

Научная статья

УДК 628.33

<https://doi.org/10.24866/2227-6858/2025-3/85-97>

Доочистка концентрированных сточных вод фильтрованием в безреагентном режиме

Михаил Николаевич Шевцов¹, Евгений Леонидович Войтов²,
Денис Владимирович Мишкин^{1,✉}, Валентина Павловна Колпакова³,
Юлия Николаевна Еремеева³

¹ Тихоокеанский государственный университет,

Хабаровск, Российская Федерация

✉ 012438@togudv.ru

² Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин),

Новосибирск, Российская Федерация

³ Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева,
Усть-Каменогорск, Республика Казахстан

Аннотация. В статье рассматриваются методы доочистки сточных вод горнодобывающих предприятий на примере реальных концентрированных суспензий систем водных хозяйств горноочистительных компонентов цветной металлургии Дальнего Востока. Приведены результаты теоретического обоснования и экспериментальных исследований безреагентной доочистки сточных вод на зернистых фильтрах. Выполнен выбор оптимальных параметров и режимов процесса осветления концентрированных сточных вод путём безреагентного фильтрования на зернистых фильтрах. Научная новизна заключается в проведении исследований по выбору фильтрующей загрузки с эффективными техническими параметрами для безреагентной доочистки концентрированных сточных вод.

Ключевые слова: доочистка, концентрированные сточные воды, фильтрование, зернистая загрузка, безреагентный режим, параметры фильтрующего материала, скорость фильтрации, экологическая безопасность

Для цитирования: Шевцов М.Н., Войтов Е.Л., Мишкин Д.В., Колпакова В.П., Еремеева Ю.Н. Доочистка концентрированных сточных вод фильтрованием в безреагентном режиме // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2025. № 3(64). С. 85–97.

Original article

Post-treatment of concentrated wastewater by filtration in a non-reagent mode

Mikhail N. Shevtsov¹, Evgeny L. Voitov², Denis V. Mishkin^{1,✉}, Valentina P. Kolpakova³,
Yulia N. Eremeeva³

¹ Pacific State University, Khabarovsk, Russian Federation

✉ 012438@togudv.ru

² Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin),

Novosibirsk, Russian Federation

³ D. Serikbaev East Kazakhstan State Technical University, Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan

Abstract. The article discusses methods of post-treatment of wastewater from mining enterprises are considered using the example of real concentrated suspensions of water systems of mining and purification components of non-ferrous metallurgy in the Far East. The results of the theoretical substantiation and the results of

experimental studies of reagentless wastewater aftertreatment on granular filters are presented. The optimal parameters and modes of the process of clarification of concentrated wastewater by reagentless filtration on granular filters have been selected. The scientific novelty lies in conducting research on the selection of a filter loading with effective technical parameters for the non-reagent aftertreatment of concentrated wastewater.

Keywords: aftertreatment, concentrated wastewater, filtration, granular loading, reagentless mode, filtration material parameters, filtration rate, environmental safety

For citation: Shevtsov M.N., Voitov E.L., Mishkin D.V., Kolpakova V.P., Ereemeeva Yu.N. Post-treatment of concentrated wastewater by filtration in a non-reagent mode. *FEFU: School of Engineering Bulletin*, 2025, no. 3(64), pp. 85–97. (In Russ.).

Введение

Под доочисткой подразумеваются методы и процессы, дополняющие традиционные технологические схемы очистки сточных вод данного состава. Для городских и производственных сточных вод, преимущественно загрязнённых веществами, доочисткой считают третью ступень, принимая за первую ступень – механическую, а за вторую – биологическую очистку. Несмотря на достаточно высокую эффективность существующих очистных сооружений, общее количество остаточных загрязнений, выносимых с очищенными водами, превышает самоочищаемую способность водоёмов. Возможная степень удаления загрязнений в процессах третичной очистки практически не ограничена и определяется условиями сброса очищенных сточных вод или последующей их утилизации.

На горнодобывающих предприятиях сточные воды загрязнены в основном минеральными взвесями или дополнительно ещё и флотореагентами. Поэтому очистка, как правило, физико-химическая, и осуществляется она методом осаждения с применением реагентов. Для этих целей используют отстойники или хвостохранилища, после которых вода используется в обороте или сбрасывается в водоём. Далеко не всегда качество этой воды удовлетворяет требованиям технологического процесса или условиям сброса в водоём, поэтому требуется её доочистка, которая может являться и второй ступенью. Эффективным методом доочистки является метод фильтрования [1].

Для фильтрования производственных сточных вод и высокомутных природных вод с целью удаления взвешенных веществ применяются сетчатые фильтры в основном напорного типа. Площадь сечения фильтра принимается в 7–10 раз больше площади сечения подводящего трубопровода, при этом площадь сечения сетки составляет от 40 до 50% общей площади фильтра. В результате этого при скорости подвода воды к фильтру 1,0 м/с скорость при прохождении воды через сетку составляет 0,2–0,3 м/с, а потери напора 0,03–0,04 МПа. По мере засорения сетки потери напора возрастают, и при достижении 0,1 МПа фильтр следует очищать. Различные сетчатые устройства, несмотря на компактность и высокую механизацию процесса, не обеспечивают высокой степени очистки. Кроме того, при больших расходах сточных вод, имеющих место на горнодобывающих предприятиях, их использование нецелесообразно и экономически невыгодно. Изложенные сведения по этому вопросу в работах В.А. Жужикова и Ю.М. Кузьмина подтверждают сделанные выводы [2, 3].

Наиболее широкое распространение в системах водоснабжения и водоотведения получили зернистые фильтры, работающие без образования осадка на поверхности фильтрующей загрузки. Такие фильтры могут применяться для большой производительности очистных сооружений и обеспечивать высокий эффект очистки. Работающими по этому принципу, наиболее изученными и распространёнными являются скорые фильтры, предназначенные для очистки малоконцентрированных суспензий с предварительным коагулированием. Этот процесс близок к тем, которые характерны для доочистки сточных вод обогатительных фабрик методом фильтрования на зернистых фильтрах. Теоретические закономерности процесса фильтрования малоконцентрированных суспензий рассматривались многими учёными. Наибольшее распространение получила теория очистки фильтрованием, разработанная Д.М. Минцем, согласно которой эффект осветления воды элементарным слоём загрузки рассматривается как суммарный результат двух противоположных процессов: изъятия частиц из воды и

закрепления их на зёрнах загрузки под действием сил прилипания и отрыва ранее прилипших частиц и обратного поступления их в воду под влиянием гидродинамических сил потока. Отложения, накапливающиеся в толще загрузки вокруг её зёрен, образуют характерную для геля рыхлую сетчатую структуру, которая является непрочной. Под влиянием гидродинамических сил, возникающих при движении воды, структура отложений разрушается, и некоторая часть ранее прилипших частиц отрывается от зёрен в виде мелких хлопьев и проносится в последующие слои загрузки, где вновь задерживается. Осветление воды и накопление осадка в каждом элементарном слое загрузки происходит до тех пор, пока прилипание частиц идёт быстрее, чем их отрыв.

