 97% общей площади), установлено преимущество забора воды береговыми, реже русловыми и еще реже ковшовыми и фильтрующими водозаборами [1, 2], которые в системах водоснабжения выступают начальным звеном. В данной работе речь идет именно о береговых водозаборах, т.е. защите систем водоснабжения от попадания в них фитопланктона, в частности сине-зеленых водорослей, что отрицательно влияет на качество очистки воды.

Цель данной работы – определение технологических параметров задерживания фитопланктона на пенополистирольной загрузке при заборе воды с поверхностных источников.

Методика эксперимента. Исследование фильтрования воды, содержащей фитопланктон, проводили на воде [3, 4], которую транспортировали от водозаборного ковша, расположенного на берегу р. Днепр, в двух километрах ниже Киевской ГЭС. Экспериментальная установка (рис. 1) диаметром 150, высотой – 1700 мм, предна-

© А.М. Тугай, И.С. Кузьмич, Д.В. Чарный, 2015

значенная для визуального наблюдения за процессом фильтрования, выполнена из прозрачного материала. В ее верхней части (над фильтрующим слоем) расположено пространство высотой 250 мм. Высота пространства под фильтрующим слоем составляла 0,45 м, так как при обратной промывке загрузка расширяется на 45 – 50% своей толщины. Размер диаметра гранул пенополистирольного фильтрующего слоя составлял 2,06 и 4,6 мм, его толщина – 1,0 м. Скорость фильтрования изменялась в интервале от 10 до 80 м/ч. Продолжительность фильтроцикла оценивали изменением соотношения C/C_0 профильтрованной воды (C – количество клеток фитопланктона в воде на выходе из фильтра, C_0 – то же на входе в фильтр). Отбор проб осуществляли через каждые 2 – 8 ч. Для предотвращения выноса гранул фильтрующего слоя в нижней и верхней частях пространства над фильтрующим слоем находится удерживающая полистирол система, которая выполнена в виде сетки с квадратными ячейками размером 1,5 мм. Установка была размещена в камере переключений ДнВС ПАО "Киевводоканал".

При проведении экспериментов контролировали содержание клеток водорослей в исходной и профильтрованной водах. Гидробиологические анализы отобранных проб выполняли на материальной базе Химбаклаборатории ДнВС "Киевводоканал". Концентрирование водорослей осуществляли методом прямого фильтрования, а количество клеток определяли с помощью микроскопа Биола в соответствии с методикой [5 – 7].

Продолжительность фильтроцикла определяли по времени уменьшения задерживания клеток водорослей ($C/C_0 \geq 0,1$ кл/см³).

В процессе работы экспериментальной установки количество клеток фитопланктона в фильтрате по высоте фильтра увеличивалось за счет его отрыва от поверхности зерен загрузки при различных параметрах фильтрования, которые можно выразить в виде

$$C_i = f(d_e, l, v_\phi, T_\phi), \quad (1)$$

где C_i – количество клеток фитопланктона в исходной воде, кл/см³; T_ϕ – продолжительность работы фильтрующей загрузки после ее промывки, ч; d_e – эквивалентный диаметр частиц вспененного полистирола, мм; l – толщина фильтрующей загрузки, м; v_ϕ – скорость фильтрования воды, м/ч.

Количество опытов (n_d) для каждого варианта было не менее трех. Выполненный краткий анализ определяющих факторов и их уровней позволяет найти общее число различных опытов [8]: $n_d = n_p^{n_f}$, где $n_p = 4$ – число уровней; $n_f = 4$ – число факторов.

