

ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

TECHNOSPHERE SAFETY



УДК 628.16.0

Оригинальное эмпирическое исследование

<https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Разработка методики расчета комбифильтра

Б.С. Ксенофонов , А.А. Ширниех ✉
 Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
г. Москва, Российская Федерация
✉ al-3x@mail.ru

EDN: URXCEZ

Аннотация

Введение. При ухудшении очистки стоков следует повысить интенсивность работы очистных сооружений. Некоторые подходы к решению данной задачи описаны в литературе. Известно, как в целях интенсификации процесса коагуляции используется регулируемое механическое перемешивание коагулянта со стоками, перемешивание с помощью воздуха, ввод коагулянта посредством струйных или камерных смесителей. Авторы данной статьи предлагают интегрировать в одном корпусе фильтр осветлительный вертикальный (ФОВ) и камеру перемешивания. Такой подход описан впервые. Исключены недостатки, характерные для эксплуатации обособленных устройств: не нужны дополнительные площади, можно расположить рядом зоны образования агрегатов и их удаления на фильтрах, а также избежать разбивания хлопьев в соединяющих трубопроводах. Эффективность установки ранее подтвердилась экспериментально. Цель данного исследования — разработать научно обоснованную методику расчета комбифильтра, что важно для массового внедрения.

Материалы и методы. Эффективность перемешивания псевдоожиженного слоя определяли по критерию Кэмпса, который характеризует энергию, затрачиваемую на перемешивание. Учитывались публикации, посвященные исследуемой проблеме. Особое внимание уделяется тому, как описана коагуляция. До разработки методики расчета авторы провели эксперименты и создали математическую модель установки. Рассматривается функционирование комбифильтра с камерой перемешивания, которая состоит из чаши интенсивного перемешивания с плавающей загрузкой и чаши успокоивания. Основные исходные данные для методики расчета: максимальный расход стоков, вязкость воды, диаметр фильтра, высота от загрузки до корпуса, интенсивность обратной промывки и объем расширения загрузки при обратной промывке.

Результаты исследования. Показано, как критерий Кэмпса зависит от массы частиц, их площади, времени контакта и вязкости псевдоожиженного слоя. На этой зависимости основан расчет камеры перемешивания комбифильтра. Принимается во внимание регенерация фильтров, связанная с эффективностью обратной промывки. Приводится методика расчета камеры перемешивания. Учитываются факторы снижения эффективности обратной промывки. В качестве компенсации предлагается усилить интенсивность промывки или уменьшить высоту фильтрующего слоя. Показано, как рассчитать габариты элементов камеры перемешивания — диаметр и высоту чаш. В расчете также заложена самопроверка, которая позволит избежать ошибок.

Обсуждение и заключение. Впервые описаны усовершенствованная конструкция комбифильтра и методика его расчета. Предложенный подход позволяет определить габариты камеры перемешивания и обеспечить необходимую эффективность обратной промывки. Новое решение представляет практический интерес для предприятий, которые эксплуатируют очистные сооружения с ФОВ.

Ключевые слова: фильтр осветлительный вертикальный, комбинированный фильтр, расчет комбифильтра, критерий Кэмпса для псевдоожиженного слоя, интенсификация фильтрования

Благодарности. Авторы благодарят редакционную команду журнала и рецензента за компетентную экспертизу и ценные рекомендации по улучшению статьи.

Для цитирования. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка методики расчета комбифильтра. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Development of a Calculation Method for a Combined Filter

Boris S. Ksenofontov , Albert A. Shirniekh  

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

 al-3x@mail.ru

Abstract

Introduction. If wastewater treatment becomes less effective, the intensity of treatment facilities should be increased. Several approaches to solving this issue have been described in the literature. For example, to intensify the coagulation process, researchers have used controlled mechanical mixing of coagulants with effluents, mixing with air, and injecting the coagulant using jet or chamber mixers. The authors of this paper propose integrating a vertical clarifying filter (VCF) and a mixing chamber into one housing. This is a novel approach that eliminates the disadvantages of operating separate devices, such as the need for additional space, the possibility of forming aggregates close to the area where they are removed on filters, and avoiding breakage of flakes in connecting pipelines. Experimental evidence has previously demonstrated the effectiveness of this installation. The aim of this study is to develop a scientific methodology for calculating the combined filter, which is essential for widespread adoption.

