Влияние предварительной напорной флотации на эксплуатацию волокнистого полимерного сепаратора при очистке сточных вод

Корнеева Елена Александровна
Старший преподаватель кафедры Водопользования и экологии, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Linka360639020@yandex.ru

В работе представлены результаты экспериментального сравнения двух технологических подходов к очистке нефтесодержащих сточных вод: непосредственной фильтрации на волокнистом полимерном сепараторе и применения предварительной напорной флотации с последующей полимерной сепарацией. Установлено, что включение стадии напорной флотации позволяет существенно снизить нефтяную нагрузку на последующий фильтрующий элемент и повысить общую эффективность очистки. Для дополнительной оценки характера разделения нефтяной фазы проведено исследование дисперсного состава методом оптической микроскопии. Полученные результаты свидетельствуют об изменении размеров преобладающих нефтяных капель при использовании комбинированной технологической схемы. Совокупность полученных результатов показывает перспективность сочетания предварительной напорной флотации с последующей сепарацией и может служить основой для дальнейшего изучения гидравлических характеристик фильтра в процессе эксплуатации, а также оценки продолжительности его рабочего цикла.

Ключевые слова: нефтесодержащие сточные воды, автотранспортные предприятия, напорная флотация, волокнистый полимерный сепаратор, эффективность очистки, гидравлическое сопротивление, дисперсный состав, нефтепродукты.

Статья публикуется по результатам выполнения гранта НПР СПбГАСУ 2026 года.

Введение

Сточные воды автотранспортных предприятий формируются, в частности, при мойке автомобилей, техническом обслуживании и ремонте транспортных средств и могут содержать нефтепродукты, взвешенные вещества и компоненты моющих средств. Для таких стоков характерно сочетание свободной и диспергированной нефтяной фазы, поэтому при выборе локальной технологии очистки необходимо учитывать не только исходную концентрацию загрязнений, но и их дисперсное состояние [1,2,9].

Напорная флотация применяется как физико-химическая стадия разделения нефтеводяных систем. При насыщении части потока воздухом под давлением и последующей декомпрессии образуются мелкодисперсные пузырьки, которые взаимодействуют с гидрофобной фазой и способствуют её удалению [4, 7, 8, 13]. Применение напорной флотации при очистке нефтесодержащих сточных вод было изучено в ряде экспериментальных работ, в том числе на стоках транспортных предприятий [3–6].

В качестве следующей ступени очистки могут применяться волокнистые полимерные материалы. Проведённые исследования показали, что материалы на основе полипропилена и полиэтилена способны задерживать дисперсные загрязнения, в том числе нефтепродукты [1, 10]. Возможность использования полимерных материалов, в том числе полипропилена, для очистки нефтесодержащих вод также рассматривается в работах [2, 11, 12]. По мере работы фильтра загрязнения накапливаются в межволоконном пространстве и на поверхности волокон. Это может приводить к изменению сопротивления прохождению воды и, соответственно, гидравлических характеристик фильтрующего материала [1, 10, 11]. Поэтому при оценке работы волокнистого сепаратора необходимо учитывать не только качество очистки, но и изменение его гидравлического сопротивления в процессе эксплуатации.

В данной работе исследуется схема очистки, включающая напорную флотацию и последующую фильтрацию на волокнистом полимерном сепараторе. В отличие от подачи исходной воды непосредственно на фильтр, предварительная флотация позволяет уменьшить количество нефтепродуктов, поступающих на сепаратор, и тем самым изменить условия его работы. Такой подход соответствует принципу последовательного применения различных методов очистки нефтесодержащих сточных вод, при котором предварительное удаление основной части загрязнений снижает нагрузку на последующую ступень доочистки [3, 9, 13].

Цель исследования — экспериментально сопоставить эффективность двух схем и определить изменение концентрации нефтепродуктов, дисперсного состава и гидравлической характеристики сепаратора.

Для достижения цели решались следующие задачи:

• сопоставить концентрации нефтепродуктов до и после сепаратора при непосредственной фильтрации и после предварительной флотации;

• определить эффективность отдельных стадий и суммарную эффективность комбинированной схемы;

• оценить дисперсный состав нефтяной фазы методом оптической микроскопии;

• оценить, может ли снижение загрязняющей нагрузки рассматриваться как предпосылка для увеличения продолжительности рабочего цикла.