По мере накопления осадка увеличиваются истинная скорость фильтрации и гидравлическое сопротивление фильтрующей среды. По мере заиливания фильтрующего слоя наступает момент, когда вследствие разрушения осадка в толще загрузки и выноса вторичных частиц происходит ухудшение качества фильтрата. Время, в течение которого данная загрузка способна осветлять воду до требуемого качества, называется временем защитного действия загрузки. Наряду со временем защитного действия t_3 следует учитывать также время работы фильтра до достижения предельной потери напора t_H . Оптимальными являются условия, при которых $t_3 = t_H$.

Для водопроводных фильтров рекомендуется $t_3 / t_H = 1,2 \times 1,5$, для исключения проскока взвеси в фильтрат. На основе теоретических зависимостей Д.М. Минцем был предложен метод расчёта фильтрующей загрузки, позволяющий определить величины t_3 и t_H в зависимости от высоты, крупности и неоднородности загрузки, скорости фильтрования, физико-химических свойств воды и загрузки, а также свойств и концентрации взвеси.

Параметры процесса определяются после проведения эксперимента фильтрования исследуемой воды через загрузку. При этом наблюдения ведутся за изменением концентрации взвеси по слоям загрузки и потерей напора.

Следует понимать, что теория Д.М. Минца [4] разработана опытным путём и соответствует процессу очистки малоцентрированных суспензий, обработанных путём фильтрования на зернистых фильтрах.

Цель работы и постановка задачи

Целью статьи является ознакомление с особенностями доочистки концентрированных суспензий путём фильтрования в безреагентном режиме на экспериментальных фильтрах, а также с результатами исследований по подбору технических параметров фильтров.

Наши экспериментальные и теоретические исследования, проведённые на высококонцентрированных сточных водах методом безреагентного фильтрования, показали определённые отличия процесса. Например, параболический рост потерь, преобладание тенденции накопления осадка в толще загрузки над тенденцией его постоянного сдвига в последующие слои, большая грязеёмкость загрузки и др. Н.А. Лукиных, Б.Л. Липман, В.П. Криштул также отмечают, что в тех случаях, когда на фильтры поступает вода, прошедшая только биологическую очистку или очистку с введением коагулянта в аэротенк, приведённые зависимости неприменимы [1].

Особенность сточных вод без обработки коагулянтами перед фильтрацией, по их мнению, заключается в способности частиц взвеси активного ила соединяться в прочные агрегаты на поверхности зёрен загрузки и вызывать сильную её кольматацию с образованием слоя осадка в начальных слоях [5]. В связи с этим для фильтров, работающих в этих условиях, характерен криволинейный характер роста потерь напора [6]. Разногласие в теории фильтрации имеется относительно того, как происходят отложения в пустотах фильтра. С одной стороны, Д.М. Минц предложил объяснение, согласно которому отложение частиц взвеси имеет место, но часть из них срезается потоком. С другой стороны, К. Лерк, В. Мацкрле и К. Айвес придерживаются точки зрения, согласно которой срезания не происходит и отложения изменяют внутреннюю геометрию пустот [7]. Единое мнение было достигнуто в том, что степень глубины очистки воды имеет преимущественное значение по отношению к концентрации и что

при достаточно длительной фильтрации слой засоряется настолько, что перестаёт выполнять функцию очистки, и взвесь проходит сквозь него не задерживаясь. Различие существует между мнением В. Мацкрле и К. Айвесом, считающими, что фильтр сначала улучшает свою работу, а затем его эффективность падает вследствие аккумуляции отложений, и мнением Д. Минца и К. Лерка, согласно которому эффективность фильтра постоянно падает [4].

На наш взгляд, гидродинамические силы могут отделить прилипшую ранее частицу взвеси, и это доказано в работе Д.М. Минца [4], где говорится, что с накоплением осадка в порах увеличивается сопротивление потоку, что вызывает явление разрушения осадка внутри тела фильтра.

Таким образом, в фильтре на слоях загрузки происходит образование первичных, вторичных, третичных структур осадка, прочность которых непрерывно уменьшается.

Ввиду многообразия факторов [8, 9], определяющих эффективность доочистки сточных вод на зернистых фильтрах по взвешенным веществам и другим ингредиентам, единой стройной теории, удовлетворительно описывающей действие всех факторов фильтрационного процесса в комплексе, в настоящее время нет. Поэтому, видимо, наиболее надёжный способ установления требуемых параметров – экспериментальный, выполненный с учётом реальных условий и требований [10, 11].

Описание решение задачи. Эксперимент

Цель работы – исследование процесса безреагентной доочистки сточных вод горнодобывающего производства и определение оптимальных значений основных технологических параметров фильтрования.

Опыты проводились на экспериментальной установке (рис. 1). Исследование технологических параметров проводилось на фильтрационных колонках, изготовленных из органического стекла для удобства визуального наблюдения за рабочим процессом. Высота колонок соответствовала высоте производственных фильтров и равнялась 3,6 м. Для того чтобы не проявлялось различие в размерах и форме каждого зерна загрузки, сечение открытых скорых фильтров было принято размером 100x100 мм.