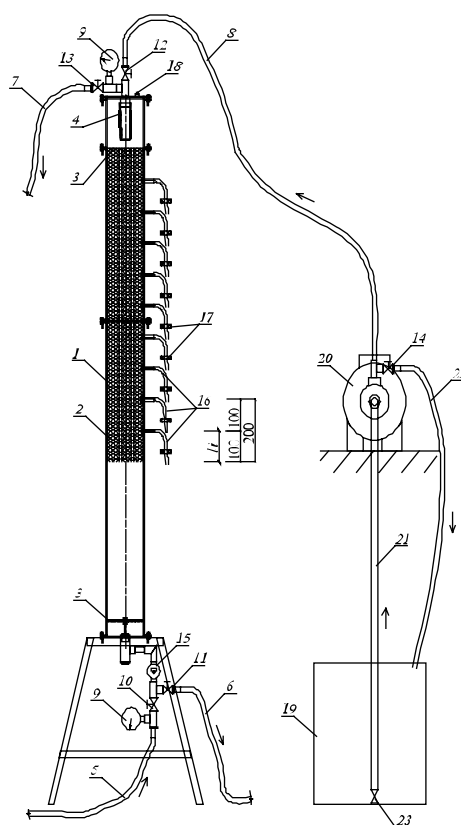


Рис. 1. Схема установки для извлечения фитопланктона фильтрованием на пенополистирольной загрузке: 1 – прозрачная колонна диаметром 150 мм; 2 – фильтрующая загрузка; 3 – распределительная решетка диаметром 1,5 мм; 4 – колпачок; 5 – подающий трубопровод; 6 – дренажный трубопровод; 7 – трубопровод осветленной воды; 8 – промывочный трубопровод; 9 – манометр; 10 – 14 – краны; 15 – водосчетчик; 16 – пробоотборники; 17 – зажим; 18 – ступеник воздуха; 19 – бак для промывки; 20 – насос; 21 – всасывающий трубопровод; 22 – перепускной трубопровод; 23 – обратный клапан.

Следует отметить, что для статистической достоверности полученных экспериментальных данных было проведено не менее чем $n_d = 44 = 256$ опытов.

По технологии забора и подготовки воды ДнВС в напорный водовод добавляли хлор в объеме 2,5 – 5 мг/дм³. Продолжительность реакции хлора была незначительной и хлор практически не влиял на жизнедеятельность фитопланктона, что было подтверждено нашими исследованиями при подсчете проб в Институте гидробиологии НАН Украины на люминесцентном микроскопе. Пробы были взяты из водозаборного ковша и трубопровода, который находился в камере переключений. Выявлено, что количество живых и мертвых клеток фитопланктона практически не отличается между пробой с хлором в напорном водоводе и пробой без хлора в водозаборном ковшу.

Результаты и их обсуждение. В ходе опытов установлена закономерность изменения во времени соотношения C/C_0 профильтрованной воды (рис. 2). Как следует из полученных данных, качество профильтрованной воды со временем снижается, а потери напора возрастают. Причем эти изменения пропорциональны скорости фильтрации. Так, при $v = 10$ м/ч ухудшение качества профильтрованной воды наступает через ≥ 18 ч. С ростом скорости фильтрации до 80 м/ч снижение качества профильтрованной воды наступает через ≥ 9 ч.

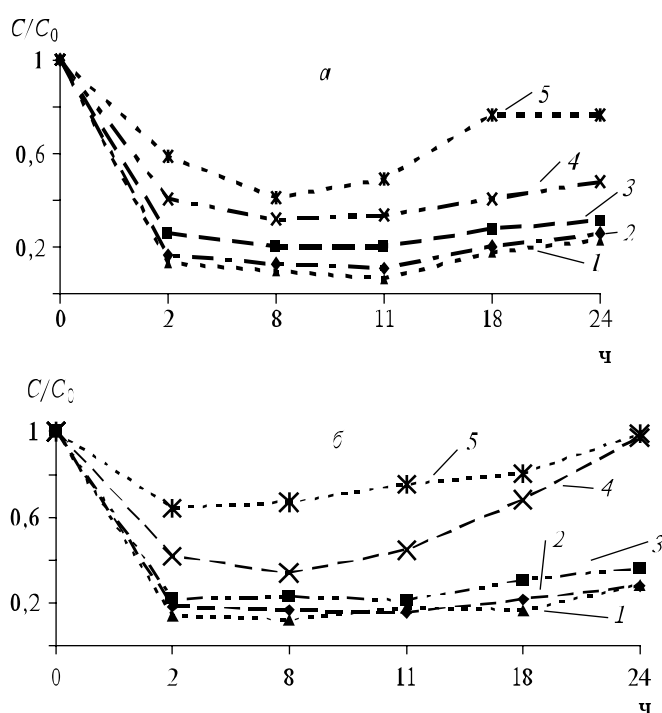


Рис. 2. Зависимость количества фитопланктона (а – $d_e = 2,06$ мм, $h = 1$ м; б – $d_e = 4,6$ мм, $h = 1$ м) и переменных скоростей фильтрации (м/ч): 10 (1), 20 (2), 40 (3), 60 (4), 80 (5) от его продолжительности.

