

## Повышение эффективности биологической очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод

© 2023. М. Ю. Дягелев, к. т. н., доцент,  
Ижевский государственный технический университет  
имени М. Т. Калашникова,  
426069, Россия, г. Ижевск, ул. Студенческая, д. 7,  
e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

В статье представлены результаты исследований очистки промышленных стоков в составе городских сточных вод. В качестве метода повышения эффективности биологической очистки был использован биосорбционный способ с применением порошкообразного активного угля. Исследования были проведены на опытной установке, состоящей из четырёх ёмкостей, имитирующих работу аэротенка. В каждой серии опытов в равных пропорциях в ёмкости добавлялись сточные воды, активный ил и разные дозы специальных растворов, имитирующих промышленные стоки различного происхождения. На основе представленных результатов проведена оценка эффективности биологической очистки сточных вод в присутствии порошкообразного активного угля при разном содержании промышленных стоков в составе городских сточных вод. При содержании угля в ёмкости – 0,1 г/дм<sup>3</sup> эффективность очистки сточных вод от имитационных стоков пищевой промышленности по обобщённому показателю «химическое потребление кислорода» составила 67,9%, а эффективность очистки стоков, содержащих нефтепродукты, достигла 95,5%.

**Ключевые слова:** биологическая очистка, промышленные стоки, активный ил, биосорбция, порошкообразный активный уголь.

## Improving the efficiency of biological treatment of industrial wastewater as part of urban wastewater

© 2023. M. Yu. Dyagelev ORCID: 0000-0002-4949-2646  
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,  
7, Studencheskaya St., Izhevsk, Russia, 426069,  
e-mail: m.yu.dyagelev@istu.ru

The article presents the results of studies of treatment of industrial wastewater as a part of urban wastewater. A biosorption method using powdered activated carbon was used as a method to increase the efficiency of biological purification. The research was carried out on a pilot plant consisting of four tanks simulating the operation of an aerotank. In each series of experiments, wastewater, activated sludge and special solutions simulating industrial effluents of different origin were added in equal proportions to the tank. Based on the presented results, an assessment of the effectiveness of biological wastewater treatment in the presence of powdered activated carbon with a different content of industrial effluents in the composition of urban wastewater was carried out. At the concentration of coal in the tank 0.1 g/dm<sup>3</sup> efficiency of wastewater treatment of simulated effluent from the food industry on the generalized indicator “chemical oxygen demand” was 67.9%, and the efficiency of treatment of wastewater containing petroleum products reached 95.5%.

**Keywords:** biological treatment, industrial effluents, active sludge, biosorption, powdered activated carbon.

Городские сточные воды (СВ) представляют собой сложную многокомпонентную смесь переменного состава (растворимые и нерастворимые органические и минеральные примеси, поверхностно активные вещества и другие соединения). Кроме того, на городские канализационные очистные сооружения может поступать до 30–35% сточных вод от

промышленных предприятий (в некоторых городах количество производственных СВ достигает 50% и более от общего количества СВ) [1–3]. Сброс СВ от промышленных предприятий, концентрации загрязняющих веществ в которых превышают согласованный сброс в городскую канализацию, приводит к нарушению работы очистных сооружений,

особенно сооружений биологической очистки СВ [4]. Основная проблема в этом случае заключается не в ухудшении качества очистки, а в нарушении работы сложной биосистемы в целом [5] – процессы биохимической очистки начинают проходить крайне медленно и не в полном объёме, часть промышленных стоков без обработки попадает в поверхностные водоёмы, что может представлять угрозу для окружающей среды.

Характер экологической угрозы будет зависеть от количества и состава промышленных стоков. Например, при попадании на очистные сооружения стоков пищевой промышленности из-за высокой концентрации легкоокисляемой органики (ЛО) снижается эффективность окисления активным илом углеродсодержащих соединений. При попадании стоков, содержащих повышенные концентрации нефтепродуктов (НП), резко снижается концентрация растворённого кислорода в сооружениях биологической очистки [5–9], что приводит к снижению эффективности, а в ряде случаев – к полной остановке процессов удаления азота и фосфора.

Согласно [6], наибольшую опасность для очистных сооружений канализации (ОСК) представляют экстремальные сбросы токсичных примесей, а также сбросы НП и ЛО, приводящие к пенообразованию в аэротенках, так как биологическая ступень очистки СВ рассчитана на определённый перечень и концентрации загрязняющих веществ в составе СВ. Залповый сброс НП и ЛО можно отследить по резкому увеличению значения такого параметра, как химическое потребление кислорода (ХПК) в поступающей сточной воде [1]. Для предотвращения нарушения биологической очистки на ОСК рекомендуется увеличить до 50% расход подаваемого воздуха и увеличить на 25% расход избыточного активного ила [1]. Однако, ряд авторов [5, 8, 10–18] предлагает биосорбционный вариант очистки стоков от токсичных примесей, НП и ЛО, при этом в качестве сорбента предлагается использовать некоторые виды активных углей, в частности, порошкообразный активный уголь (ПУ).