Материалы и методы

Объектом исследования являлась модельная нефтесодержащая вода. Для подготовки модельной воды использовали водопроводную воду с добавлением дизельного топлива. При проведении расчётов в качестве исходной концентрации нефтепродуктов использовали значение, установленное по результатам аналитического определения в исследуемой пробе. Массу дизельного топлива, внесённого при приготовлении модельной сточной воды, не принимали непосредственно за концентрацию нефтепродуктов, поскольку фактическое содержание загрязняющих веществ определяли перед сепаратором и флотатором в пробах.

Экспериментальную часть выполняли по двум вариантам технологической схемы. В первом варианте модельная сточная вода последовательно проходила напорную флотацию и волокнистый полимерный сепаратор. Во втором варианте предварительную флотационную обработку не проводили — воду сразу направляли на сепаратор.

Для оценки изменения качества воды на разных стадиях процесса выполняли отбор проб. При последовательном применении флотации и сепарации анализировали исходную воду, воду после напорной флотации и воду после прохождения сепаратора. При работе только с сепаратором определяли содержание нефтепродуктов в исходной воде и в фильтрате после сепарации. Такое построение эксперимента позволяло отдельно оценить вклад предварительной флотационной обработки и последующей волокнистой фильтрации в снижение концентрации нефтепродуктов.




Рисунок 1 — Экспериментальные установки: слева — пилотная установка напорной флотации с полимерным сепаратором; справа — лабораторная установка с волокнистым полимерным сепаратором.

Эффективность очистки определяли по выражению:

$$\eta = \frac{C_{вх} - C_{вых}}{C_{вх}} \cdot 100\%,$$

где $C_{вх}$ и $C_{вых}$ — концентрации нефтепродуктов до и после соответствующей стадии очистки, мг/л.

Для комбинированной схемы очистки определяли общую эффективность работы установки по изменению концентрации нефтепродуктов от исходного значения до показателя после сепаратора.

Дисперсный состав нефтяной фазы исследовали с помощью оптического микроскопа. Для проведения анализа небольшое количество исследуемой воды помещали на предметное стекло. После этого пробу рассматривали под микроскопом при увеличении, позволяющем хорошо различать отдельные капли нефтепродуктов. Размер капель определяли по диаметру, используя масштаб изображения. Для каждой исследуемой пробы отмечали диапазон размеров капель, которые встречались наиболее часто.

Результаты и обсуждение

В первой серии экспериментов оценивали эффективность работы волокнистого полимерного сепаратора. Исходную воду подавали непосредственно на сепаратор, после чего определяли концентрацию нефтепродуктов в пробах до и после прохождения фильтрующего материала. Продолжительность каждого цикла фильтрации составляла 5 мин. Полученные значения концентрации нефтепродуктов и рассчитанная по ним эффективность очистки представлены в таблице 1.

Таблица 1
Результаты очистки воды при работе волокнистого полимерного сепаратора.

Опыт	До сепаратора, мг/л	После сепаратора, мг/л	Эффективность, %
1	108	7	93,52
2	17	3	82,35
3	12	2	83,33
4	50	3	94,00
5	34	5	85,29
Среднее	**44.20**	**4.00**	**87,70**

При подаче исходной воды на сепаратор средняя концентрация нефтепродуктов перед фильтрующим элементом составила 44,2 мг/л, после сепарации — 4,0 мг/л. Средняя индивидуальная эффективность очистки составила 87,70 %. Наименьшее значение эффективности наблюдалось в опыте с исходной концентрацией 17 мг/л и составило 82,35 %, максимальное — 94,00 % при исходной концентрации 50 мг/л.

На втором этапе работы оценивали эффективность волокнистого полимерного сепаратора при его использовании после предварительной напорной флотации. В этом случае на фильтрующий материал поступала уже частично очищенная вода, из которой на стадии флотации удалялась часть нефтепродуктов.Для каждой исследуемой пробы последовательно определяли содержание нефтепродуктов в исходной воде, после напорной флотации и после прохождения воды через волокнистый сепаратор. Такая последовательность измерений дала возможность рассмотреть работу каждой стадии отдельно и определить общий эффект их совместного применения.

По полученным значениям рассчитывали эффективность очистки на стадии флотации, эффективность последующей сепарации, а также суммарное снижение концентрации нефтепродуктов относительно исходной воды. Результаты проведённых испытаний приведены в таблице 2.

По результатам пяти проведённых опытов среднее содержание нефтепродуктов в воде после напорной флотации составило 12,4 мг/л. Для исходной воды это значение в среднем составляло 45,2 мг/л. Таким образом, уже на стадии флотации удалялось около 71,77 % нефтепродуктов. После прохождения предварительно обработанной воды через волокнистый полимерный сепаратор концентрация загрязнений дополнительно уменьшалась и в среднем составляла 2,8 мг/л. Общая эффективность последовательной схемы «флотация — сепарация» достигла 93,53 %.