Materials and Methods. The mixing efficiency of the fluidized bed was determined using the Camp criterion, which characterized the energy spent on mixing. Relevant publications on the subject were also taken into account. Special attention was paid to the description of coagulation. Before developing the calculation method, the authors conducted experiments and created a mathematical model of the installation. The operation of a combined filter with a mixing chamber consisting of a rapid mixing tank with a floating load and a settling tank was considered. The main initial data for the calculation method included: maximum wastewater flow rate, water viscosity, filter diameter, distance from load to housing, backwash intensity, and the volume of expansion of load during backwashing.

Results. The paper shows that the Camp criterion depends on various factors, including mass, area, contact time, and viscosity of particles in a fluidized bed. The calculation of the mixing chamber of the filter was based on this dependence. The regeneration of filters related to the efficiency of backwashing was taken into account. The method for calculating the mixing chamber was presented, and factors that could reduce the effectiveness of backwashing were discussed. As compensation, it was proposed to increase the intensity of backwashing or reduce the height of the filter layer. It was shown how to calculate the dimensions of the mixing chamber elements — the diameter and height of the tanks. A self-check was included in the calculation to avoid errors.

Discussion and Conclusion. For the first time, an improved combined filter design and a method for calculating it are described. The proposed approach makes it possible to determine the dimensions of the mixing chamber and ensure the necessary backwash efficiency. The new solution is of practical interest for enterprises that operate wastewater treatment plants with VCF.

Keywords: vertical clarifying filter, combined filter, calculation of a combined filter, Camp criterion for fluidized bed, filtration intensification

Acknowledgments. The authors would like to thank the Editorial board and the reviewer for their competent expertise and valuable recommendations that improved the quality of the article.

For citation. Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of a Calculation Method for a Combined Filter. *Safety of Technogenic and Natural Systems*. 2025;9(1):7–13. <https://doi.org/10.23947/2541-9129-2025-9-1-7-13>

Введение. По итогам 2022 года на загрязненные сточные воды в России приходилось в среднем 33,4 % от общего объема водоотведения¹. Одна из причин данной проблемы — недостаточно эффективная очистка. На промышленных объектах применяют не только одно- или двухступенчатые системы, но и комплексные решения, обеспечивающие несколько этапов очистки. Они состоят из таких компонентов, как гравельные решетки, обратноосмотические мембраны и выпарные установки. Несмотря на разнообразие и сложность этих систем, они не всегда применимы и продуктивны. Препятствием для их эффективного использования могут быть:

- дороговизна оборудования;
- устаревшие сооружения;
- ухудшение качества сточных вод.

¹ О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2022 году. Государственный доклад. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. URL: <https://2022.ecology-gosdoklad.ru> (дата обращения: 26.08.2024).

Ниже перечислены основные методы интенсификации работы очистных сооружений. Речь идет о вариантах перемешивания коагулянта с водой:

- регулируемом механическом [1];
- с добавлением воздуха и концентрированного коагулянта [2];
- за счет кавитационных резонансных эффектов [3];
- с помощью струйных [4] или камерных смесителей [5].

Однако у этих технических решений есть свои недостатки. Во-первых, нужны дополнительные площади для размещения такого оборудования, как флокулятор или камера хлопьеобразования. Во-вторых, зоны образования агрегатов и их удаления на фильтрах находятся на определенном расстоянии друг от друга. В-третьих, при разделении процесса хлопьеобразования и фильтрации хлопья разбиваются в соединяющих трубопроводах.

Для решения проблемы нужны такие комплексы очистки воды, которые интегрируют несколько процессов в одном корпусе. Это позволит усовершенствовать существующие системы очистки и при этом сэкономить производственные площади. Подчеркнем, что речь идет о модернизации уже имеющегося оборудования. Для реализации этой задачи целесообразно использовать комбинированные фильтры.

Цель работы — создать научно обоснованную методику расчета, которая позволит повторить положительный результат использования комбифильтра для других фильтров.