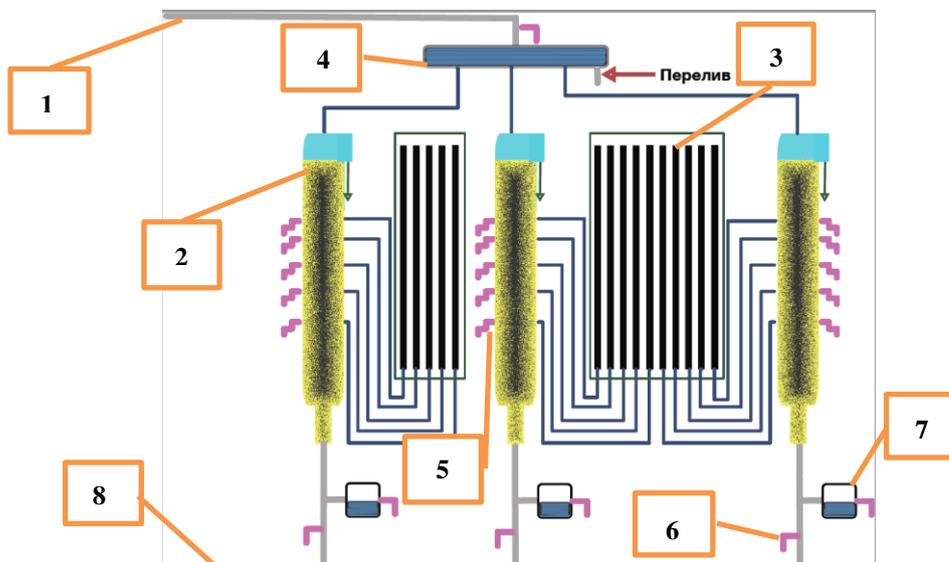


Рис. 1. Схема экспериментальной установки. 1. Трубопровод подачи сточных вод на фильтры. 2. Фильтр открытый скорый. 3. Пьезометрический щит. 4. Распределительный лоток. 5. Патрубок для отбора проб. 6. Вентиль для регулирования расхода промывочной воды. 7. Регулятор скорости фильтрования. 8. Промывной трубопровод

Fig. 1. The scheme of the experimental installation. 1. Sewage supply pipeline to filters. 2. Fast open filter. 3. Piezometric shield. 4. Distribution tray. 5. Sampling nozzle. 6. Valve for regulating the flow of flushing water. 7. Filtration rate regulator. 8. Flushing pipeline

Для изучения кинетики движения взвеси и определения качества профильтрованной воды в фильтрах по всей высоте загрузки через 50 см друг от друга расположены пробоотборники. Для исключения влияния отбора проб на скорость фильтрации пробоотборники выполнены внутренним диаметром 6 мм, суммарный расход воды из которых не превышал 3% общего расхода. Медные трубки пробоотборников изнутри фильтрующих колонок закрыты лагунной сеткой с отверстиями 0,2x0,2 мм. Потери напора определялись при помощи пьезометров, которые подсоединялись резиновыми шлангами к штуцерам, расположенным также через 50 см по другую сторону фильтра. Постоянство скорости фильтрации обеспечивалось регуляторами скорости фильтрования поплавкового типа. Исследования проводились по методикам, подробно описанным в литературе [2, 4].

Исходная суспензия после предварительной очистки на гидроциклоне подавалась на фильтры через распределительный лоток, который оборудован насадками для подачи определённых расходов жидкости. Концентрация исходной суспензии, промежуточных проб и фильтра контролировалась по оптической плотности на фотоэлектрическом калориметре при зелёном светофильтре на кювете 1 см. Ввиду большой концентрации исходной суспензии пробы периодически дублировались весовым способом. Грязеёмкость фильтра подсчитывалась как количество загрязнений, задержанных в продолжении фильтроцикла, отнесённое к его площади. Кроме того, грязеёмкость определялась весовым способом. В этом случае весь осадок после промывки колонки высушивался до постоянного веса при температуре 105°C и взвешивался.

Исследования проводились на однородной загрузке. Для этого рассев загрузки производился на близких по размеру ситах с интервалом ячеек 0,1–0,2 мм.

После определения всех технологических параметров контрольные циклы проводились на неоднородной по фракционному составу загрузке, рекомендуемой нами для производственных условий. Все опыты были проведены с соблюдением одного общего принципа: одновременно работало несколько фильтрованных колонок, причём все условия на колонках были одинаковыми, за исключением одного фактора, влияние которого изучалось.

При прочих постоянных факторах контролируемому изменению подвергались размер зёрен загрузки, скорость фильтрации и концентрация исходной суспензии.

Для исследований использовались реальные сточные воды горнодобывающего производства загрязнения в основном минеральными примесями и предварительно пропущенные через гидроциклон диаметром 50 мм с концентрацией на выходе. $C_0 = 1000–1200$ м/л и размером частиц в основной массе менее 15 мм.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Кинетика движения взвеси

Изучение изменения концентрации взвеси по слоям и с течением времени в каждом слое позволило установить характерные закономерности процесса безреагентной очистки концентрированной суспензии при её фильтровании.

Для выбора диаметра зёрен загрузки фильтра и скорости фильтрования получены данные, на основе которых определено изменение относительной концентрации (отношение мгновенной концентрации к начальной) взвешенных веществ по слоям. Процесс осветления для различных диаметров происходит во всех слоях загрузки, а эффект очистки возрастает от слоя к слою (рис. 2).

Наиболее интенсивно процесс осветления протекает в загрузке с диаметром зёрен 1 мм, и поэтому продолжительность фильтроцикла невелика (табл. 1). Основная масса загрязнений задерживается в первых по движению слоях загрузки для всех диаметров зёрен, но с уменьшением диаметра эта закономерность ярче выражена. С увеличением диаметра зёрен взвесь проникает глубже в толщу загрузки. В этом отношении представляет интерес работа загрузки с диаметром зёрен 1,45 мм, в которой все слои работают более равномерно, чем в других исследуемых загрузках. Об этом наглядно свидетельствует характер кривых, однако при этом содержание взвешенных веществ превышает норму 50–10 м/л. Такая нормативная концентрация взвеси рекомендуется для создания обратного водоснабжения.