Таблица 2
Результаты последовательной напорной флотации и полимерной сепарации.

Опыт	До флотации, мг/л	После флотации, мг/л	После сепаратора, мг/л	Эффективность, %
1	55	10	2	96.36
2	30	9	2	93.33
3	42	17	5	88.10
4	49	12	3	93.88
5	50	14	2	96.00
Среднее				**93.53**

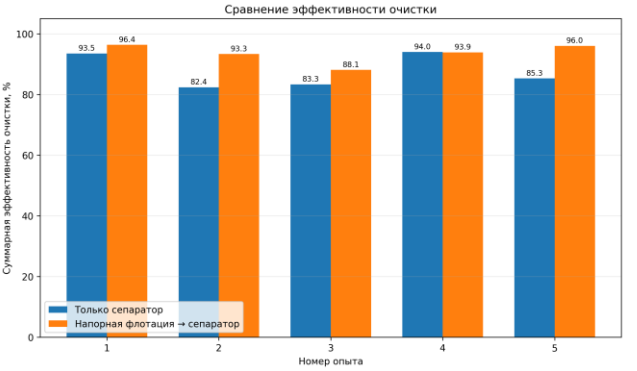


Рисунок 2 — Сравнение суммарной эффективности очистки.

Предварительная флотационная обработка существенно изменяла условия работы последующей ступени. Средняя концентрация нефтепродуктов в воде, поступавшей на сепаратор после флотации, составляла 12,4 мг/л вместо 44,2 мг/л при непосредственной подаче исходной воды. Соответственно, нефтяная нагрузка на волокнистый материал уменьшалась примерно на 71,95 %.

Полученные значения показывают, что более низкая эффективность сепаратора в комбинированной схеме сама по себе не свидетельствует о худшем результате очистки. В данном случае перед сепаратором уже была удалена значительная часть нефтепродуктов. Поэтому его функция фактически заключалась в доочистке воды с существенно меньшей концентрацией загрязнений. В результате последовательное применение двух методов обеспечило более высокую итоговую степень очистки — 93,53 % по сравнению с результатом одноступенчатой сепарации.

Таким образом, одним из основных эффектов предварительной флотации является уменьшение загрязняющей нагрузки на волокнистый полимерный сепаратор. Напорная флотация обеспечивает удаление большей части нефтепродуктов, тогда как сепаратор используется на последующей стадии для удаления остаточных загрязнений. Вместе с тем приведённых результатов недостаточно для утверждения об увеличении фактического срока службы фильтрующего материала. Для такой оценки необходимы дополнительные длительные испытания с регистрацией перепада давления в процессе работы и определением момента достижения установленного предельного значения. Сопоставление времени работы сепаратора при прямой фильтрации и после предварительной флотации позволит количественно оценить влияние двухступенчатой схемы на его эксплуатационный ресурс.

Для более полной характеристики результатов очистки дополнительно оценивали дисперсность нефтяной фазы в воде, прошедшей различные варианты обработки. Размер оставшихся в воде капель нефтепродуктов определяли с помощью оптического микроскопа. Полученные данные сравнивали для двух схем: при подаче исходной воды непосредственно на волокнистый сепаратор и при предварительной обработке воды методом напорной флотации с последующим сепарированием.

Такое сравнение позволяет проследить изменение не только содержания нефтепродуктов в воде, но и характера их распределения по размерам после очистки. Результаты микроскопического определения размеров капель сопоставляли со средней концентрацией нефтепродуктов в воде после сепаратора. Полученные значения представлены в таблице 3.

Результаты микроскопического исследования показали различия в дисперсном составе воды после двух вариантов очистки. При работе волокнистого полимерного сепаратора без предварительной обработки размер основной части наблюдаемых капель нефтепродуктов находился в пределах 15–20 мкм. При включении напорной флотации перед сепаратором размер капель в очищенной воде был ниже и преимущественно составлял 5–10 мкм.

Таблица 3
Дисперсный состав нефтяной фазы после различных схем очистки.

Схема очистки	Преобладающий размер капель после очистки, мкм	Средняя концентрация после сепаратора, мг/л
Волокнистый полимерный сепаратор	15–20	4,0
Комбинированная схема	5–10	2,8

Полученное изменение дисперсного состава показывает, что комбинированная схема обеспечивает иной характер остаточной нефтяной фазы. При этом снижение размера оставшихся капель не следует трактовать как однозначное повышение эффективности флотации или сепаратора: мелкодисперсная фаза, напротив, характеризуется более сложными условиями отделения. Поэтому дисперсный состав целесообразно рассматривать совместно с остаточной концентрацией нефтепродуктов и гидравлическими характеристиками сепаратора.

