

ВОДОСНАБЖЕНИЕ, КАНАЛИЗАЦИЯ, СТРОИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ОХРАНЫ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ

УДК 628.543

DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

*Е.В. ВОРОБЬЕВА,
Рязанский институт (филиал)
Московского политехнического университета*

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЛОИДНЫХ СВОЙСТВ НЕФТЕЗАГРЯЗНЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД И РАЗРАБОТКА СПОСОБОВ ИХ ОЧИСТКИ

Аннотация. Нефтеперерабатывающие и другие промышленные предприятия города образуют большое количество сточных вод, загрязненных нефтепродуктами. Прежде чем сбросить в водоем подобные стоки, необходимо провести их очистку. Анализ публикаций по данной теме показал, что используемые методы очистки часто не снижают количество нефтепродуктов до значений ПДК. Это объясняется особенностью данных стоков. Они представляют собой микрогетерогенные системы, характеризующиеся переменным составом и высокой стабильностью. Исследование факторов, влияющих на высокую агрегативную устойчивость стоков, а также оптимизация применяемых методов очистки от указанных примесей весьма актуальны.

В ходе исследования были изучены свойства многокомпонентных эмульсионных систем, факторов, влияющих на их высокую агрегативную устойчивость, а также разработаны теоретические основы оптимизации очистки сточных вод от указанных примесей.

Исследовались системы, моделирующие промышленные стоки по основному химическому составу, полученные диспергационным методом. Также проводились исследования кинетики извлечения нефтепродуктов, изучение зависимости устойчивости эмульсий от ряда параметров технологического режима очистки воды в условиях интенсивного перемешивания эмульсии воздухом.

Использовался экспресс-метод определения содержания нефтепродуктов в эмульсиях. Результаты зависимости оптической плотности (D) от содержания нефтепродуктов подверглись регрессионному анализу.

В ходе работы установлено, что удаление частиц диаметром более 10^{-6} мкм продолжается в течение 20 мин, что соответствует этапу быстрой коагуляции. Устойчивость образцов «условно чистых» эмульсий уменьшалась примерно в 10 раз при увеличении скорости барботажа до 30 л/ч. При использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было достаточно скорости барботажа 10 л/ч.

Ключевые слова: сточные воды, пневмосепарация, устойчивость эмульсий, нефтесодержащие стоки, коагуляция, агрегативная устойчивость, гидродинамический режим

Для цитирования: Воробьева Е.В. Исследование коллоидных свойств нефтезагрязненных сточных вод и разработка способов их очистки // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 4. С. 165–176.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

*E.V. VOROBYEVA,
Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University*

COLLOIDAL PROPERTIES OF OIL-CONTAMINATED SEWAGE AND ITS TREATMENT

Abstract. Oil refineries and other industrial enterprises generate a large amount of sewage contaminated with petroleum products. Sewage must be treated before it can be discharged into a water body. Sewage treatment methods often do not allow reducing the content of petroleum products to the maximum allowable values. This is because sewage is a microheterogeneous system characterized by variable composition and high stability. It is thus important to study factors affecting the high aggregate stability of sewage as well as the development of theoretical foundations for optimizing sewage treatment.

The paper presents the study of properties of multicomponent colloidal emulsion systems, factors affecting their high aggregative stability and develops theoretical foundations for optimizing sewage treatment. The systems simulating industrial effluents according to the basic chemical composition obtained by the dispersion method are studied herein. Research also includes the kinetics of precipitation of petroleum products from sewage, sewage treatment parameters during the intensive mixing of the emulsion with air.

The express-method determination is used for the petroleum product content in emulsions. The regression analysis is used for the dependence of the optical density on the content of petroleum products. It is found that 10–6 μm particle removal continues for 20 min, which corresponds to the rapid coagulation. The stability of clean-contaminated emulsions decreases by about 10 times with increasing barbotage speed to 30 l/h. The latter being 10 l/h, is sufficient when using $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Keywords: sewage, air separation, emulsion stability, oil-contaminated sewage, coagulation, aggregative stability, hydrodynamic conditions

For citation: Vorob'eva E.V. Issledovanie kolloidnykh svoystv neftezagryaznennykh stochnykh vod i razrabotka sposobov ikh ochistki [Colloidal properties of oil-contaminated sewage and its treatment]. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2022. V. 24. No. 4. Pp. 165–176.
DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-4-165-176

Одна из проблем защиты окружающей природной среды – это охрана поверхностных вод от загрязнений промышленными сточными водами. Нефтеперерабатывающие и другие промышленные предприятия города образуют большие количества сточных вод, загрязненных нефтепродуктами. Сброс недостаточно очищенных стоков ведет к увеличению концентраций отдельных токсичных компонентов, повышению фоновых значений органических веществ, ухудшению санитарно-гигиенического состояния водного бассейна. Все это является причиной ухудшения экологической обстановки.