Методы и материалы. Авторы предлагают полезную модель комбифильтра [6]. Это песчаный фильтр, в корпус которого встроена камера перемешивания коагулянта. Ранее целесообразность такого подхода доказали авторы представленной статьи [7]. Комбинированные установки и системы подходят для одновременного решения нескольких проблем. Так, например, биоуголь можно использовать для удаления микропластика [8]. Гибридная система мембранной дистилляции способна давать очищенную воду и электроэнергию [9]. Обратный осмос может работать от концентрированного солнечного газового двигателя [10].

По мнению авторов, предлагаемая полезная модель комбифильтра (рис. 1) — это эффективное решение для интенсификации фильтрования на действующих производствах. Схема представленного комбифильтра несколько отличается от исходного [6]. Разница обусловлена особенностями конструкции, выявленными в результате компьютерного моделирования [7]. Благодаря этим обнаруженным свойствам удалось повысить эффективность работы камеры.

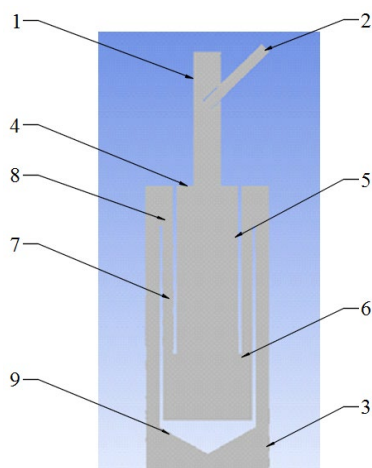


Рис. 1. Схема комбифильтра:

- 1 — патрубок исходной воды; 2 — патрубок подачи реагента; 3 — корпус фильтра;
4 — камера перемешивания; 5 — чаша интенсивного перемешивания с плавающей загрузкой; 6 — нижний перелив;
7 — чаша успокаивания; 8 — верхний перелив; 9 — конусная вставка

Через патрубки 1 и 2 в чашу интенсивного перемешивания поступают вода и коагулянт соответственно. Коагулянт перемешивается в первой камере под напором исходной воды благодаря перемешивающей загрузке. После обработки коагулянтом вода направляется через нижний перелив в чашу успокаивания, а затем — через верхний перелив в корпус фильтра.

Коагулянт способствует нейтрализации заряда коллоидных частиц [11] и образованию труднорастворимых соединений [12]. Процесс коагуляции включает два этапа [13], для каждого из которых в камере перемешивания предусмотрены определенные зоны.

В камере перемешивания проходит первый этап — перекинетический. Благодаря специальной загрузке внутри камеры реагенты равномерно и быстро распределяются, достигается высокий градиент скорости потока. Контактная коагуляция еще больше увеличит эффективность реагентной обработки.

Между камерами перемешивания и хлопьеобразования расположен нижний перелив. Он выполняет ключевую функцию защиты от выноса перемешивающей загрузки дальше в чашу и в сам фильтр, а также способствует снижению турбулентности потока.

При интенсивности перемешивания не более $G = 50\text{--}60 \text{ С}^{-1}$ [14] в камерах создаются оптимальные условия для образования хлопьев.

Второй этап процесса коагуляции — ортокинетический. Он проходит в камере успокаивания, сопровождается укрупнением коллоидных частиц от 1 мкм [15] и реализует функционал камеры хлопьеобразования.

Исходная вода вместе со сформировавшимися хлопьями поступает в корпус фильтра через верхний перелив. Конусная вставка в нижней части корпуса нужна для исключения завихрений, которые разрушают хлопья.

При разработке методики расчета авторы обобщили литературные данные, провели лабораторные испытания и выполнили математическое моделирование. Результаты лабораторных исследований, подтверждающие эффективность предлагаемого решения, приведены в [7]. Для критериальной оценки процессов выбрали критерий Кэмпса, который оценивает энергию, затрачиваемую на перемешивание. Анализ литературы позволил выяснить, как эффективность промывки зависит от ее интенсивности и степени расширения загрузки. К тому же из публикаций известно значение градиента для псевдооживленного слоя.