В отличие от других методов очистки и доочистки, таких как мембранная фильтрация, озонирование, УФ-обработка, электроокисление, биосорбция не требует устройства дополнительных сооружений и позволяет проводить очистку СВ в рамках существующего технологического процесса без нанесения ущерба активному илу – основному инструменту биологической ступени очистки сточных вод.

Цель данной работы – исследование особенностей биосорбционной очистки сточных вод, загрязнённых нефтепродуктами и легкоокисляемой органикой, для определения концентрации порошкообразного активного угля, при которой сохранится эффективность работы аэротенков.

### Объекты и методы исследования

Работы проводили на одном из муниципальных унитарных предприятий Удмуртской Республики с реальными городскими стоками.

Объектом исследования являлись городские сточные воды. Для моделирования загрязнения СВ нефтепродуктами к городским сточным водам добавляли бензин, для имитации загрязнения стоками пищевой и перерабатывающей промышленности (хлебопекарной, молочной, пивоваренной и т. д.) в городские сточные воды добавляли спиртовой раствор (СР). Таким образом, в эксперименте имитировали залповый сброс НП и ЛО, приводящий к повышению ХПК в СВ. Химическое потребление кислорода – один из параметров контроля очистки СВ на ОСК, по его изменению оценивается эффективность очистки СВ, в том числе, при залповых сбросах загрязняющих веществ.

На крупных ОСК проводится онлайн-мониторинг нескольких интегральных показателей, в том числе и ХПК, поскольку проведение количественного и качественного анализа по каждому компоненту СВ может занимать от нескольких минут до нескольких часов [1]. Кроме того, в результате химических и биологических процессов изменяется состав СВ, особенно содержащих стоки пищевой промышленности, поэтому для оценки эффективности их очистки следует применять систему маркеров [9]. Нефтепродукты в процессе очистки СВ претерпевают менее значимые изменения [8]. В обоих случаях при залповом поступлении НП и ЛО на ОСК эффективность очистки СВ оценивается по изменению ХПК.

Для проведения эксперимента была разработана и смонтирована установка, имитирующая работу аэротенка, состоящая из четырёх ёмкостей объёмом 7 л, компрессоров и аэраторов. Максимальная производительность компрессора составляла 5 л/мин, и подаваемый воздух использовали для обеспечения жизнедеятельности активного ила, а также для перемешивания активного ила и ПУ [19]. Для аэрации применяли круглые аэраторы диаметром 130 мм с дисперсностью пузырьков воздуха  $0,35 \pm 0,15$  мм.

Для повышения эффективности биосорбционной очистки СВ подвергали предварительной механической очистке с целью удаления крупнодисперсных примесей [14, 16], после чего стоки в равных пропорциях разливались по ёмкостям. К осветлённым СВ объёмом  $4000 \pm 100$  мл добавляли  $1000 \pm 50$  мл возвратного активного ила и дозы растворов, имитирующих промышленные стоки (табл. 1).

Дозы рассчитывали таким образом, чтобы имитировать аварийный или залповый сброс. В частности, концентрация НП была увеличена в 3–6 раз по сравнению с максимально допустимым значением для ОСК – до  $0,375$  мг/дм<sup>3</sup> (для объёмного дозирования мг/дм<sup>3</sup> были пересчитаны в мл/дм<sup>3</sup>). Доза НП была эмпирически подобрана таким образом, чтобы в процессе аэрации в ёмкостях оставалась плёнка, но не происходило образования водонефтяной эмульсии, для сорбции которой применяют другие методы [20]. Концентрация НП в осветлённых стоках варьировала от  $0,16$  до  $0,187$  мг/дм<sup>3</sup>, а после добавления НП повышалась до  $1,02$ – $1,36$  мг/дм<sup>3</sup> в сериях опытов 3 и 4 и до  $2,33$ – $2,41$  мг/дм<sup>3</sup> в сериях опытов 5 и 6.

Дозу СР подбирали так, чтобы ХПК было в несколько раз выше допустимых значений для ОСК (до  $500$  мгО/дм<sup>3</sup>), итоговое значение ХПК превысило допустимое в 4 раза. В осветлённых СВ значение ХПК варьировало от  $230$  до  $330$  мгО/дм<sup>3</sup>. После добавления СР значение ХПК увеличивалось до  $2040$ – $2260$  мгО/дм<sup>3</sup>. Концентрация активного ила в каждой ёмкости составляла от  $0,6$  до  $0,8$  г/дм<sup>3</sup>.