Негативное воздействие оказывают промышленные стоки нефтеперерабатывающих предприятий. Они содержат микрогетерогенные системы, харак-

теризующиеся переменным составом, обуславливающим различные физические и химические свойства [1–3]. Состав обусловлен производимыми товарами. Это автомобильное, дизельное, котельное топливо и смазочные материалы, а также антидетонационные присадки. Прежде чем вернуть подобные стоки в замкнутый технологический цикл или сбросить в водоем, необходимо провести их очистку.

Анализ публикаций по данной теме показал, что используемые методы очистки не позволяют добиться значений ПДК, кроме того, станции очистки занимают огромные территории, дорогостоящи и требуют обслуживания. Нефтепродукты в воде находятся в грубодисперсном состоянии и по причине меньшей плотности легко выделяются на поверхности в виде пленки [4–8]. Часть нефтепродуктов находится в тонкодисперсном состоянии, образуя эмульсию «нефтепродукт в воде», в которой дисперсная фаза представлена нефтепродуктами, а дисперсионная среда – водой.

Данные коллоидные системы образуются на всех стадиях переработки нефти, ее разогреве, перекачке насосами, а также при промыве оборудования, влажной уборке производственных территорий и сбросе в канализацию. Они характеризуются высокой устойчивостью благодаря кинетическим свойствам, небольшой концентрации и поверхностному натяжению. Механические примеси, ионы, содержащиеся в воде, покрывают капельки нефти, стабилизируя эмульсии [9, 10].

Для уменьшения содержания нефтепродуктов в стоках необходимо удалить загрязнения, находящиеся в грубодисперсном и эмульсионном состоянии, провести доочистку от высокодисперсных растворимых составляющих. Данные, полученные в ходе изучения литературы по данному направлению и лабораторных журналов станций очистки предприятий, позволили выявить недостатки применяемых методов очистки [9–12]. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Недостатки существующих методов очистки сточных вод
от нефтепродуктов**

Метод очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, до очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, после очистки	Недостатки
Многоярусная нефтеловушка	24 000	186	Невозможность очистки от эмульсионных нефтепродуктов
Гидроциклон	1000	60	Недостаточная степень очистки
Зернистый фильтр	80	20	Необходимость периодической смены фильтровального материала

Окончание табл. 1

Метод очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, до очистки	Ориентировочная концентрация нефтепродуктов в воде, мг/л, после очистки	Недостатки
Пенополиуретановый фильтр	150	10	Необходимость периодической смены фильтровального материала
Напорный флотатор	150	30	Недостаточная степень очистки
Импеллерный флотатор	150	25	Невозможность использования коагулянта, недостаточная степень очистки
Электрофлотатор	50 000	500	Применим для небольших расходов сточных вод с высоким содержанием
Электрокоагуляция	300	3	Большой расход электроэнергии
Виброакустическое воздействие	400	1	Сложность реализации
Адсорбция: сорбент МИУ + активированный уголь	5	0,15	Недостаточная степень очистки
Адсорбция: шунгитовая порода	1–5	0,05	Снижение pH, невозможность удаления аммонийного азота, сульфидов
Озонирование	12–15	6–8 – I степень 2–3 – II степень	Недостаточная степень очистки
Аэротенк	10	1,5	Недостаточная степень очистки
Обратный осмос	0,5	0,05	Введение предварительной очистки от взвешенных веществ, стадии ультрафильтрации

Для безопасного сброса в водоем стоков концентрация нефтепродуктов должна быть $\leq 0,05$ мг/л. Применяемые в настоящее время технологии в большинстве случаев не могут достичь требуемых показателей, поэтому

разработка дополнительных методов доочистки промышленных стоков весьма актуальна.