Результаты исследования

1. *Интенсивность смешивания псевдооживленного слоя.* В качестве критерия эффективности работы используется интенсивность смешивания псевдооживленного слоя. Ориентируясь на этот показатель, можно воздействовать камеру перемешивания с фильтрами различных типоразмеров и обеспечить полученный ранее результат [7]. Согласно [16], интенсивность смешивания реагента с водой характеризуется критерием Кэмпса:

$$\Theta = G \cdot t, \quad (1)$$

где t — время пребывания в камере перемешивания, с; G — градиент скорости, $1/\text{с}$.

Время пребывания в камере перемешивания:

$$t = \frac{V}{Q}, \quad (2)$$

где V — объем чаши перемешивания, м^3 ; Q — расход исходной воды, $\text{м}^3/\text{с}$.

Градиент скорости:

$$G = \sqrt{\frac{\Delta p}{\mu t}}, \quad (3)$$

где Δp — перепад давления в камере перемешивания, Па; μ — динамическая вязкость воды, $\text{Па}\cdot\text{с}$; t — время перемешивания, с.

Согласно [17], перепад давления для псевдооживленного слоя определяется по формуле:

$$\Delta p = \frac{m_{\text{ч}} g}{S}, \quad (4)$$

где $m_{\text{ч}}$ — масса всех частиц, кг; g — ускорение свободного падения, $\text{м}/\text{с}^2$; S — площадь поперечного сечения чаши перемешивания, м^2 .

Объединив (1)–(4), получим уравнение критерия Кэмпса:

$$\Theta = \sqrt{\frac{m_{\text{ч}} g}{S \mu t}} \cdot \frac{V}{Q}. \quad (5)$$

С помощью формулы (5) для лабораторного стенда [7] рассчитали критерий Кэмпса. Его приняли равным 100 ед.

2. *Методика расчета камеры перемешивания.* Далее приводится методика расчета камеры перемешивания и необходимые исходные данные для расчета.

Исходные данные:

- критерий Кэмпса, Θ ;
- максимальный расход очищаемой воды, Q , $\text{м}^3/\text{ч}$;
- динамическая вязкость воды, μ , $\text{Па}\cdot\text{с}$;
- насыпная плотность частиц $\rho_{m_{\text{ч}}}$, кг;
- ускорение свободного падения, g , $\text{м}/\text{с}^2$;
- диаметр фильтра, $d_{\text{ф}}$, м;
- высота от загрузки до корпуса, H , м;
- интенсивность обратной промывки, ИОП_1 , $\text{л}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$;
- объем расширения загрузки при обратной промывке, $V_{\text{расш1}}$, м^3 .

Преобразовав формулу (5), можно получить систему уравнений (6), с помощью которой определяются габариты перемешивающей камеры.

$$\begin{cases} d_{\text{ч.п.}} \cdot H_{\text{ч}} = 2 \cdot \Xi \cdot Q \sqrt{\frac{\mu \cdot t}{\pi \cdot m_{\text{ч}} \cdot g}} \\ t = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2 \cdot H_{\text{ч}}}{4Q} \\ m_{\text{ч}} = \rho_{m_{\text{ч}}} \cdot \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2 \cdot H_{\text{ч}}}{Q} \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $d_{\text{ч.п.}}$ — диаметр чаши перемешивания, м; $H_{\text{ч}}$ — высота чаш перемешивания и чаши успокаивания, м.

Скорость течения в чаше успокаивания должна быть равна скорости течения в корпусе фильтра. Для определения диаметра чаши успокаивания (всей камеры в целом) воспользуемся формулой:

$$d_{\text{ч.у.}} = \sqrt{\frac{d_{\text{ф}}^2 + d_{\text{ч.п.}}^2}{2}}, \quad (7)$$

где $d_{\text{ч.у.}}$ — диаметр чаши успокаивания, м.

Проверим, помещается ли камера в корпус фильтра. Для этого учтем:

- высоту конусной вставки $H_{\text{конус}}$ (1/4 от диаметра камеры);
- запас расстояния от конуса до загрузки с минимальной высотой 1/16 от диаметра камеры.

$$H - H_{\text{ч}} - \frac{d_{\text{ч.у.}}}{4} - \frac{d_{\text{ч.у.}}}{16} \geq 0. \quad (8)$$

Проверим правильность выбора размеров камеры:

$$d_{\text{ч.у.}} < d_{\text{ф}}. \quad (9)$$

Если условия (8) или (9) не выполняются, то необходимо вернуться к (6) и скорректировать габариты перемешивающей чаши.