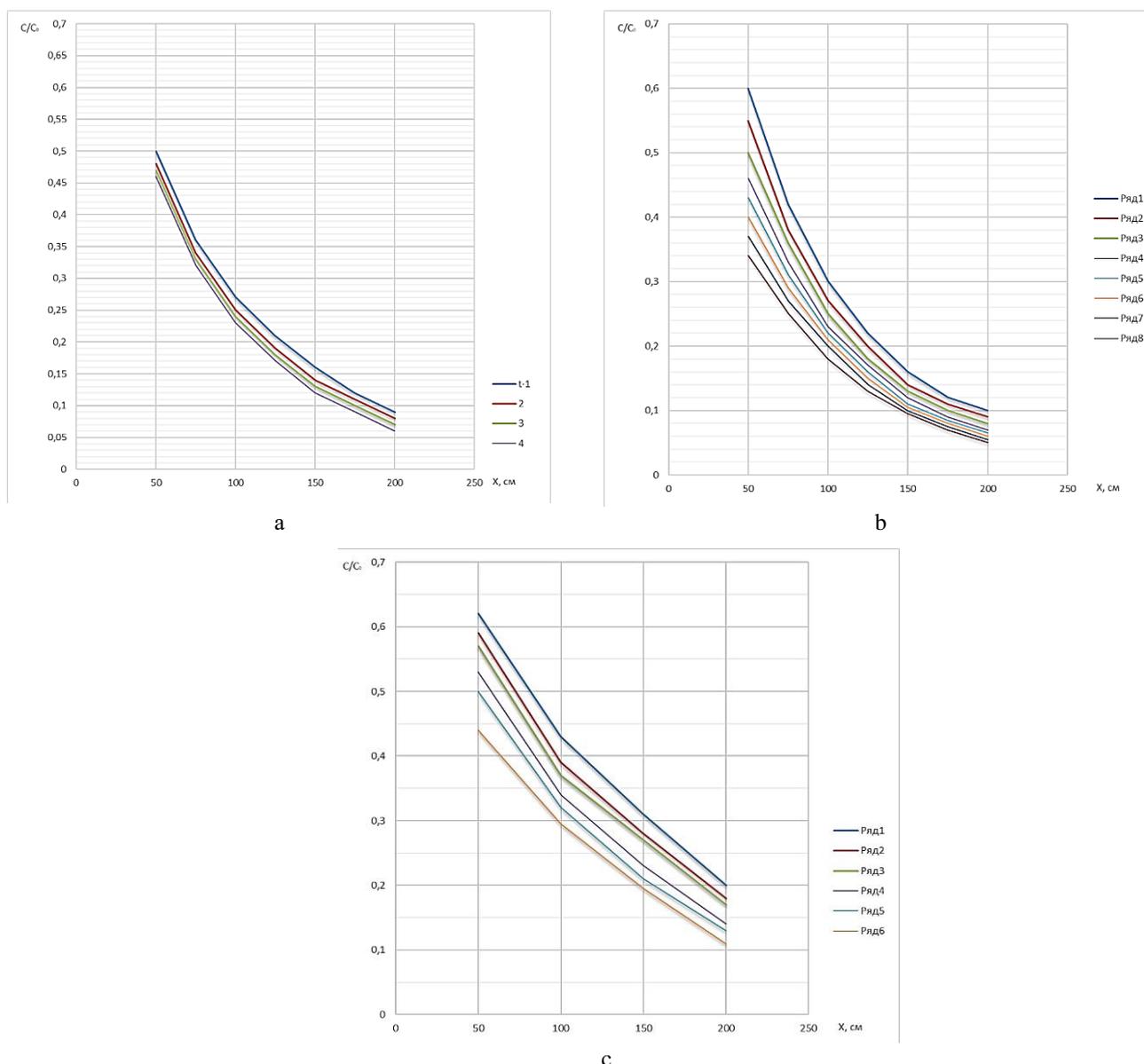


Рис. 2. Изменение концентрации суспензии по толщине фильтрующей загрузки:
а – для $d_3 = 1$ мм; б – $d_3 = 1,2$ мм; в – $d_3 = 1,45$ мм

Fig. 2. Change in the suspension concentration along the thickness of the filter media:
a – for $d_3 = 1$ mm; b – $d_3 = 1.2$ mm; c – $d_3 = 1.45$ mm

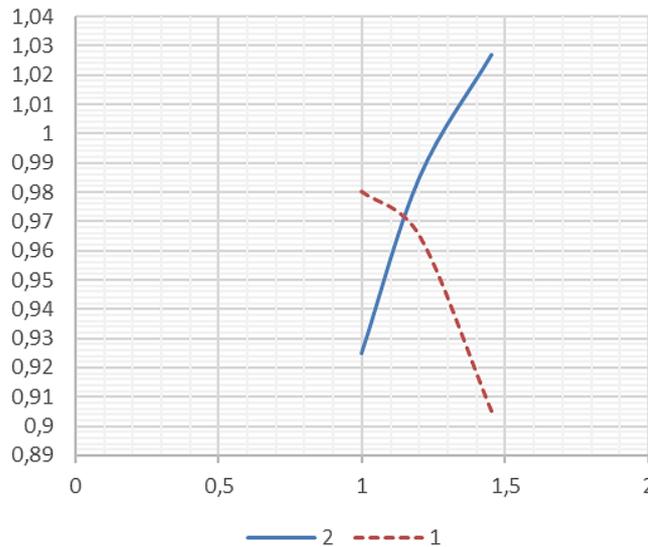
Таблица 1 / Table 1

Сравнительные данные качества фильтрата и продолжительности фильтроцикла для загрузок с различным размером зёрен

Comparative data on filtrate quality and filtration cycle duration for media with different grain sizes

V, м/час	C_0 , мг/л	d_3 , мм	$C_{ф.ср.}$, мг/л	$T_{ф.}$, час
10	1100	1,0	20	4
		1,2	40	8
		1,45	110	10

Допустимое качество фильтрата получается при фильтровании суспензии через загрузку с диаметром 1,2 мм, при этом время работы фильтра составляет восемь часов. При выбранном диаметре загрузки было изучено влияние скорости фильтрования на кинетику процесса осветления сточных вод. Влияние диаметра загрузки на технологические показатели процесса очистки представлены на рис. 3.

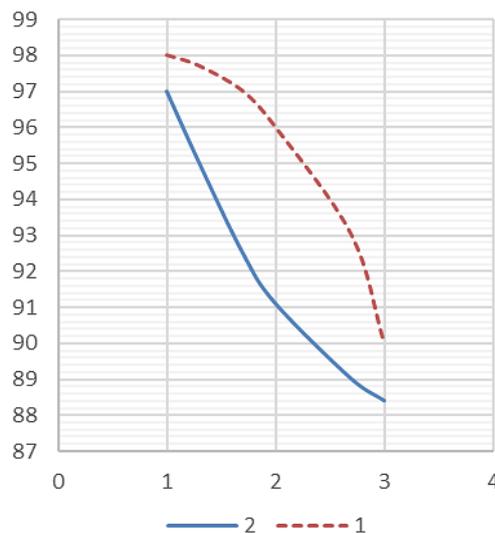


**Рис. 3. Влияние диаметра загрузки на эффект очистки и продолжительность фильтроцикла:
1 - E = λ(d); 2 - T = λ(d)**

Fig. 3. Influence of the loading diameter on the cleaning effect and the duration of the filter cycle:
1 - E = λ(d); 2 - T = λ(d)

Наибольший эффект очистки (98%) наблюдался при скорости фильтрования 5 м/ч (рис. 4).