Целью настоящих исследований являлось изучение свойств многокомпонентных систем эмульсионного типа, факторов, влияющих на их высокую агрегативную устойчивость, а также разработка теоретических основ оптимизации очистки сточных вод от указанных примесей.

Для этого необходимо было решить следующие задачи:

- 1) усовершенствовать методики создания водных эмульсий различных нефтепродуктов типа М/В («масло – вода») и модели промышленных стоков;
- 2) определить устойчивость эмульсий в зависимости от pH водной среды и от присутствия электролитов в качестве коагулянтов;
- 3) изучить кинетику и механизм коагуляции эмульсий в различных условиях.

Были исследованы «условно чистые» эмульсии, содержащие различные нефтепродукты: масла, мазут и бензин, их характерной особенностью являлось отсутствие электролитов, растворенных в воде [9–12].

Также в лаборатории исследовались модели промышленных стоков по основному химическому составу, называемые в дальнейшем «модельными» эмульсиями. Для их приготовления брались различные образцы нефтепродуктов, растворы солей аммония. Все это подвергалось диспергированию, также добавлением соответствующих растворов (гидроксид кальция) достигалось $\text{pH} \approx 8$.

Для достижения устойчивости системы «масло – вода» необходимо измельчить дисперсную фазу, чтобы диаметр частиц был 0,1–10,0 мкм. Поэтому условием получения эмульсий было диспергирование нефтепродукта в воде. В результате получалась эмульсия, способная не расслаиваться и сохранять концентрацию примесей на протяжении трех дней.

Количественная характеристика степени очистки определялась следующим образом:

$$\alpha = \frac{C_0 - C}{C_0},$$

где C_0 – концентрация нефтепродуктов в начале опыта; C – концентрация нефтепродуктов по окончании опыта.

Устойчивость эмульсии Y определяли по формуле

$$Y = 1 - \alpha.$$

Для устойчивых образцов эмульсий характерно: $\alpha = 0$ и $Y = 1$.

В ходе эксперимента был сделан вывод, что при условии, когда $Y > 0,96$, эмульсия устойчива.

Установлено, что для образования устойчивых эмульсий необходима скорость вращения пропеллерной мешалки $v_{\text{меш}} \geq 2000$ об/мин, а время перемешивания ≈ 1 ч.

Содержание нефтепродуктов в модельных эмульсиях оценивалось по их оптической плотности (D) фотоэлектроколориметрическим методом. Использовался экспресс-метод анализа содержания нефтепродуктов в эмульсиях, позволяющий отказаться от предварительной экстракции четыреххлористым уг-

леродом. Для анализа брался «Судан-3», способный экстрагироваться дисперсными частицами. Результаты зависимости оптической плотности (D) от содержания нефтепродуктов подверглись регрессионному анализу [13–16]. В результате было установлено, что наиболее приемлемой является линейная функция в широком диапазоне концентраций нефтепродуктов $C_{н-п}$:

$$D = a + b C_{н-п}.$$

В случае $C_{н-п} > 50$ мг/л возрастает ошибка исследований. Рекомендуется довести эмульсию до $C_{н-п} < 50$ мг/л и учесть коэффициент разбавления при расчете.

Далее проводились исследования кинетики осаждения нефтепродуктов из сточных вод, заключающиеся в измерении обводненности, расхода эмульсии, плотности воды и нефти. Для этого исследуемый образец помещался в химический мерный стакан, фиксировалась длительность осаждения и измерялась толщина образовавшегося нефтяного слоя. Измерения проводили каждые 0,5–1 мин и далее каждые 10 мин.

Была получена зависимость скорости всплытия нефти от диаметра частиц и уравнение $u = 0,0493e^{-0,025d}$ с коэффициентом корреляции $R^2 = 0,8349$.

Полученные данные позволили сделать вывод, что удаление частиц диаметром более 10^{-6} мкм продолжается в течение 20 мин, что соответствует этапу быстрой коагуляции (рис. 1).