Рассчитаем объем, который занимает камера перемешивания:

$$V_{\text{камера}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.у.}}^2}{4} \cdot \left(H_{\text{ч}} + \frac{d_{\text{ч.у.}}}{12} \right). \quad (10)$$

Определим условие обеспечения необходимого расширения загрузки:

$$\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4} \cdot H_{\text{ч}} - V_{\text{камера}} \geq V_{\text{расш1}}. \quad (11)$$

Если условие не выполняется, то эффективность обратной промывки будет хуже. Для решения этой проблемы нужно определить, за счет чего будет поддерживаться эффективность промывок.

1. За счет увеличения интенсивности промывки находим новую интенсивность обратной промывки ИОП₂ [18]:

$$\text{ИОП}_1 \cdot V_{\text{расш1}} = \text{ИОП}_2 \cdot \left(\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4} \cdot H - V_{\text{камера}} \right). \quad (12)$$

2. За счет уменьшения высоты загрузки находим значение высоты от корпуса до загрузки $H_{\text{новая}}$, которая обеспечит нужный объем для расширения загрузки:

$$H_{\text{новая}} = \frac{V_{\text{расш1}} + V_{\text{камера}}}{\frac{\pi \cdot d_{\text{ф}}^2}{4}}. \quad (13)$$

Рассчитаем, на сколько нужно уменьшить высоту загрузки:

$$\Delta H_{\text{загр}} = H - H_{\text{новая}}. \quad (14)$$

3. Для вычислений, связанных с изменением интенсивности и объема загрузки, используем формулы (12) и (13) с учетом необходимых условий. Например, исходя из возможностей конкретных очистных сооружений, по (13) задаем допустимую величину снижения высоты загрузки, подставляем ее в (12) и рассчитывая нужную интенсивность промывки.

Определим объемы чаш перемешивания $V_{\text{ч.п.}}$ и успокаивания $V_{\text{ч.у.}}$:

$$V_{\text{ч.п.}} = \frac{\pi \cdot d_{\text{ч.п.}}^2}{4} \cdot H_{\text{ч}}, \quad (15)$$

$$V_{\text{ч.у.}} = \frac{\pi \cdot (d_{\text{ч.у.}}^2 - d_{\text{ч.п.}}^2)}{4} \cdot H_{\text{ч}}. \quad (16)$$

Вычислим необходимый объем перемешивающей загрузки $V_{\text{загр}}$:

$$V_{\text{загр}} = \frac{1}{3} V_{\text{ч.п.}}. \quad (17)$$

Рассчитаем время нахождения воды в чашах перемешивания и успокоивания:

$$t_{\text{ч.п.}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{ч.п.}}}{Q}, \quad (18)$$

$$t_{\text{ч.у.}} = \frac{3600 \cdot V_{\text{ч.у.}}}{Q}. \quad (19)$$

Обсуждение и заключение. Итоги научных изысканий, описанных в статье, позволяют говорить о целесообразности использования предложенной методики расчета комбифильтра. Этот подход, во-первых, базируется на хорошо известных и достоверных данных из литературных источников. Во-вторых, в пользу практической применимости аппарата моделирования говорит его сравнительная простота — 19 довольно лаконичных формул. Выполнив эту работу, авторы подтвердили ранее полученные результаты. Важно было еще раз показать, что смоделированная камера перемешивания улучшает процесс фильтрования и повышает активность коагуляции. Поэтому в качестве критерия эффективности работы используется интенсивность смешивания псевдооживленного слоя. Методика расчета камеры перемешивания позволяет определить ее габариты и обеспечить необходимую эффективность обратной промывки. Решение подходит для вертикальных осветлительных фильтров всех типов и размеров. Следовательно, методику можно применить на любом производстве, где используется такое оборудование.