С увеличением скорости фильтрования уменьшалось время работы фильтра, что можно объяснить повышенной скоростью зашламления загрузки, так как с увеличением расхода суспензии увеличивается и количество загрязнений, поступающих на фильтр в единицу времени при одной и той же начальной концентрации. При большей скорости фильтрования загрязнения проникают глубже в толщу загрузки, но при этом эффект очистки снижается. Это явление объясняется уменьшением времени контакта суспензии с загрузкой и увеличением истинной скорости потока на зёрнах фильтрующего материала. При таких условиях частицы взвеси, не закрепившиеся в верхних слоях загрузки, но по своей природе являющиеся неустойчивыми, задерживаются нижележащими слоями. Скорость фильтрования свыше 10 м/час не обеспечивает необходимые продолжительность фильтроцикла и качество фильтра. При меньшей скорости неоправданно увеличится площадь фильтра, кроме того, почти на всём протяжении работы фильтра в процессе осветления участвуют только два первых слоя (рис. 6).



**Рис. 4. Влияние скорости фильтрования на эффект очистки (1)
и продолжительность фильтроцикла (2)**

Fig. 4. The effect of the filtration rate on the cleaning effect (1) and the duration of the filter cycle (2)

При фильтровании со скоростью 10 м/час слои работают более равномерно (рис. 5), что создаёт предпосылки для оптимизации работы фильтра.

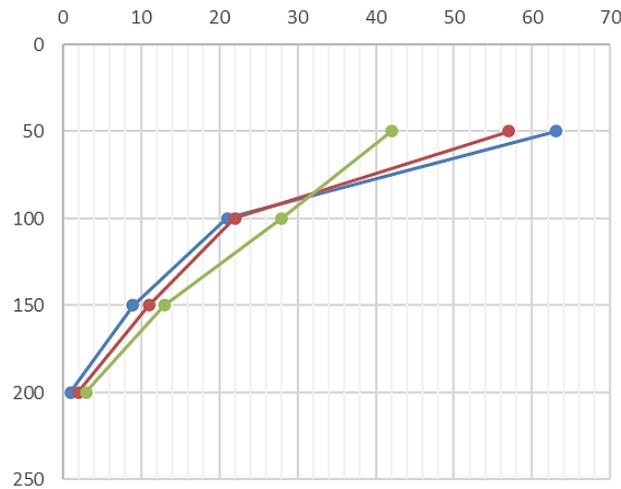


Рис. 5. Распределение задержанных загрязнений в толще фильтрующего слоя
 Fig. 5. Distribution of retained contaminants in the thickness of the filter layer

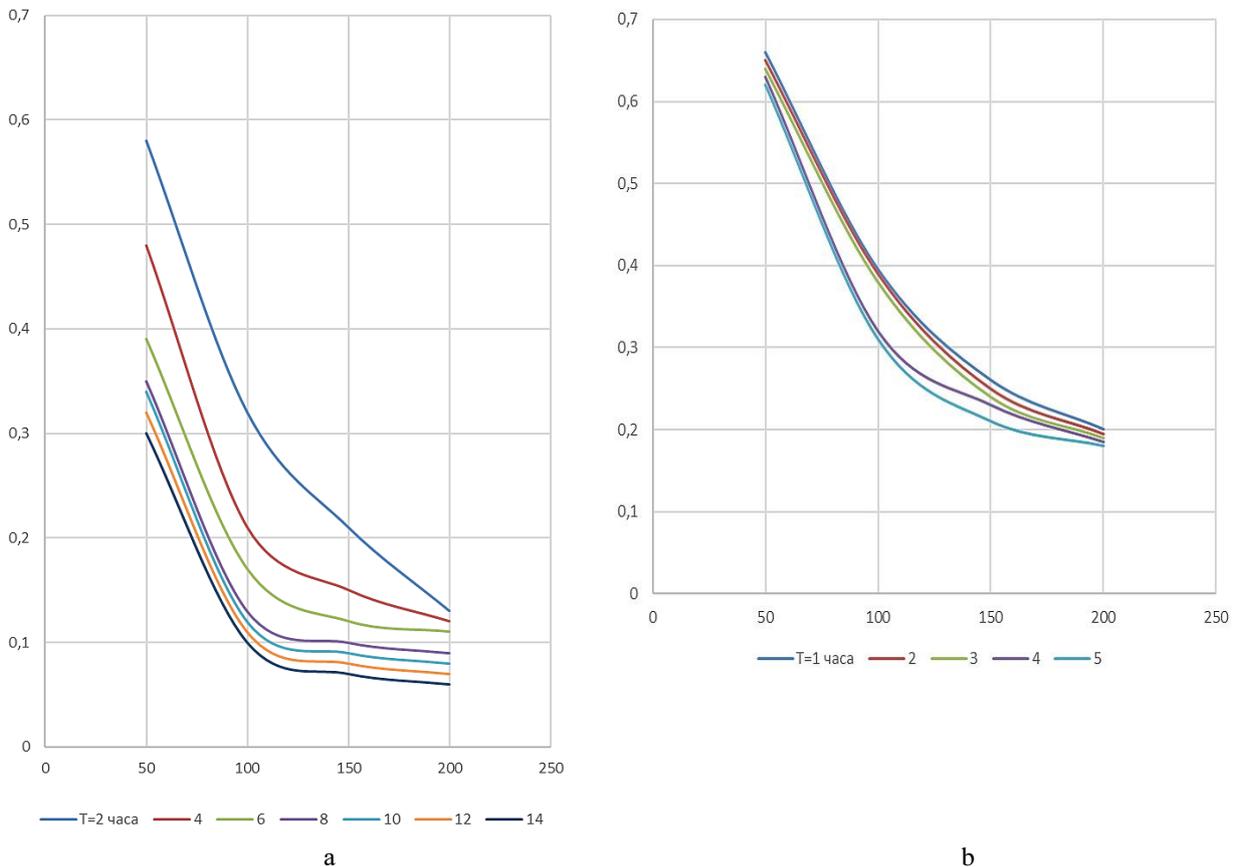


Рис. 6. Изменение концентрации суспензии по толщине фильтрующей загрузки:
а - для V= 5 м/ч; б - для V= 15 м/ч

