

УДК 66.011

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФИЛЬТРОВ С ПЛАВАЮЩЕЙ ЗАГРУЗКОЙ  
ДЛЯ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД**

**USING FILTERS WITH FLOATING SEWAGE TREATMENT**

*Л.М. КОЧЕТОВ, М.П. ТЮРИН, И.А. ПОПОВ*  
*L.M. KOCHETOV, M.P. TYURIN, I.A. POPOV*

(Московский государственный университет дизайна и технологии)  
(Moscow State University of Design and Technology)  
E-mail: paxt@yandex.ru

*Проведен анализ работы фильтров с плавающим слоем фильтрующего материала, предназначенных для очистки воды от взвешенных веществ. Полученные результаты позволяют оценить эффективность очистки воды, гидравлические потери в фильтрующей загрузке, продолжительность работы между циклами промывки загрузки, а также оптимальные условия промывки. Отмечены преимущества фильтрующей загрузки, изготовленной из полиэтилена. Рассмотрены перспективы, связанные с использованием коагулянтов.*

*Is carried out the analysis of the work of the filters with the floating layer of the filtering material, intended for removal of suspended matter from water. The obtained results make it possible to estimate the effectiveness of the purification of water, hydraulic losses in the filter download, operating time between the cycles of the washing of filter download, as well as the optimal washing conditions. Marked the benefits of the filter material made of polyethylene. Reviewed the prospects of using coagulants*

**Ключевые слова:** суспензии, фильтры с плавающей загрузкой, эффективность, потери напора, коагулянты.

**Keywords:** suspension, filters with floating, efficiency, head loss, coagulants.

Фильтры с загрузкой из плавающих гранул (ФПЗ) могут с успехом использоваться в текстильной промышленности для очистки сточных вод от взвешенных минеральных частиц, мелких волокон и эмульгированных жир- и нефтепродук-

тов. Принцип действия ФПЗ заключается в задержании взвешенных примесей в фильтрующем слое, обладающим плавучестью. Плавающие загрузки имеют преимущество перед не плавающими (тяжелыми) загрузками, заключающееся в способности легко

и быстро промываться потоком воды, направленным обычно сверху вниз. По условиям проведения процесса ФПЗ могут быть открытыми (со свободной поверхностью воды) и напорными, работающими под избыточным давлением. В открытых фильтрах высота свободного слоя воды над слоем гранул должна быть не менее 0,5 м (для обеспечения равномерности распределения воды). Этот же объем воды может использоваться для промывки

фильтрующей загрузки. В напорных фильтрах промывку осуществляют обычно фильтратом, накапливаемом в специальном резервуаре, расположенном выше ФПЗ. Для промывки загрузки возможно также использование насосов.

Подача исходной воды и отвод фильтрата осуществляются соответственно через водораспределительный и водосборный коллекторы.