Обсуждение

Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что включение напорной флотации перед полимерным сепаратором приводит к изменению исходной нагрузки на последующую ступень очистки. Средняя концентрация нефтепродуктов, поступающая на сепаратор после флотации, уменьшилась на 71,95 %. При этом средняя концентрация нефтепродуктов в очищенной воде снизилась с 4,0 до 2,8 мг/л, а средняя суммарная эффективность очистки составила 93,53 %. Подобная последовательность процессов, при которой флотация применяется для предварительного удаления нефтяных загрязнений, а затем осуществляется фильтрация, рассматривается также в работах, посвящённых очистке различных видов нефтесодержащих сточных вод.

Выводы

Предварительная напорная флотация заметно снизила содержание нефтепродуктов в воде, поступавшей на последующую ступень сепарации. Если до флотационной обработки средняя концентрация составляла 44,2 мг/л, то после неё она уменьшилась до 12,4 мг/л. Таким образом, на волокнистый полимерный сепаратор поступало примерно на 71,95 % меньше нефтепродуктов по сравнению с исходной водой.

При подаче воды непосредственно на волокнистый полимерный сепаратор средняя эффективность удаления нефтепродуктов составила 87,70 %. Включение предварительной флотации в технологическую схему повысило суммарную степень очистки до 93,53 %. Это показывает, что разделение процессов на две последовательные ступени позволяет снизить нагрузку на волокнистый материал и повысить общий эффект очистки.

Различия наблюдались и в качестве воды после заключительной ступени. При использовании одной только сепарации средняя остаточная концентрация нефтепродуктов составляла 4,0 мг/л. После предварительной флотации этот показатель снизился до 2,8 мг/л. Следовательно, дополнительная флотационная ступень обеспечивала более низкое содержание нефтепродуктов в воде, поступающей на выходе из всей системы.

По результатам микроскопического анализа изменялся также размер остаточных нефтяных капель. В пробах после работы одного волокнистого сепаратора в основном фиксировались капли порядка 15–20 мкм. При последовательной обработке «напорная флотация — волокнистый сепаратор» преобладающий размер капель был меньше и находился преимущественно в диапазоне 5–10 мкм. Полученные наблюдения указывают на отличие дисперсного состава остаточного загрязнения при двух исследованных вариантах очистки.

Таким образом, предварительная флотация обеспечивает заметное снижение концентрации нефтепродуктов перед подачей сточной воды на волокнистый сепаратор и уменьшает загрязняющую нагрузку на его фильтрующий материал. При этом по результатам проведённых опытов нельзя непосредственно сделать вывод об увеличении срока службы сепаратора. Для подтверждения такого эффекта требуется проведение серии повторяющихся циклов фильтрации и регенерации с сопоставлением результатов при одинаковом предельном перепаде давления.