Fig. 6. Change in the suspension concentration along the thickness of the filter media:
 а - for V= 5 m/h; б - for V= 15 m/h

Исследования [12, 13] показывают, что при очистке рассматриваемых стоков концентрация суспензии по толщине загрузки наиболее медленно уменьшается в начале процесса. С увеличением продолжительности фильтрации характер кривых более крутой. Это говорит о том, что осадок в загрузке накапливается непрерывно, и по мере его накопления эффект очист-

ки повышается, что является отличительной особенностью фильтрования рассматриваемых сточных вод без применения реагентов. При коагулировании с течением времени качество осветлённой суспензии по слоям ухудшается, так как загрязнения, накопившиеся в толще загрузки, образуют гелеобразную рыхлую и непрочную структуру. Поэтому под влиянием гидродинамических сил, возникающих при движении воды, отложения разрушаются и частично выносятся в последующие слои. По достижении предельной насыщенности всех слоёв качество фильтрата начинает ухудшаться [14, 15].

Динамика изменения потерь напора

При фильтровании сточных вод горнодобывающего производства, имеющих высокую концентрацию взвешенных веществ, в загрузке происходит интенсивное накапливание осадка, сопровождающееся быстрым нарастанием потерь напора. При накоплении осадка изменяется удельная поверхность и уменьшается пористость фильтрующего слоя. В результате гидравлическое сопротивление меняется. Результаты исследований показывают, что характер изменения потерь напора зависит от крупности зёрен загрузки (рис. 7).

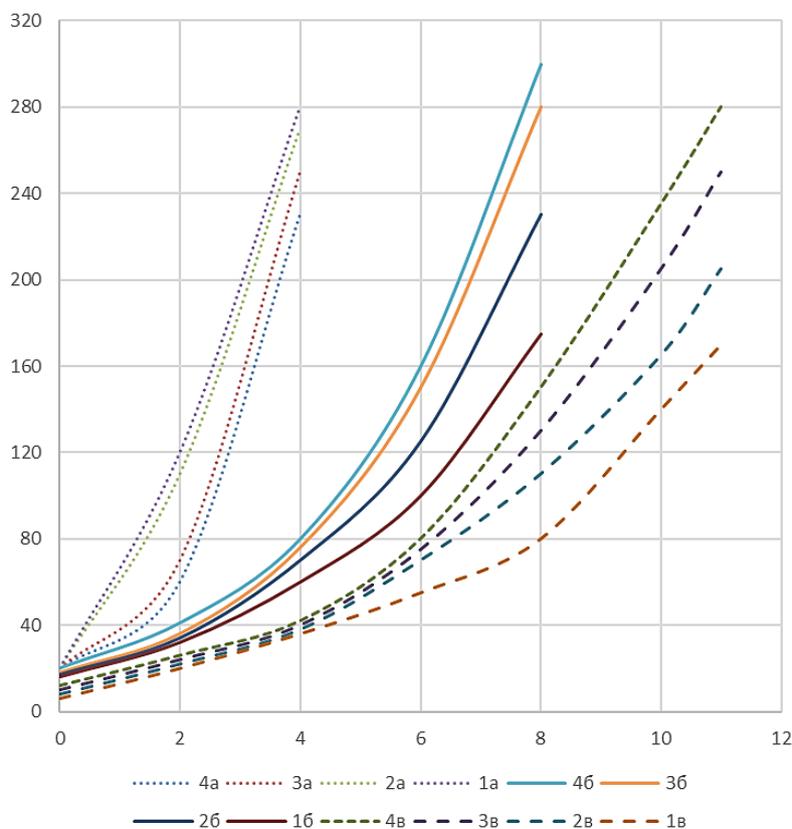


Рис. 7. Влияние диаметра загрузки и толщин слоя на прирост потерь напора: а - для d₃ = 1 мм; б - d₃ = 1,2 мм; в - d₃ = 1,45 мм

Fig. 7. Influence of Loading Diameter and Layer Thickness on Head Loss Increment: а - for d₃ = 1 mm; б - d₃ = 1.2 mm; в - d₃ = 1.45 mm

Во всех трёх загрузках фильтроцикл заканчивается по предельным потерям напора, но с уменьшением диаметра зёрен загрузки скорость нарастания потерь напора увеличивается. Для всей исследуемой толщины загрузки скорость нарастания потерь составляет: для d₃ = 1,45 мм – 0,44 см/мин, для 1,2 мм – 0,59 см/мин, для 1 мм – 1,08 см/мин. Здесь скорость нарастания потерь напора принята как средняя за весь фильтроцикл, так как с течением времени она изменяется. С увеличением продолжительности работы фильтра скорость нарастания потерь напора увеличивается, о чём наглядно свидетельствует характер кривых. Это отличает динамику изменения потерь напора при безреагентной очистке рассматриваемых стоков от динамики изменения потерь напора при очистке неконцентрированной коагулирован-

ной суспензии, где зависимость потерь напора от времени линейная. Начальный гидравлический уклон, согласно экспериментальным данным, для загрузок с диаметром зёрен 1; 1,2; 1,45 мм соответственно равен 0,115; 0,095; 0,070. В результате накопления осадка в порах загрузки гидравлический уклон изменяется и по окончании работы фильтра составляет для $d_3 = 1$ мм – 1,41, для 1,2 мм – 1,50, для 1,45 – 1,51. Предельный гидравлический уклон характеризует прочность осадка, так как пропорционален разрушающему напряжению сдвига. В исследуемых загрузках с различным диаметром зёрен при предельном гидравлическом уклоне, а следовательно, и высоких касательных напряжениях в данных условиях не наблюдается срыва осадка, что свидетельствует о его прочности. Опыты показали, что наиболее приемлемая по качеству фильтрата загрузка с диаметром зёрен 1,2 мм. Исследования скорости фильтрования на выбранном диаметре показывают, что скорость прироста потерь напора снижается с уменьшением скорости фильтрования (рис. 8): при $V = 15$ м/час $h/t = 1$ см/мин, при 10 м/час – 0,59 см/мин, при 5 м/час – 0,36 см/мин.