Список литературы / References

1. Григорьева А.Н. Повышение эффективности процессов коагуляции за счет применения регулируемого механического перемешивания. *Наилучшие доступные технологии*. 2022;(2):36–44.
- Grigoreva AN, Mekhnetsov IA. Improving the Efficiency of Coagulation Processes by Using Controlled Mechanical Mixing. *Naилuchshie Dostupnye Tekhnologii*. 2022;(2):36–44. (In Russ.)
2. Сафронов М.А. Разработка конструкции смесительного узла для высокоградиентного перемешивания растворов коагулянта с водой. *Инженерный вестник Дона*. 2021;(1):6772.
- Safronov MA, Malyutina TV, Horeva IA. Development of a Mixing Unit Design for High-Gradient Mixing of Coagulant Solutions with Water. *Engineering Journal of Don*. 2021;1:6772. (In Russ.)
3. Курбатов А.Ю. Устройство для смешения коагулянта с водой. Патент РФ № 2021118005. 2021. 6 с.
- Kurbatov AYU, Kuzin EN, Averina YUM, Vetrova MA, Sitnikov IA. Device for Mixing Coagulant with Water. Patent RF No. RU 207722 U1. 2021. 6 p. (In Russ.)
4. Александров В.А., Какалов И.Л., Курсанов Н.П., Чуносков Д.В. Статический струйный смеситель. Патент РФ № RU 163042 U1. 2008. 18 с.
- Aleksandrov VA, Kakalov IL, Kursanov NP, Chunosov DV. Static Jet Mixer. Patent RF No. RU 163042 U1. 2008.18 p. (In Russ.)
5. Соболев К.В. Интенсификация процессов очистки сточных вод пищевой промышленности при использовании камерного смесителя *Uspekhi v khimii i khimicheskoi tekhnologii*. 2022;36(13):116–117.
- Sobolev KV, Nishukova MA, Rubleva SA. Intensification of Processes of Reagent Wastewater Treatment of the Food Industry Using a New Type Mixer. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2022;36(13):116–117. (In Russ.)
6. Ксенофонов Б.С. Комбифильтр для очистки воды. Патент РФ № RU 209470 U1. 2022. 4 с. URL: https://patents.s3.yandex.net/RU209470U1_20220316.pdf (дата обращения: 26.08.2024).
- Ksenofontov BS. Combined Filter for Water Purification. Patent RF No. RU 209470 U1. 2022. 4 p. (In Russ.) URL: https://patents.s3.yandex.net/RU209470U1_20220316.pdf (accessed: 26.08.2024).
7. Ксенофонов Б.С., Ширниех А.А. Разработка камеры перемешивания для комбифильтра. *Экология промышленного производства*. 2023;4(124):5–11. https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_4_5
- Ksenofontov BS, Shirniekh AA. Development of the Mixing Chamber for the Combi-Filter. *Industrial Ecology*. 2023;4(124):5–11. (In Russ.) https://doi.org/10.52190/2073-2589_2023_4_5
8. Siipola V, Pflugmacher S, Romar H, Wendling L, Koukkari P. Low-Cost Biochar Adsorbents for Water Purification Including Microplastics Removal. *Applied Sciences*. 2020;10(3):788. <https://doi.org/10.3390/app10030788>
9. Elminshawy NAS, Gadalla MA, Bassyouni M, El-Nahhas K, Elminshawy A, Elhenawy Y. A Novel Concentrated Photovoltaic-Driven Membrane Distillation Hybrid System for the Simultaneous Production of Electricity and Potable Water. *Renewable Energy*. 2020;162:802–817. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.08.041>
10. Soliman AM, Adil Al-Falahi, Mohamed A Sharaf Eldean, Monaem Elmnifi, Magdi Hassan, Basim Younis, et al. A New System Design of Using Solar Dish-Hydro Combined with reverse osmosis for Sewage Water Treatment: Case Study Al-Marj, Libya. *Desalination and Water Treatment*. 2020;193:189–211. <https://doi.org/10.5004/dwt.2020.25782>
11. Dayarathne HNP, Angove MJ, Aryal R, Abuel-Naga H, Mainali B. Removal of Natural Organic Matter from Source Water: Review on Coagulants, Dual Coagulation, Alternative Coagulants, and Mechanisms. *Journal of Water Process Engineering*. 2021;40:101820. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>
12. Wei Lun Ang, Abdul Wahab Mohammad. State of the Art and Sustainability of Natural Coagulants in Water and Wastewater Treatment. *Journal of Cleaner Production*. 2020;262:121267. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121267>