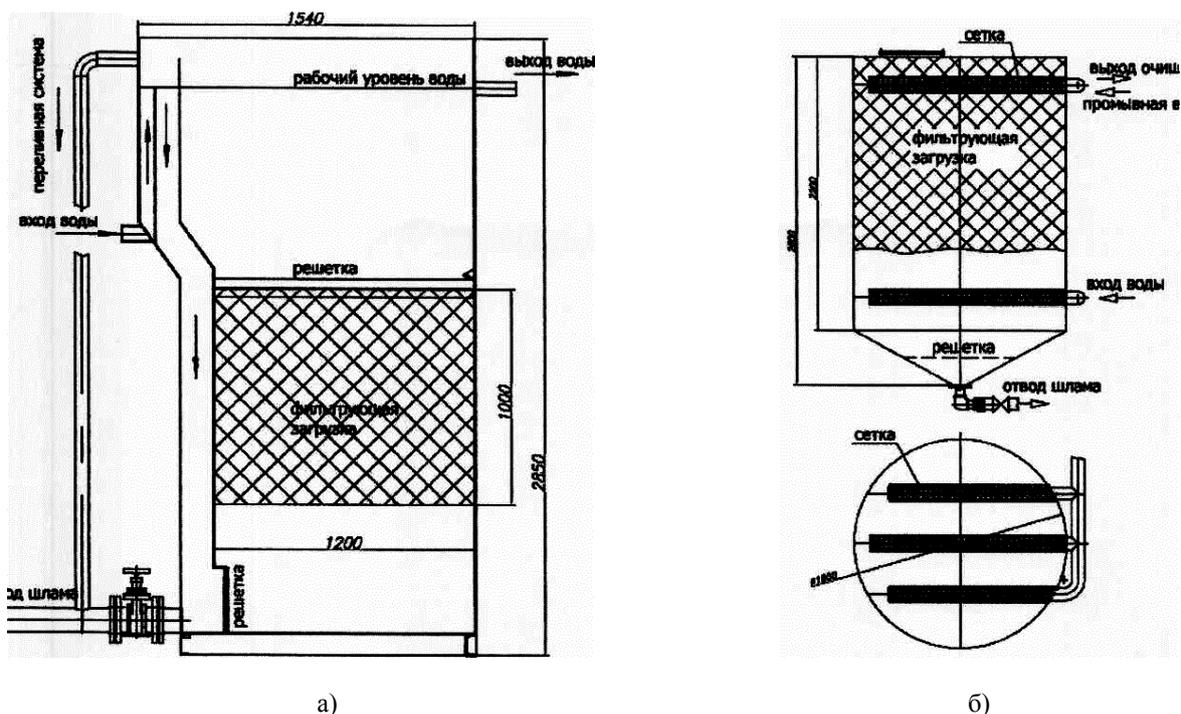


Рис. 1

На рис. 1 изображены схемы двух вариантов ФПЗ: а – безнапорного (открытого); б – напорного. При указанных геометрических размерах фильтры рассчитаны на номинальную производительность до  $15 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Для предотвращения выноса гранул с потоком воды в верхней части фильтра устанавливается сетка, изготовленная из металла или пластмассы. Другая сетка должна устанавливаться в нижней части фильтра для предотвращения выноса гранул с промывной водой.

Фильтрующая загрузка для ФПЗ изготавливается из пенополистирола или гранулированного полиэтилена. Эти материалы гидрофобны, не растворимы в воде, устойчивы к действию микроорганизмов, нетоксичны, имеют достаточную механи-

ческую прочность и высокую адгезионную способность. Основным недостатком пенополистирола является его малая плотность (около  $60 \text{ кг}/\text{м}^3$ ), что обуславливает необходимость создания интенсивного и продолжительного по времени потока промывной воды. Обычно интенсивность промывки для таких фильтров составляет  $10 \dots 15 \text{ л}/\text{м}^3 \cdot \text{с}$ , а продолжительность промывки  $1 \dots 2$  мин. В итоге требуется значительный расход промывной воды [1], [3].

Намного лучшие результаты получаются при использовании в качестве плавающей загрузки гранул полиэтилена (ПНД) размером  $3 \dots 3,5 \text{ мм}$ . Поскольку плотность ПНД лишь немного уступает плотности воды и составляет около  $950 \text{ кг}/\text{м}^3$ , скорость промывки слоя гранул в  $2 \dots 3$  раза

меньше, чем при использовании гранул пенополистирола, а продолжительность промывки не превышает 30 с. В этом случае в несколько раз уменьшается расход промывной воды и соответственно объем шлама, подлежащего утилизации. Также важно, что при использовании гранул ПНД повышается эффективность улавливания взвешенных частиц по сравнению с загрузкой из гранул пенополистирола.



Рис. 2

На рис. 2 представлены экспериментальные результаты, характеризующие содержание взвеси в очищенной воде в зависимости от скорости фильтрации (без использования коагулянтов): 1 – гранулы пенополистирола; 2 – гранулы ПНД. В качестве рабочей среды использовалась водная суспензия минеральных частиц со средним размером 50 мкм, плотностью 2300 кг/м<sup>3</sup>, при начальной концентрации около 300 мг/л.