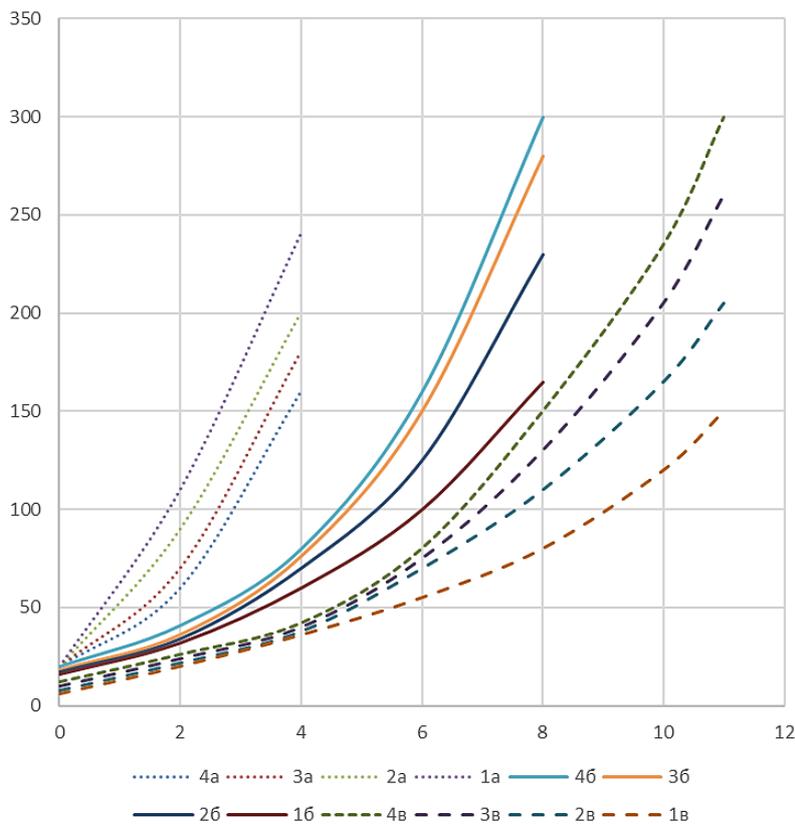


Рис. 8. Влияние скорости фильтрования и толщин слоя на прирост потерь напора:
а – $V = 15$ м/ч; б – $V = 10$ м/ч; в – $V = 5$ м/ч

Fig. 8. Influence of filtration rate and layer thickness on the increase in head losses:
а – $V = 15$ m/h; б – $V = 10$ m/h; в – $V = 5$ m/h

Это и определяет продолжительность фильтроцикла. С увеличением скорости фильтрования возрастает начальный гидравлический уклон: при $V = 15; 10; 5$ м/час $i_0 = 0,169; 0,095; 0,059$ соответственно.

Гидравлический уклон в конце фильтроцикла для всех исследуемых скоростей одинаковый и составляет 1,51.

Выводы

1. Экспериментальные исследования позволили выявить закономерности процесса безреагентной очистки сточных вод горнодобывающего производства путём фильтрования через зернистую загрузку.

2. В процессе фильтрования осадок в загрузке накапливается непрерывно, и по мере его накопления эффект очистки повышается.

3. Динамика изменения потерь напора показывает, что с увеличением продолжительности работы фильтра скорость нарастания потерь напора увеличивается.

4. Результаты опытов показывают, что с увеличением концентрации взвешенных веществ в исходной суспензии повышается эффект очистки.

5. Установлен характер влияния X_3 , d_3 , V_f на эффект очистки, продолжительность фильтроцикла, скорость прироста потерь напора.

Проведённые исследования позволяют расширить научную базу теории безреагентного фильтрования, снизить объёмы и вредное влияние на окружающую среду отходов после промывки безреагентных фильтров и повысить экологическую безопасность водоёмов.

Следующим этапом исследований доочистки концентрированных сточных вод в безреагентном режиме будет являться изучение процесса и разработка рекомендаций по использованию многоступенчатого и напорного фильтрования и на этой основе создание новых конструкций фильтров.

ВКЛАД АВТОРОВ | CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

М.Н. Шевцов, Е.Л. Войтов, В.П. Колпакова – сбор и анализ информации, интерпретация результатов эксперимента; Д.В. Мишкин, Ю.Н. Еремеева – написание текста статьи, составление графиков, таблиц, работа с фотоматериалами; составление литературного обзора, окончательное утверждение версии для публикации.

M.N. Shevtsov, E.L. Voitov, V.P. Kolpakova – collection and analysis of information, interpretation of experimental results; D.V. Mishkin, Yu.N. Eremeeva – writing the text of the article, compiling graphs, tables, working with photographs; compiling a literature review, final approval of the version for publication.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ | DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.
The authors declare no conflict of interest.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лукиных Н.А., Липман Б.Л., Криштул В.П. Методы доочистки сточных вод. Москва: Стройиздат, 1974. 96 с.
2. Жужиков В.А. Фильтрование Теория и практика разделения суспензий. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Химия, 1980. 398 с.
3. Кузьмин Ю.М. Сетчатые установки систем водоснабжения: Справочное пособие. Ленинград: Стройиздат. Ленингр. отд-ние, 1976. 159 с.
4. Минц Д.М. Теоретические основы технологии очистки воды. Москва: Стройиздат, 1964. 156 с.
5. Методики проведения технологических изысканий и моделирования процессов очистки воды на водопроводных станциях / подгот.: В.Л. Драгинским и Л.П. Алексеевой. Москва, 2001. 57 с.
6. Шевцов М.Н. Технологическое моделирование процессов очистки воды: учебное пособие. Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2021. 63 с.
7. Ибоян Д.Л., Косоплёткин М.В., Беловодский Е.А. Современные методы очистки сточных вод // Рациональное использование природных ресурсов и переработка техногенного сырья: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, химия и биотехнология. 2021. С. 92–97.
8. He C. et al. Techno-economic feasibility of “membrane-based pre-concentration+ post-treatment” systems for municipal wastewater treatment and resource recovery // Journal of Cleaner Production. 2022. Vol. 375. P. 134113.
9. Mourão J.M.M. et al. Post-treatment of swine wastewater using aerobic granular sludge: granulation, microbiota development, and performance // Bioresource Technology Reports. 2021. Vol. 16. P. 100862.
10. Залётова Н.А., Касперович В.Ю. Современные направления очистки высококонцентрированных сточных вод // Системные технологии. 2021. № 1(38). С. 44–49.
11. Герашенко А.А. и др. Комплексная система очистки сточных вод текстильного предприятия // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2021. № 2. С. 72–83.