13. Jerzy Baldyga, Grzegorz Tyl, Mounir Bouaifi. Perikinet and Orthokinet Aggregation of Small Solid Particles in the Presence of Strong Repulsive Forces. *Chemical Engineering Research and Design*. 2018;136:491–501. <https://doi.org/10.1016/j.chemd.2018.06.021>
14. Saritha V, Srinivas N, Srikanth Vuppala NV. Analysis and Optimization of Coagulation and Flocculation Process. *Applied Water Science*. 2017;7:451–460. <http://doi.org/10.1007/s13201-014-0262-y>
15. Синайский Э.Г., Лапи́га Е.Я., Зайцев Ю.В. *Сепарация многофазных многокомпонентных систем*. Москва: Недра; 2002. 621 с.
Sinaiskii EG, Lapiga EYa, Zaitsev YuV. *Separation of Multiphase Multicomponent Systems*. Moscow: Nedra; 2002. 621 p. (In Russ.)
16. Конончук О.О. *Разработка технологии получения оксихлоридного коагулянта при переработке медно-аммиачных и алюминиевых отходов*. Дис. канд. техн. наук. Санкт-Петербург; 2020. 115 с.
Kononchuk OO. *Development of Technology for Obtaining Oxychloride Coagulant during Processing of Copper-Ammonia and Aluminum Waste*. Author's thesis. St. Petersburg; 2020. 115 p. (In Russ.)
17. Кочетов О.С., Сошенко М.В., Булаев В.А. Расчет системы искусственного микроклимата с теплоутилизатором кипящего слоя. В: *Трудах Междунар. науч.-практ. конф. «Глобализация науки: проблемы и перспективы»*. Уфа: Омега сайнс; 2014. С. 30–33.
Kochetov OS, Soshenko MV, Bulaev VA. Calculation of an Artificial Microclimate System with a Fluidized Bed Heat Exchanger. In: *Proc. of the International Scientific and Practical Conference "Globalization of Science: Problems and Perspectives"*. Ufa: Omega Science; 2014. P. 30–33. (In Russ.)
18. Быков В.В. Исследование обратных промывок многослойных фильтрующих сред с участием «сокирнита», pyrolox и dmi-65. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2017;8(116):12–26.
Bykov VV. Reverse Flushing Multilayer Filter Media with the Participation of "Sokirnit", Pyrolox and DMI-65. *Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie*. 2017;8(116):12–26. (In Russ.)

Об авторах:

Борис Семенович Ксенофонтов, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kbsflot@mail.ru

Альберт Албиерович Ширниех, аспирант кафедры экологии и промышленной безопасности Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана (105005, Российская Федерация, г. Москва, вн. тер. г. муниципальный округ Басманный, ул. 2-я Бауманская, 5, стр. 1), [SPIN-код](#), [ORCID](#), al-3x@mail.ru

Заявленный вклад авторов:

Б.С. Ксенофонтов: разработка концепции.

А.А. Ширниех: проведение исследования.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

About the Authors:

Boris S. Ksenofontov, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Professor of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University (bldg. 1, 5, 2nd Baumanskaya St., Basmany Municipal District, Moscow, 105005, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), [ScopusID](#), kbsflot@mail.ru

Albert A. Shirniekh, Postgraduate Student of the Department of Ecology and Industrial Safety, Bauman Moscow State Technical University, (bldg. 1, 5, 2nd Baumanskaya St., Basmany Municipal District, Moscow, 105005, Russian Federation), [SPIN-code](#), [ORCID](#), al-3x@mail.ru

Claimed Contributorship:

BS Ksenofontov: development of the concept.

AA Shirniekh: conducting research.

Conflict of Interest Statement: the authors declare no conflict of interest.

All authors have read and approved the final version of the manuscript.

Поступила в редакцию / Received 03.11.2024

Поступила после рецензирования / Revised 26.11.2024

Принята к публикации / Accepted 07.12.2024