Главным недостатком загрузки из гранул ПНД по сравнению с гранулами пенополистирола является их высокая стоимость. Однако, учитывая длительный срок использования загрузки (до 5 лет), этот недостаток не является существенным.

В ФПЗ движение воды может осуществляться в двух направлениях: снизу вверх и сверху вниз. При фильтрации сверху вниз вода движется в направлении убывающей крупности частиц загрузки, что соответствует повышению эффективности очистки воды и увеличению гряземкости фильтрующего слоя. Однако при этом скорость фильтрации не может быть высокой из-за возможности чрезмерного расширения загрузки, отрыва мелких гра-

нул и нарушения целостности слоя. Это особенно проявляется при использовании гранул ПНД.

При направлении фильтрации снизу вверх нарушений целостности слоя не происходит. Напротив, гранулы загрузки плотно прилегают друг к другу под действием плавучести и гидродинамического давления жидкости. При этом можно работать при скоростях фильтрации до 30 м/ч, обеспечивая удовлетворительную очистку воды.

Потери давления в слое фильтрующей загрузки зависят от скорости фильтрации, высоты слоя и размера гранул. При скоростях фильтрации до 10 мм/с потери напора в слое высотой до 2 м не превышают 5 кПа. При загрязнении плавающей загрузки сопротивление ее существенно увеличивается.

Потери напора в фильтрующей загрузке могут быть оценены с помощью следующей зависимости, полученной из уравнения Дарси:

$$\Delta P = \frac{3}{4} \lambda \frac{v^2 H \rho (1 - \eta)}{\varepsilon^3 \phi \delta} \text{ Па}, \quad (1)$$

где  $\rho$  – плотность воды, кг/м<sup>3</sup>;  $H$  – высота слоя загрузки гранул, м;  $\phi$  – коэффициент формы частиц загрузки;  $\varepsilon$  – порозность слоя загрузки;  $\mu$  – динамическая вязкость воды, Па·с;  $\lambda$  – коэффициент трения в загрузке. При ламинарном режиме фильтрации:

$$\lambda = 220 / \text{Re}, \quad \text{Re} = \frac{2}{3} \frac{v \delta \rho \phi}{\mu (1 - \varepsilon)}.$$

Тогда потери напора в единице высоты слоя загрузки составят:

$$\Delta P / H = 247,5 \frac{v \mu (1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3 \phi^2 \delta^2} \text{ Па / м}. \quad (2)$$

В процессе фильтрации жидкости происходит постепенное отложение осадка в свободном объеме слоя между частицами загрузки. Это приводит к увеличению потерь напора в слое или к падению произ-

водительности (при постоянном напоре). Если предположить, что отложение осадка происходит равномерно по всему объему слоя, то уменьшение порозности фильтрующего слоя в процессе фильтрования может быть описано следующим уравнением:

$$d\varepsilon = -\frac{\Delta C(1+\beta)}{W\rho_m} dQ, \quad (3)$$

где  $W$  – объем слоя фильтрующей загрузки,  $\text{м}^3$ ;  $\Delta C$  – изменение содержания взвешенных веществ в воде при прохождении через фильтрующую загрузку,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $Q$  – объем воды, прошедший через фильтр,  $\text{м}^3$ ;  $\rho_{\text{ос}}$  – плотность осадка в слое загрузки (по твердой фазе),  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $\beta$  – объемное влагосодержание осадка (отношение объема влаги в осадке к объему твердой фазы осадка).

Порозность слоя в конце фильтроцикла (перед промывкой):

$$\varepsilon = \varepsilon_{\text{нач}} - \frac{\Delta C(1+\beta)}{W\rho_m} dQ, \quad (4)$$

где  $\varepsilon_{\text{нач}}$  – начальная порозность слоя фильтрующей загрузки.