Изменение качества профильтрованной воды наблюдается и при изменении толщины фильтрующего слоя. На выходе из первого по ходу движения фильтрационного потока участка фильтрующего слоя ($x_i = 0,2$ м) величина параметра C не слишком отличается от C_0 . При этом $x_i = l_i / l_0$, где l_i – расстояние от низа фильтрующего слоя; l_0 – высота фильтрующего слоя. Однако по мере роста толщины фильтрующего слоя и продолжительности фильтрования качество профильтрованной воды повышается (табл. 1, 2).

Так, на начальном этапе фильтрования (2 ч) качество воды, прошедшей через весь фильтрующий слой, при загрузке $d_e = 2,06$ мм составляет $C/C_0 = 0,13$, а при $d_e = 4,6$ мм – $C/C_0 = 0,14$. С течением времени качество профильтрованной воды снижается, и при равных всех условиях (через 24 ч) составляет $C/C_0 = 0,23$ при $d_e = 2,06$ мм и $C/C_0 = 0,28$ – при $d_e = 4,6$ мм. Кроме того следует отметить, что максимальный эффект задерживания фитопланктона наблюдается в интервале 8 – 11 ч. При этом задерживание сине-зеленых водоростей будет более эффективным, чем фитопланктона в целом. Особенно это имеет место при загрузке $d_e = 2,06$ мм.

Таблица 1. Экспериментальные данные кинетики задерживания клеток фитопланктона по высоте фильтрующего слоя ($d_e = 2,06$ мм)

Продолжительность фильтрования, ч	Значение C_i / C_0 по высоте фильтрующего слоя l_0 , м									
	0,2		0,4		0,6		0,8		1,0	
	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые
2	0,59	0,43	0,52	0,24	0,39	0,24	0,29	0,19	0,14	0,13
8	0,59	0,43	0,42	0,19	0,23	0,14	0,16	0,09	0,1	0,05
11	0,66	0,57	0,52	0,24	0,29	0,24	0,11	0,05	0,07	0,03
18	0,82	0,69	0,59	0,38	0,52	0,38	0,23	0,14	0,17	0,11
24	0,86	0,85	0,76	0,43	0,56	0,43	0,36	0,29	0,23	0,19

Примечание. $v \approx 10$ м/ч; $C_0^{\Phi} \approx 3036$ кл/см³ – количество клеток входящего фитопланктона; $C_0^{СЗ} = 2074$ кл/см³ – количество клеток сине-зеленых.

Таблица 2. Экспериментальные данные кинетики задерживания клеток фитопланктона по высоте фильтрующего слоя ($d_e = 4,6$ мм)

Продолжительность фильтрования, ч	Значение C_1 / C_0 по высоте фильтрующего слоя l_0 , м									
	0,2		0,4		0,6		0,8		1,0	
	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые	Фитопланктон	Сине-зеленые
2	0,52	0,37	0,33	0,31	0,26	0,18	0,2	0,15	0,14	0,16
8	0,46	0,47	0,33	0,44	0,22	0,19	0,12	0,14	0,12	0,13
11	0,51	0,5	0,31	0,43	0,2	0,27	0,12	0,22	0,17	0,19
18	0,65	0,56	0,38	0,45	0,3	0,3	0,23	0,27	0,16	0,21
24	0,8	0,68	0,47	0,56	0,37	0,33	0,31	0,33	0,28	0,28

Примечание: $v \approx 10$ м/ч; $C^{\Phi}_0 \approx 6902$ кл/см³ – количество клеток входящего фитопланктона; $C^{Cz}_0 = 3842$ кл/см³ – количество клеток сине-зеленых.