12. Власов В.В., Власова Г.В., Курбатов М.В. Использование адсорбентов для очистки промышленных вод // Наука и практика – 2022: Всероссийская междисциплинарная научная конференция, 2022. С. 199. URL: https://astu.org/Uploads/files/media/file/наука/Программа_Наука%20и%20практика-2022.pdf?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru
13. Газизова А.У., Смагулова Э.М. Очистка сточных вод биологическим методом в Казахстане // Вестник науки. 2024. Т. 1. № 12 (81). С. 1237–1245.
14. Патент № 198330. Радиальный двухслойный фильтр. ФГБОУ ВО ТОГУ. Авторы: Шевцов М.Н., Катин В.Д., Нестеров В.И. Заявка: 23.12.2019. Дата регистрации: 02.07.2020. Р.Ф.ру 198330U1.
15. Waqas S. et al. Membrane filtration as post-treatment of rotating biological contactor for wastewater treatment // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 13. P. 7287.

REFERENCES

1. Lukinykh N.A., Lipman B.L., Krystul V.P. Methods of wastewater treatment. Moscow: Stroyizdat, 1974. 96 p. (In Russ.).
2. Zhuzhikov V.A. Filtration: Theory and practice of separating suspensions. 4th ed., revised and enlarged. Moscow: Chemistry, 1980. 398 p. (In Russ.).
3. Kuzmin Yu.M. Mesh installations of water supply systems: a reference guide. Leningrad: Stroyizdat. Leningrad Branch, 1976. 159 p. (In Russ.).
4. Mints D.M. Theoretical foundations of water purification technology. Moscow: Stroyizdat, 1964. 156 p. (In Russ.).
5. Methods of technological surveys and modeling of water purification processes at water supply plants / Prepared by V.L. Draginsky and L.P. Alekseeva. Moscow, 2001. 57 p. (In Russ.).
6. Shevtsov M.N. Technological modeling of water purification processes: a textbook. Khabarovsk: Publishing House of TOGU, 2021. 63 p. (In Russ.).
7. Iboyan D.L., Kosopletkin M.V., Belovodsky E.A. Modern methods of wastewater treatment. *Rational Use of Natural Resources and Processing of Technogenic Raw Materials: Fundamental Problems of Science, Materials Science, Chemistry and Biotechnology*, 2021, pp. 92–97. (In Russ.).
8. He C. et al. Techno-economic feasibility of “membrane-based pre-concentration+ post-treatment” systems for municipal wastewater treatment and resource recovery. *Journal of Cleaner Production*, 2022, vol. 375, p. 134113.
9. Mourão J.M.M. et al. Post-treatment of swine wastewater using aerobic granular sludge: granulation, microbiota development, and performance. *Bioresource Technology Reports*, 2021, vol. 16, p. 100862.
10. Zaletova N.A., Kasperovich V.Yu. Modern trends in highly concentrated wastewater treatment. *System Technologies*, 2021, no. 1(38), pp. 44–49. (In Russ.).
11. Gerashchenko A.A. and others. Integrated wastewater treatment system of a textile enterprise. *Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture*, 2021, no. 2, pp. 72–83. (In Russ.).
12. Vlasov V.V., Vlasova G.V., Kurbatov M.V. The use of adsorbents for industrial water treatment. *Science and Practice – 2022: All-Russian Interdisciplinary Scientific Conference*, 2022, p. 199. (In Russ.). URL: https://astu.org/Uploads/files/media/file/наука/Программа_Наука%20и%20практика-2022.pdf?utm_source=yandex.ru&utm_medium=organic&utm_campaign=yandex.ru&utm_referrer=yandex.ru
13. Gazizova A.U., Smagulova E.M. Biological wastewater treatment in Kazakhstan. *Bulletin of Science*, 2024, vol. 1, no. 12(81), pp. 1237–1245. (In Russ.).
14. Patent No. 198330. Radial double-layer filter. FSBEI HE TOGU. Authors: Shevtsov M.N., Katin V.D., Nesterov V.I. Application: 12.23.2019. Registration date: 07.02.2020. Р.Ф.ги 198330U1. (In Russ.).
15. Waqas S. et al. Membrane filtration as post-treatment of rotating biological contactor for wastewater treatment. *Sustainability*, 2021, vol. 13, no. 13, p. 7287.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Шевцов Михаил Николаевич – доктор технических наук, профессор Инженерно-строительного института, заведующий кафедрой инженерных систем и техносферной безопасности, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация).

✉ 000458@togudv.ru

Mikhail N. Shevtsov, Doctor of Engineering Sciences, Professor of the Institute of Civil Engineering, Head of the Department of Engineering Systems and Technosphere Safety, Pacific State University (Khabarovsk, Russian Federation).

Войтов Евгений Леонидович – доктор технических наук, доцент, профессор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин) (Новосибирск, Российская Федерация),

✉ voitovel@ya.ru

Evgeny L. Voytov, Doctor of Engineering Sciences, Associate Professor, Professor, Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin) (Novosibirsk, Russian Federation).

Мишкин Денис Владимирович – преподаватель, Тихоокеанский государственный университет (Хабаровск, Российская Федерация),

✉ 012438@togudv.ru

Denis V. Mishkin, Lecturer, Pacific State University (Khabarovsk, Russian Federation).

Колпакова Валентина Павловна – доктор технических наук, профессор, руководитель центра компетенций и трансфера технологий в области водного хозяйства и водопользования, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева (Усть-Каменогорск, Республика Казахстан),

✉ Vkolpakova53@mail.ru

Valentina P. Kolpakova, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Center for Competence and Technology Transfer in the Field of Water Management and Water Use, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University (Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan).

Еремеева Юлия Николаевна – кандидат технических наук, старший преподаватель, старший научный сотрудник центра компетенций и трансфера технологий в области водного хозяйства и водопользования, Восточно-Казахстанский государственный технический университет им. Д. Серикбаева (Усть-Каменогорск, Республика Казахстан),

✉ Yeremeyeva83@mail.ru

Yulia N. Ereemeeva, Candidate of Engineering Sciences, Senior Lecturer, Senior Researcher at the Center for Competencies and Technology Transfer in the Field of Water Management and Water Use, D. Serikbayev East Kazakhstan State Technical University (Ust-Kamenogorsk, Republic of Kazakhstan).

Статья поступила в редакцию / Received: 25.05.2025.

Доработана после рецензирования / Revised: 17.09.2025.

Принята к публикации / Accepted: 24.09.2025