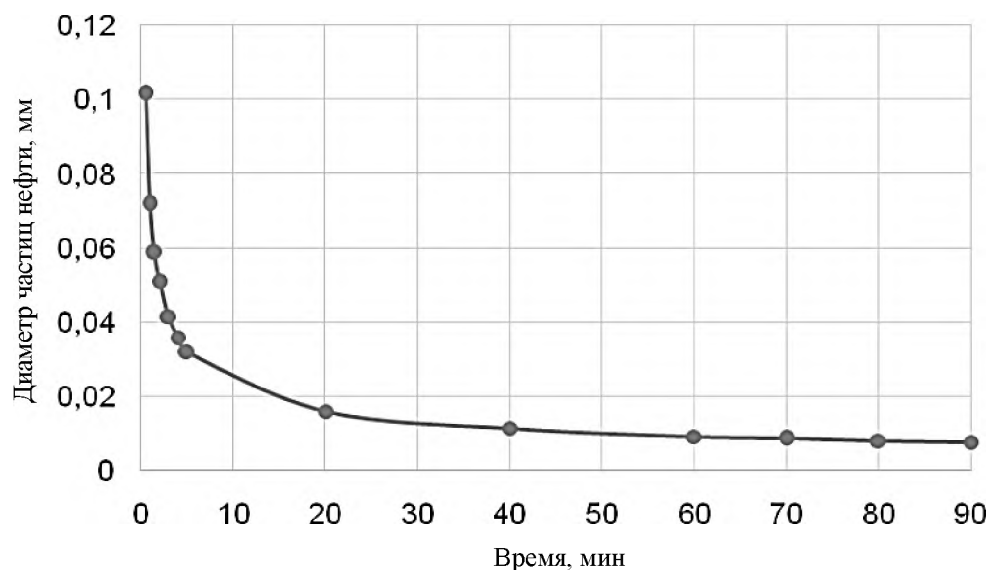


Рис. 1. Зависимость величины частиц нефти от времени их осаждения

Следующим этапом исследований было изучение зависимости устойчивости эмульсий от ряда параметров технологического режима очистки воды в условиях интенсивного перемешивания эмульсии воздухом (барботажа) с размерами пузырьков 1–2 мм при скорости потока газа 10–50 л/ч. Для ис-

следования брались «условно чистые» и многокомпонентные эмульсии, моделирующие промышленные стоки («модельные»).

Определялась устойчивость Y образцов «условно чистых» и «модельных» эмульсий и величин $t_{\text{макс}}$ при различных скоростях барботажа и наличии $\text{Ca}(\text{OH})_2$, варьировалась реакция среды от 3 до 10. Для изменения электропроводности добавляли раствор NaCl с концентрацией 0,1н. Результаты представлены в табл. 2 и на рис. 2.

Таблица 2

**Зависимость Y от объемной скорости потока газа
при различных значениях pH без добавления $\text{Ca}(\text{OH})_2$
и при его присутствии**

Эмульсия	Скорость потока газа, л/ч	pH = 3	pH = 4	pH = 7	pH = 9	pH = 10
«Условно чистая» Y , время, мин	10	0,15; 90	0,17; 90	0,75; 120	0,22; 100	0,20; 100
	30	0,10; 75	0,12; 75	0,75; 90	0,16; 90	0,13; 90
	50	0,10; 45	0,12; 45	0,65; 75	0,16; 60	0,13; 60
«Модельная» Y , время, мин	10	0,40; 90	0,55; 90	0,90; 120	0,42; 120	0,40; 120
	30	0,36; 75	0,50; 75	0,84; 100	0,38; 90	0,35; 90
	50	0,34; 60	0,46; 60	0,90; 90	0,36; 75	0,33; 75
«Условно чистая» + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Y , время, мин	10	0,10; 90	0,11; 90	0,20; 120	0,16; 100	0,13; 100
	30	0,05; 75	0,06; 75	0,11; 90	0,09; 90	0,08; 90
	50	0,05; 45	0,06; 45	0,11; 75	0,10; 60	0,08; 60
«Модельная» + $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Y , время, мин	10	0,20; 90	0,22; 90	0,58; 120	0,28; 120	0,25; 120
	30	0,16; 75	0,20; 75	0,50; 100	0,20; 90	0,18; 90
	50	0,16; 60	0,20; 60	0,49; 90	0,20; 75	0,18; 75

Анализ полученных результатов позволил сделать следующие выводы:

– устойчивость образцов «условно чистых» эмульсий уменьшалась примерно в 10 раз при увеличении скорости барботажа до 30 л/ч. При использовании $\text{Ca}(\text{OH})_2$ было достаточно скорости барботажа 10 л/ч;

– более высокая устойчивость «модельных» эмульсий объясняется наличием в стоках примесей ПАВ и пылевидной фракции пустой породы, являющихся стабилизаторами коллоидной структуры;

– в процессе исследований было замечено, что значения водородного показателя отличаются от тех, которые должны быть при добавлении данных количеств щелочей и кислот (табл. 3 и 4).