Литература

1. Корнеева Е. А., Авсюкевич А. П., Летенко Д. Г. Волокнистый фильтр и эффективность его использования при фильтрации сточных вод // Вестник гражданских инженеров. 2024. № 4 (105). С. 70–79. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-4-70-79.
2. Корнеева, Е. А. Применение фильтра из полимерных материалов при очистке нефтесодержащих сточных вод / Е. А. Корнеева, А. П. Авсюкевич, А. В. Утин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 7(799). – С. 107-115. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-799-7-107-115. – EDN UNHRLS.
3. Бусарев А. В., Селюгин А. С., Лисенков Р. А. Очистка нефтесодержащих сточных вод предприятий железнодорожного транспорта методом напорной флотации // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 2 (56). С. 76–83. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_76.
4. Al-Shamrani A. A., James A., Xiao H. Separation of oil from water by dissolved air flotation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002. Vol. 209, No. 1. P. 15–26. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00208-X.
5. Vaughan R. L., Reed B. E., Roark G. W., Masciola D. A. Pilot-Scale Investigation of Chemical Addition-Dissolved Air Flotation for the Treatment of an Oily Wastewater // Environmental Engineering Science. 2000. Vol. 17, No. 5. P. 267–277. DOI: 10.1089/ees.2000.17.267.
6. Hanafy M. I., Nabih H. I. Treatment of Oily Wastewater Using Dissolved Air Flotation Technique // Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects. 2007. Vol. 29, No. 2. P. 143–159. DOI: 10.1080/009083190948711.
7. Painmanakul P., Sastaravet P., Lersjintanakarn S., Khaodhiar S. Effect of bubble hydrodynamic and chemical dosage on treatment of oily wastewater by Induced Air Flotation (IAF) process // Chemical Engineering Research and Design. 2010. Vol. 88, No. 5–6. P. 693–702. DOI: 10.1016/j.cherd.2009.10.009.
8. Qi W. K., Yu Z. C., Liu Y. Y., Li Y. Y. Removal of emulsion oil from oilfield ASP wastewater by internal circulation flotation and kinetic models // Chemical Engineering Science. 2013. Vol. 91. P. 122–129. DOI: 10.1016/j.ces.2013.01.020.
9. S., Bhattacharya S., Sen D., Bhattacharjee C. A review on the application of different treatment processes for emulsified oily wastewater // International Journal of Environmental Science and Technology. 2019. Vol. 16, No. 5. P. 2525–2536. DOI: 10.1007/s13762-018-2055-6.
10. Singh C. J., Mukhopadhyay S., Rengasamy R. S. Fibrous coalescence filtration in treating oily wastewater: A review // Journal of Industrial Textiles. 2022. Vol. 51, No. 3S. P. 3648S–3682S. DOI: 10.1177/15280837211040863.
11. Tomczak W., Gryta M. Application of Capillary Polypropylene Membranes for Microfiltration of Oily Wastewaters: Experiments and Modeling // Fibers. 2021. Vol. 9, No. 6. Article 35. DOI: 10.3390/fib9060035.
12. Gruzinova V., Romanovski V. Optimizing Oil-Contaminated Wastewater Purification with Polypropylene Thread Waste // Waste and Biomass Valorization. 2025. Vol. 16. P. 2521–2533. DOI: 10.1007/s12649-024-02806-8.
13. Shen W., Mukherjee D., Koirala N., Hu G., Lee K., Zhao M., Li J. Microbubble and nanobubble-based gas flotation for oily wastewater treatment: a review // Environmental Reviews. 2022. Vol. 30, No. 3. P. 359–379. DOI: 10.1139/er-2021-0127.

Effect of preliminary pressure flotation on the operation of a fibrous polymer separator for wastewater treatment

Korneeva E.A.
St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,

JEL classification: C10, C50, C60, C61, C80, C87, C90

The paper presents the results of an experimental comparison of two technological approaches to the treatment of oil-containing wastewater: direct filtration using a polymeric fiber separator and the application of preliminary pressure flotation followed by polymeric separation. It was established that the inclusion of a pressure flotation stage significantly reduces the oil load on the subsequent filtering element and improves the overall treatment efficiency. To further assess the characteristics of oil-phase separation, the dispersed-phase composition was investigated using optical microscopy. The results indicate a change in the size distribution of the predominant oil droplets when the combined treatment scheme is applied. The findings demonstrate the potential of combining preliminary pressure flotation with subsequent separation and may provide a basis for further investigation of the hydraulic characteristics of the filter during operation, as well as for assessing the duration of its operating cycle.

Keywords: oily wastewater, motor transport enterprises, pressure flotation, fibrous polymer separator, treatment efficiency, hydraulic resistance, dispersion, petroleum products.

The article is published based on the results of the 2026 grant implementation by the Research and Development Department of SPbGASU.

References

1. Korneeva E. A., Avsyukevich A. P., Letenko D. G. Fibrous filter and the efficiency of its use in wastewater filtration // Bulletin of Civil Engineers. 2024. No. 4 (105). pp. 70–79. DOI: 10.23968/1999-5571-2024-21-4-70-79.
2. Korneeva E. A., Avsyukevich A. P., Utin A. V. Application of a polymer-based filter for the treatment of oily wastewater // News of Higher Educational Institutions. Construction. 2025. No. 7 (799). pp. 107–115. DOI: 10.32683/0536-1052-2025-799-7-107-115. EDN UNHRLS.
3. Busarev A. V., Selyugin A. S., Lisenkov R. A. Treatment of oily wastewater from railway transport facilities using pressure flotation // News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2021. No. 2 (56). pp. 76–83. DOI: 10.52409/20731523_2021_2_76.
4. Al-Shamrani A. A., James A., Xiao H. Separation of oil from water by dissolved air flotation // Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 2002. Vol. 209, No. 1. P. 15–26. DOI: 10.1016/S0927-7757(02)00208-X.
5. Vaughan R. L., Reed B. E., Roark G. W., Masciola D. A. Pilot-Scale Investigation of Chemical Addition-Dissolved Air Flotation for the Treatment of an Oily Wastewater // Environmental Engineering Science. 2000. Vol. 17, No. 5. P. 267–277. DOI: 10.1089/ees.2000.17.267.