Из уравнения (2) можно получить величину потерь напора в фильтре  $\Delta P$  по отношению к начальному значению потерь напора  $\Delta P_{\text{нач}}$ :

$$\Delta P / \Delta P_{\text{нач}} = \frac{(1-\varepsilon)^2}{(1-\varepsilon_{\text{нач}})^2} \left( \frac{\varepsilon_{\text{нач}}}{\varepsilon} \right)^3. \quad (5)$$

Реальное увеличение потерь напора в фильтрующем слое будет выше расчетного значения на 20...50%, поскольку отложение осадка в фильтрующем слое происходит не равномерно, а преимущественно на начальном участке (по ходу движения воды).

Промывка фильтра осуществляется, когда объем осадка составляет 30...50% свободного объема пор фильтрующей загрузки.

Обычно работа ФПЗ осуществляется, при практически постоянном напоре. Это означает, что при отложении осадка в

фильтрующей загрузке будет происходить падение производительности фильтра. Отношение средних скоростей фильтрации жидкости через слой плавающей загрузки в начальный и конечный периоды фильтроцикла при  $\Delta P = \text{const}$  выражается соотношением:

$$v / v_{\text{нач}} = \frac{(1-\varepsilon_{\text{нач}})^2}{(1-\varepsilon)^2} \left( \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{нач}}} \right)^3. \quad (6)$$

Эффективность очистки воды в ФПЗ зависит от многих факторов: размеров отделяемых частиц, их физических свойств, высоты слоя и размеров гранул плавающей загрузки, скорости фильтрации.

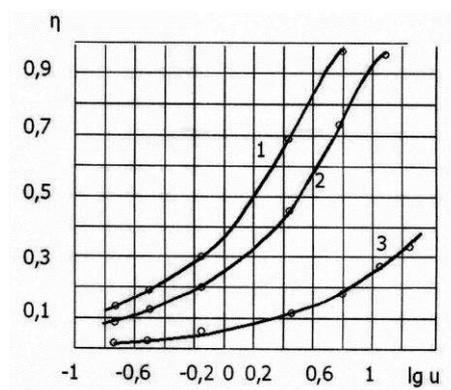


Рис. 3

На рис. 3 приведены графические зависимости, характеризующие эффективность улавливания взвешенных минеральных частиц без использования коагулянтов, в виде функции от гидравлической крупности (скорости осаждения в  $\text{мм}/\text{с}$ ) улавливаемых частиц для различных скоростей фильтрации  $v$ : 1)  $v=0,5 \text{ мм}/\text{с}$ ; 2)  $v=1 \text{ мм}/\text{с}$ ; 3)  $v=10 \text{ мм}/\text{с}$ .

Фильтрация осуществлялась снизу вверх через слой гранул пенополистирола со средним размером 3  $\text{мм}$ .

При обработке экспериментальных данных получена зависимость [3]:

$$\eta = 0,25k_1k_2(u/v)^{0,6}, \quad (7)$$

где  $u$  – скорость осаждения твердых частиц,  $\text{мм}/\text{с}$ ;  $v$  – скорость фильтрации воды, рассчитанная на полное сечение фильтра,

мм/с;  $k_1$  – эмпирический коэффициент, зависящий от отношения высоты слоя гранул  $H$  к размеру гранул  $\delta$  (при  $H/\delta \geq 200$ ;  $k=1$ ),  $k_2$  – коэффициент, зависящий от типа загрузки (для пенополистирола  $k_2 \approx 1$ ; для полиэтилена  $k_2 \approx 1,3 \dots 1,5$ ).

Эффективность работы ФПЗ возрастает с уменьшением размеров частиц плавающей загрузки. Одновременно возрастает и грязеемкость ФПЗ, поскольку она связана с удельной поверхностью фильтрующего слоя. С точки зрения эффективности очистки воды оптимальным размером гранул плавающей загрузки является 1...2 мм. Однако на практике приходится использовать более крупные гранулы (с размером от 2 до 4 мм) из-за сложности работы с мелкими гранулами. Высоту слоя зернистой загрузки в фильтрах следует принимать не менее 0,6 м.

Другим фактором, оказывающим существенное влияние на эффективность очистки воды от взвешенных веществ в ФПЗ, является скорость фильтрации. Обычно эта величина составляет 5...10 м/ч.