Данное явление связано с адсорбцией на поверхности дисперсной фазы ионов H_3O^+ в кислой области pH или ионов OH^- в щелочной области в процессе образования эмульсий. После очистки от нефтепродукта значение реакции

среды становится прежним. Ближе к значениям нейтральной среды устойчивость эмульсий возрастает.

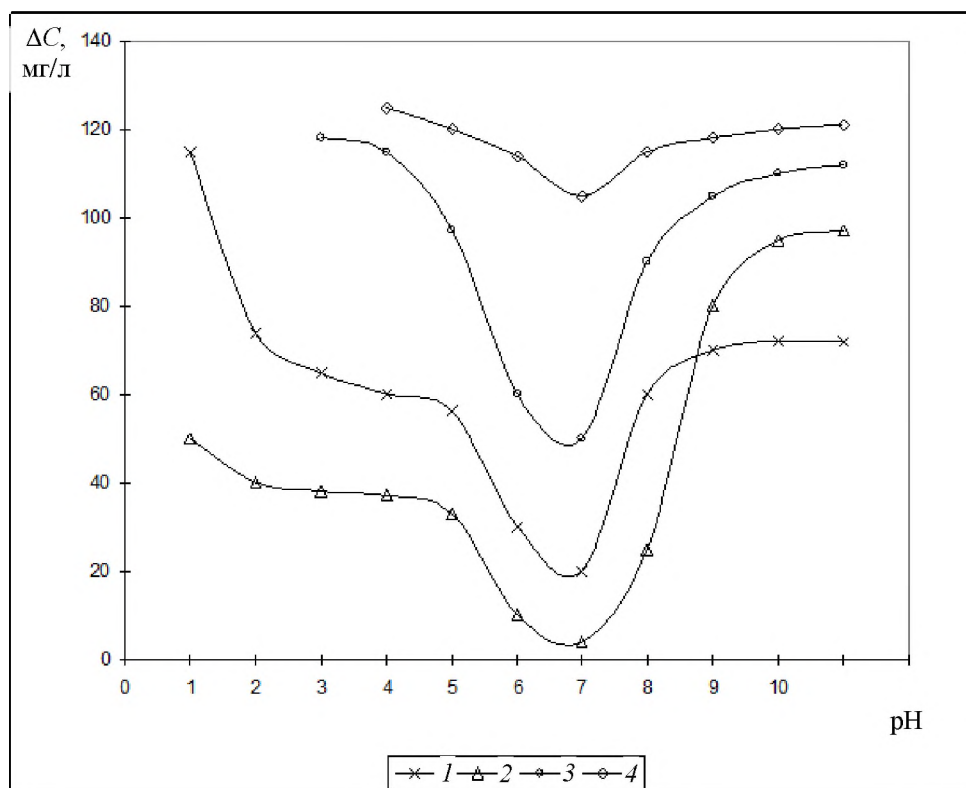


Рис. 2. Зависимость изменения содержания нефтепродуктов от значений pH:
1 и 2 — «модельные» без и в присутствии 0,1 ммоль/л $\text{Ca}(\text{OH})_2$; 3 и 4 — «условно чистые» без и в присутствии $\text{Ca}(\text{OH})_2$

Таблица 3

Изменение pH во времени, $C_{\text{н-п}} = 100$ мг/л

№ п/п	t, ч	pH = 3	pH = 3,7	pH = 4,2	pH = 4,7	pH = 8,2	pH = 9,2	pH = 9,6	pH = 10
pH (ср.)	0	3,412	3,764	4,160	4,599	8,220	8,823	9,349	9,532
	1	3,233	3,607	4,073	4,516	8,342	8,970	9,442	9,757
	2	3,00	3,50	4,00	4,50	8,50	9,00	9,50	10,00
δ_n	0	0,013	0,058	0,015	0,013	0,021	0,022	0,028	0,037
	1	0,034	0,014	0,053	0,021	0,046	0,069	0,048	0,063
	2	0	0	0	0	0	0	0	0