По характеру кривых кинетики задерживания загрязняющих веществ (рис. 3) можно определить оптимальное значение толщины фильтрующего слоя. Так, для фильтрующего слоя с размерами гранул 2,06 мм при $C_0 \approx 3000$ кл/см³ (продолжительность фильтрования – два часа) при толщине указанного слоя 0,9 м значение $C/C_0 \approx 0,2$. Это соотношение достигается при продолжительности фильтрования в интервале 8 – 11 ч при толщине фильтрующего слоя 0,7 м. Такая закономерность зависимости качества профильтрованной воды от времени, очевидно, обусловлена длительностью "зарядки" пенополистирольного фильтрующего слоя. С ростом продолжительности фильтрования качество профильтрованной воды постепенно снижается. Пробы профильтрованной воды через 18 ч показывают, что для достижения достаточного качества этой воды необходимое значение составляет $l_1/l_0 \approx 0,8$.

При экспериментальных исследованиях наблюдалось повышение степени задерживания клеток фитопланктона. "Зарядка" фильтра являлась величиной непостоянной и в значительной степени зависящей от скорости фильтрования, качества исходной воды и качества промывки

фильтрующего слоя. С повышением скорости фильтрования, снижением концентрации примесей в исходной воде, улучшением качества промывки степень задерживания клеток фитопланктона снижается. Недостаточное уплотнение фильтрующего слоя или его изменение при фильтровании, которое может быть обусловлено гидродинамическими условиями процесса, имеет также существенное влияние на качество очищенной воды.

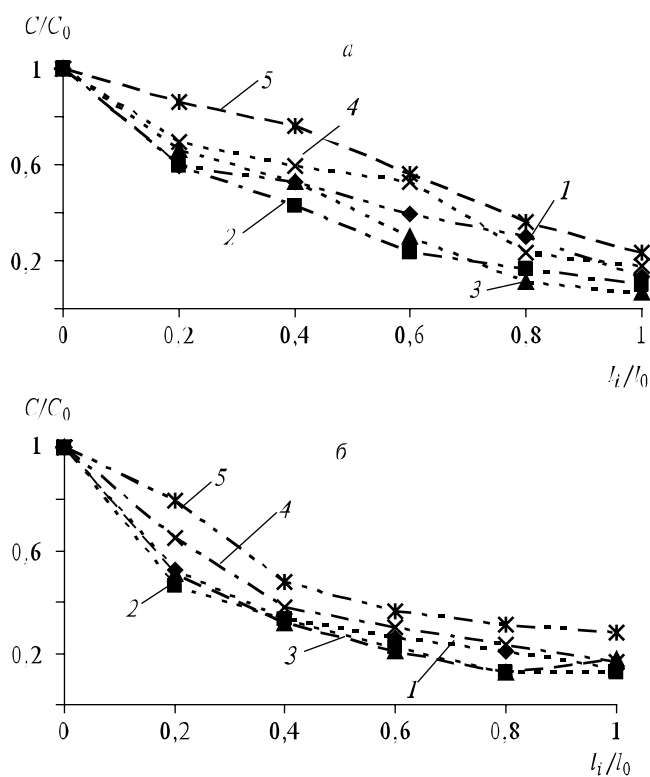


Рис. 3. Кинетика задерживания примесей по высоте фильтрующего слоя (а – $d = 2,06$ мм, $l_c = 1,0$ м, $v = 10$ м/ч; б – $d = 4,6$ мм, $l_c = 1,0$ м, $v = 10$ м/ч) при продолжительности фильтрования: 2 (1), 8 (2), 11 (3), 18 (4), 24 ч (5).

Полученные в процессе теоретических исследований зависимости C/C_0 от l_0 можно записать следующим образом [9]:

$$C(l_0) = C_0 e^{-\bar{L}}, \quad \bar{L} = l_0 \frac{K_1}{v}, \quad (2)$$

где $K_1 = -\frac{v \ln \frac{C(l_0)}{C_0}}{l_0}$ – обобщенная константа скорости прямой реак-

ции; $C(l_0)$ – концентрация исходной жидкости, кл/см³.