Обработка фильтруемой воды коагулянтами, в частности, раствором полиоксихлорида алюминия в смеси с бикарбонатом натрия, существенно улучшает качество фильтрата. При использовании коагулянтов и соответствующей корректировке значения рН воды возможно частичное удаление не только взвешенных веществ, но также ПАВ, красителей, солей железа, сульфатов и других растворенных веществ, которые сорбируются на поверхности агломератов взвешенных частиц и гидроксида алюминия. При этом из воды полностью удаляются мелкие волокна, а содержание взвешенных веществ снижается до значений менее 5 мг/л. Одновременно снижается содержание нефте- и жиропродуктов.

Оценку грязеемкости ФПЗ можно произвести с помощью следующих соотношений:

$$M = mW_{\Phi}\sigma, \quad (8)$$

где  $W_{\Phi}$  – объем фильтрующей загрузки, м<sup>3</sup>;

$\sigma$  – удельная поверхность гранул загрузки, м<sup>2</sup>/м;  $m$  – удельная грязеемкость фильтрующей загрузки. Для взвешенных минеральных частиц  $m \approx 5 \dots 8$  г/м.

Объем загрузки:

$$W_{\Phi} = SH_{\Phi}(1 - \varepsilon), \quad (9)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения фильтра, м;  $H_{\Phi}$  – высота фильтрующей загрузки, м;  $\varepsilon$  – порозность слоя загрузки ( $\varepsilon = 0,45 \dots 0,5$ ).

Удельная поверхность гранул загрузки находится по формуле:

$$\sigma = 6(1 - \varepsilon)/d, \quad (10)$$

где  $d$  – средний размер гранул, м.

При высокой степени полидисперсности слоя удельную поверхность следует проводить с учетом дисперсного состава гранул фильтрующей загрузки.

Продолжительность фильтроцикла до момента регенерации (промывки) фильтрующей загрузки можно определить по формуле:

$$\tau_{\text{фт}} = \frac{M}{V(C_{\text{н}} - C_{\text{к}})}, \quad \text{ч}, \quad (11)$$

где  $V$  – производительность фильтра, м<sup>3</sup>/ч;  $C_{\text{н}}$  и  $C_{\text{к}}$  – соответственно начальная и конечная концентрации загрязняющих веществ в воде, проходящей через фильтр. Обычно величина  $\tau_{\text{фт}}$  составляет 50...200 ч.

Для предотвращения биологических обрастаний фильтрующей загрузки она должна периодически, 1 раз в 2 месяца, обрабатываться хлорной водой, с содержанием активного хлора до 100 мг/л. Продолжительность контакта фильтрующей загрузки с хлорной водой должна быть около 1 суток.

На предприятиях текстильной промышленности ФПЗ целесообразно использовать для очистки сточных вод после процессов окраски или отмывки текстильных волокон. Для предварительной очистки сточной воды перед ФПЗ целесообразно использовать волокнуловители и отстаивники, преимущественно тонкослойные.

По своим экономическим показателям ФПЗ превосходят фильтры с зернистой загрузкой, однако уступают им по эффективности очистки воды. Существенным их преимуществом являются простота и эффективность регенерации фильтрующей загрузки, ее низкая стоимость и долговечность.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Сажин Б.С., Гудим Л.И., Кочетов Л.М. Экологическая безопасность технологических процессов. – М.: МГТУ им. А.Н. Косыгина, 2007.

2. Журба М.Г. Пенополистирольные фильтры. – М.: Стройиздат, 1992.

3. Кочетов Л.М., Сажин Б.С., Сажин В.Б., Попов И.А. Использование фильтров с плавающей загрузкой для очистки сточных вод // Успехи в химии и химической технологии // РХТУ им. Д.М. Менделеева. – Т. XXIII, М., 2009, № 8, (101). С.106...113.

Рекомендована кафедрой процессов, аппаратов химической технологии и безопасности и жизнедеятельности. Поступила 01.10.13.

---