Таблица 4

Изменение pH во времени, $C_{н-п} = 130$ мг/л

№ п/п	t, ч	pH = 3	pH = 3,7	pH = 4,2	pH = 4,7	pH = 8,2	pH = 9,2	pH = 9,6	pH = 10
pH (ср.)	0	3,528	4,020	4,265	4,709	8,080	8,731	9,200	9,276
	1	3,255	3,710	4,145	4,560	8,302	8,970	9,310	9,470
	2	3,010	3,50	4,020	4,50	8,50	9,00	9,440	9,800
δ_n	0	0,127	0,040	0,032	0,014	0,071	0,019	0,063	0,021
	1	0,090	0,066	0,055	0,049	0,045	0,064	0,070	0,064
	2	0,030	0	0,040	0	0	0	0,120	0,100

Проведенные исследования позволяют сделать вывод, что адсорбция ионов H_3O^+ и OH^- стабилизирует эмульсии. Наряду с этим, устойчивость возрастает за счет ионов электролитов, проявляются гидрофильные свойства.

Следовательно, первым шагом в очистке нефтесодержащих стоков должно быть разрушение агрегативно устойчивых структур. Рекомендуется использовать активный гидродинамический режим, позволяющий сообщить энергию, необходимую для разрыва адсорбционных пленок, слияния капель нефтепродукта и их извлечения. При этом нужно учесть, что неприемлемо использование механических перемешивающих устройств, приводящих к дроблению капель нефтепродуктов и, как следствие, увеличению устойчивости эмульсии.

В качестве интенсификатора данного процесса можно использовать препараты на основе естественных природных соединений, например солей гуминовых кислот – гуматов, которые, обладая химической гетерогенностью и полидисперсностью, вступают в физико-химические взаимодействия с нефтепродуктами, влияя тем самым на эффективность очистных процессов.

Степень очистки стоков зависит от водородного показателя среды загрязненной воды. Это имеет большое значение, т. к. позволяет обеспечить удовлетворительную работу активного ила на этапе биологической очистки. Для эффективной биологической очистки требуется pH = 6,4–7,7, в щелочной среде снижается скорость обменных процессов активного ила.

Дополнительно были проведены исследования изменения реакции среды тестовых эмульсий в присутствии гуминового препарата. Применяемые методы очистки позволили снизить содержание нефтепродукта, а добавление гуматов привело к снижению значений pH до 7,5, что приемлемо для биологической очистки сточных вод.

Полученные в ходе исследования данные по кинетике удаления нефтепродуктов находятся в полном соответствии с теорией коагуляции жидкофазных коллоидных структур и характеризуются быстрым и медленным процессами. Этап быстрой фазы коагуляции длится примерно 20 мин, в результате удаляются частицы, характеризующиеся более крупным диаметром. Капли диа-