На основе полученных данных представлены результаты извлечения фитопланктона, содержащегося в воде на фильтрах с пенополистирольной плавающей загрузкой, при $l_0 = 1$ м, $C_0 = 6902$ кл/см³, $v_0 = 10$ м/ч, $d_e = 2,06$ мм (рис. 4).

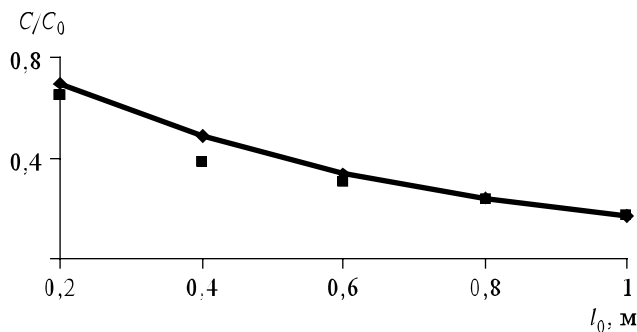


Рис. 4. Изменение количества клеток фитопланктона C/C_0 по высоте фильтрующего слоя согласно теоретическим (◆) и экспериментальным данным (■).

Выводы. Результаты экспериментальных исследований практически подтвердили данные проведенных нами теоретических разработок по извлечению фитопланктона из воды на пенополистирольных фильтрах и могут быть рекомендованы для последующего использования в системах водоподготовки днепровской воды.

Резюме. Представлені результати експериментальних досліджень кінетики затримки клітин синьозелених водоростей та клітин фітопланктону в цілому по висоті пінополістирольного фільтруючого шару. Приведені закономірності зміни вилучення клітин фітопланктону в часі та при зміні швидкості фільтрування. Наведено порівняння теоретичних даних і експериментальних досліджень.

A.M. Tugay, I.S. Kuzmych, D.V. Charniy

**RESEARCH OF PROCESS OF FILTERING WATER
THAT CONTAINS PHYTOPLANKTON
ON EXPANDED POLYSTYRENE BOOT**

Summary

Presented the results of experimental studies of the kinetics of the detention of cells of blue-green algae and phytoplankton cells at the whole height of the filter layer polystyrene. Presented patterns of change of withdrawal of phytoplankton cells in time and the rate of filtration. Showed a comparison of theoretical and experimental research data.

Список использованной литературы

- [1] *Тугай А.М., Орлов В.О.* Водопостачання: Підручник для вузів. – Рівне: РДТУ, 2001. – 429 с.
- [2] *Хоружий П.Д., Хомутецька Т.П., Хоружий В.П.* Ресурсозберігаючі технології водопостачання. – К.: Аграрна наука, 2008. – 534 с.
- [3] *Кузьмич І.С.* // Пробл. водопостачання, водовідведення та гідравліки. – 2012. – Вип. 20. – С. 53 – 65.
- [4] *Чарний Д.В., Кузьмич І.С.* // Вода і водоочисні технології. – 2012. – 10, №4. – 2013. – 11, №1. – С. 51 – 65.
- [5] *Радченко И.Г., Капков В.И., Федоров В.Д.* Практическое руководство по сбору и анализу проб морского фитопланктона: Учебно-методическое руководство для студентов биологических специальностей университетов. – М.: Мордвинцев, 2010. – 60 с.
- [6] *Вассер С.П., Кондратьева Н.В., Масюк Н.П.* Водоросли: Справочник. – К.: Наук. думка, 1989. – 608 с.
- [7] *Graham L.E., Wilcox L.W.* Algae. Prentice-Hall, Upper Saddle River. – New Jersey, 2000. – 637 p.
- [8] *ГОСТ 8.207-76.* Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. – Введ. 01.01.1977. – 14 с.
- [9] *Олійник О.Я., І.С.* // Еколог. безпека та природокористування. – 2014. – 15. – С. 73 – 79.

Поступила в редакцію 14.03.2014 г.