метром $\leq 10^{-6}$ мкм агрегативно устойчивы, им присуща меньшая кинетическая энергия, что снижает вероятность столкновений. В соответствии с этим время полного цикла их коагуляции составляет $\sim 1,5$ ч, но оптимальное время ~ 40 мин, далее проводить разделение экономически нецелесообразно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Домрачева В.А., Трусова В.В. Ресурсосберегающая технология очистки сточных вод от нефтепродуктов // Водочистка. 2015. № 5. С. 51–54.
2. Рубанов, Ю.К., Токач Ю.Е. Способ очистки сточных вод от эмульгированных нефтепродуктов // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18. № 6. С. 246–249.
3. Малышкина Е.С., Вялкова Е.И., Осипова Е.Ю. Использование природных сорбентов в процессе очистки воды от нефтепродуктов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21. № 1. С. 188–200.
4. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment // Journal of Membrane Science. 2018. V. 547. P. 51–63.
5. Yamuna S.V., Graham A.G. Application of low-mixing energy for the coagulation process // Water Res. 2015. 84. P. 333–341.
6. Yu W.Z., Gregory J., Campos, L., Li G.B. The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth // Chem. Eng. Journ. 2011. 171. P. 425–430.
7. Nguyen Trung Duc, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Van Khoi. Sorption Studies of Crude Oil on acetylated Sawdust // Journal of Science and Technology. 2016. 54 (2A). P. 201–206.
8. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the Effect of Particle Size on the Performance of Wood Based Adsorbent // Journal of Chemical Engineering & Process Technology. 2016. V. 7. P. 315.
9. Гальченко С.В., Чердакова А.С., Воробьева Е.В. Обоснование методики получения устойчивых эмульсий нефтепродуктов, содержащихся в сточных водах // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2 (2). С. 313–318.
10. Воробьева Е.В. Химико-технологические и практические аспекты реализации метода пневмосепарации для очистки нефтесодержащих сточных вод // Энергосбережение и водоподготовка. 2015. № 2. С. 71–75.
11. Чердакова А.С., Гальченко С.В., Воробьева Е.В. Результаты экспериментальной оценки влияния биопав на процессы микробиологической ремедиации нефтезагрязненных водных сред // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 1 (81). С. 74–83.
12. Гальченко С.В., Чердакова А.С., Спиридович Д.В. Результаты экспериментальной оценки влияния гуминовых препаратов на процессы диспергирования нефтепродуктов // Научное обозрение. 2015. № 1. С. 126–131.
13. Чердакова А.С., Гальченко С.В., Воробьева Е.В. Экспериментальная оценка влияния гуминовых препаратов на процессы микробиологической ремедиации почв, загрязненных нефтепродуктами // Экология и промышленность России. 2021. Т. 25. № 3. С. 30–35.
14. Лобанова М.С., Суджян К.М., Воробьева Е.В. Перспективы очистки сточных вод от нефтепродуктов сорбционным методом // Новые технологии в учебном процессе и производстве : материалы XVIII Международной научно-технической конференции. Рязань, 2020. С. 449–450.
15. Зубкова Е.В., Воробьева Е.В. Экологические аспекты использования установки тонкослойных модулей для доочистки сточных вод АО «РНПК» // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2019 : сб. трудов II Международного научно-технического форума. В 10 томах / под общ. ред. О.В. Миловзорова. Рязань, 2019. С. 97–100.
16. Chapman D.S., Gunn I.D., Pringle H.E., Siriwardena G.M., Taylor P., Thackeray S.J., Willby N.J., Carvalho L. Invasion of freshwater ecosystems is promoted by network connectivity to hotspots of human activity // Global Ecology and Biogeography, 2020. V. 29. P. 645–655.

REFERENCES

1. Domracheva V.A., Trusova V.V. Resursosberegayushchaya tekhnologiya ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov [Resource-saving wastewater treatment technology for oil products]. *Vodoочистка*. 2015. No. 5. Pp. 51–54. (rus)
2. Rubanov Yu.K., Tokach Yu.E. Sposob ochistki stochnykh vod ot ehmul'girovannykh nefteproduktov [Method of wastewater treatment of emulsified petroleum products]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta*. 2015. V. 18. No. 6. Pp. 246–249. (rus)
3. Malyshkina E.S., Vyalkova E.I., Osipova E.Y. Ispol'zovanie prirodnnykh sorbentov v processe ochistki vody ot nefteproduktov [Water purification with natural sorbents]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2019. V. 21. No. 1. Pp. 188–200. (rus)
4. Chen Z., Luo J., Hang X., Wan Y. Physicochemical characterization of tight nanofiltration membranes for dairy wastewater treatment. *Journal of Membrane Science*. 2018. V. 547. Pp. 51–63.
5. Yamuna S.V., Graham A.G. Application of low-mixing energy for the coagulation process. *Water Research*. 2015. V. 84. Pp. 333–341.
6. Yu W.Z., Gregory J., Campos, L., Li G.B. The role of mixing conditions on floc growth, breakage and re-growth. *Chemical Engineering Journal*. 2011. V. 171. Pp. 425–430.
7. Nguyen Trung Duc, Nguyen Thanh Tung, Nguyen Van Khoi. Sorption studies of crude oil on acetylated sawdust. *Journal of Science and Technology*. 2016. V. 54 (2A). Pp. 201–206.
8. Ikenyiri P.N., Ukpaka C.P. Overview on the effect of particle size on the performance of wood based adsorbent. *Journal of Chemical Engineering & Process Technology*. 2016. V. 7. P. 315.
9. Gal'chenko S.V., Cherdakova A.S., Vorobyeva E.V. Obosnovanie metodiki polucheniya ustojchivyykh ehmul'sij nefteproduktov, soderzhashchikhsya v stochnykh vodakh [Stable emulsion technology of petroleum products in wastewater]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk*. 2016. V. 18. No. 2 (2) Pp. 313–318. (rus)
10. Gal'chenko S.V., Vorobyeva E.V. Khimiko-tekhnologicheskie i prakticheskie aspekty realizacii metoda pnevmoseparacii dlya ochistki neftesoderzhashchikh stochnykh vod [Chemical-technological and practical aspects of air separation method implementation for oil-contaminated wastewater treatment]. *Ehnergoberezhenie i vodopodgotovka*. 2015. No. 2. Pp. 71–75. (rus)
11. Cherdakova A.S. Rezul'taty ehksperimental'noj ocenki vliyaniya biopav na processy mikrobiologicheskoy remediacii neftezagryaznennykh vodnykh sred [Experimental evaluation of the effect of bio-surfactants on microbiological remediation of oil-contaminated aqueous media]. *Voda i ehkologiya: problemy i resheniya*. 2020. No. 1 (81). Pp. 74–83. (rus)
12. Gal'chenko S.V., Cherdakova A.S., Spiridovich D.V. Rezul'taty ehksperimental'noj ocenki vliyaniya guminovykh preparatov na processy dispergirovaniya nefteproduktov [Experimental evaluation of the effect of humic products on petroleum product dispersion]. *Nauchnoe obozrenie*. 2015. No. 1. Pp. 126–131. (rus)
13. Cherdakova A.S., Gal'chenko S.V., Vorobyeva E.V. Ehksperimental'naya ocenka vliyaniya guminovykh preparatov na processy mikrobiologicheskoy remediacii pochv, zagryaznennykh nefteproduktami [Experimental evaluation of the effect of humic products on microbiological remediation of soils contaminated with petroleum products]. *Ehkologiya i promyshlennost' Rossii*. 2021. V. 25. No. 3. Pp. 30–35. (rus)
14. Lobanova M.S., Sudzhyan K.M., Vorobyeva E.V. Perspektivy ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov sorbcionnym me-todom [Prospects of wastewater treatment from oil products by the sorption method]. In: *Novye tekhnologii v uchebnom processe i proizvodstve. Materialy XVIII Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii (Proc. 18th Int. Sci. Conf. 'New Technologies in Learning and Production')*. Ryazan, 2020. Pp. 449–450. (rus)
15. Zubkova E.V., Vorobyeva E.V. Ehkologicheskie aspekty ispol'zovaniya ustanovki tonkoslojnykh modulej dlya doochistki stochnykh vod AO RNPK [Environmental aspects of using a thin-layer module unit for wastewater post-treatment]. In: *Sovremennye tekhnologii v nauke i obrazovanii. Sbornik trudov II mezhdunarodnogo nauchno-tekhnicheskogo foruma*

- (*Proc. 2nd Int. Sci. Forum 'Modern Technologies in Science and Education'*), in 10 vol., O.V. Milovzorov, Ed. Ryazan, 2019. Pp. 97–100. (rus)
16. *Chapman, D.S., Gunn I.D., Pringle H.E., Siriwardena G.M., Taylor P., Thackeray S.J., Willby N.J., Carvalho L.* Invasion of freshwater ecosystems is promoted by network connectivity to hotspots of human activity. *Global Ecology and Biogeography*. 2020. V. 29. Pp. 645–655.

Сведения об авторе

Воробьева Елена Владимировна, канд. техн. наук, доцент, Рязанский институт (филиал) Московского политехнического университета, 390000, Россия, г. Рязань, ул. Право-Лыбедская, 26/53, vorobeva-70@bk.ru

Author Details

Elena V. Vorobyeva, PhD, A/Professor, Ryazan Institute (Branch) of Moscow Polytechnic University, 26/53, Pravo-Lybedskaya Str., Ryazan, 390000, Russia, vorobeva-70@bk.ru