В качестве сорбента использовали порошкообразный активный уголь (ПУ), который в виде пульпы (с 5% содержанием ПУ) добавляли в каждую ёмкость. Пульпу готовили заранее – навеску ПУ замачивали в горячей воде ( $77,5 \pm 2,5$  °С) и перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 8 ч [16]. Варианты опыта по биосорбционной очистке СВ городской канализации после залповых сбросов НП и ЛО представлены в таблице 1. Эксперимент проводили в четырёхкратной повторности.

Начало эксперимента фиксировалось с момента добавления растворов НП и СР. Отбор проб во всех сериях опытов проводили через 30, 60, 90, 150 мин после добавления растворов. Все пробы перед определением ХПК фильтровали через бумажный фильтр.

Определение ХПК проводили методом окисления серной кислотой и бихроматом калия при температуре  $150 \pm 5$  °С в термореакторе в присутствии катализатора окисления – сульфата серебра и сульфита ртути(II), используемого для снижения влияния присутствующих в городских СВ хлоридов [21].

После обработки в термореакторе ХПК определяли на приборе «Флюорат-02». Полученные значения ХПК из параллелей в 4 сериях для каждого варианта опыта статистически обрабатывали в среде MS Excel.

### Результаты и обсуждение

Результаты измерений значения ХПК в вариантах опытов в зависимости от времени представлены в таблице 2. Во всех сериях

Таблица 1 / Table 1

Варианты опыта по биосорбционной очистке сточных вод после залповых сбросов нефтепродуктов и легкоокисляемой органики / Variants of experiments on biosorption treatment of wastewater after salvo discharges of petroleum products and easily oxidizable organic

Вариант опыта Option of experiment	Вид раствора Type of solution	Объём раствора, мл Solution volume, mL	Значение ХПК растворов, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of solutions, mgO/dm <sup>3</sup>	Значение ХПК смеси СВ и раствора, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of wastewater mixture and solution, mgO/dm <sup>3</sup>	Объём пульпы ПУ, мл PAC pulp volume, mL
1	СР	$5,0 \pm 0,5$	$3490 \pm 38$	$2150 \pm 108$	–
2	АС				$10,0 \pm 0,5$
3	НП	$5,0 \pm 0,5$	$2200 \pm 56$	$1930 \pm 97$	–
4					$10,0 \pm 0,5$
5	ОР	$10,0 \pm 0,5$	$2200 \pm 56$	$1760 \pm 88$	–
6					$10,0 \pm 0,5$

Примечание: СР – спиртовой раствор; НП – нефтепродукты; в осветлённых СВ значение ХПК варьировало от  $230$  до  $330$  мгО/дм<sup>3</sup>.

Note: AS – alcohol solution; OP – oil products; in clarified wastewater, the COD value varied from  $230$  to  $330$  mgO/dm<sup>3</sup>.

Таблица 2 / Table 2

Изменение значений ХПК при биосорбционной очистке сточных вод, загрязнённых нефтепродуктами и легкоокисляемой органикой / Changes in COD value during biosorption treatment of wastewater contaminated with petroleum products and readily oxidizable organics

Вариант опыта Option of experiment	Значение ХПК смеси СВ и раствора, мгО/дм <sup>3</sup> COD value of wastewater mixture and solution, mgO/dm <sup>3</sup>	Продолжительность опыта / Duration of experiment							
		30 мин / 30 min		60 мин / 60 min		90 мин / 90 mins		150 мин / 150 min	
		ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %	ХПК, мгО/дм <sup>3</sup> COD, mgO/dm <sup>3</sup>	степень очистки, % cleaning degree, %
1	2150±110	1770±90	17,6	1460±70	17,6	900±50	58,1	840±40	61,0
2	2150±110	860±40	59,9	710±40	59,9	750±40	65,0	690±30	67,9
3	1930±100	317±16	83,6	479±24	83,6	419±21	78,3	306±15	84,2
4	1930±100	165±8	91,5	198±10	91,5	187±9	90,3	188±9	90,3
5	1760±90	1380±70	21,6	790±40	21,6	710±40	59,5	610±30	65,3
6	1690±80	408±20	75,9	226±11	75,9	108±5	93,6	76±4	95,5

опытов было установлено, что наибольшая эффективность окисления по ХПК достигается в присутствии в ёмкости ПУ (концентрация ПУ – 0,1 г/дм<sup>3</sup>). В стоках с СР в присутствии ПУ была достигнута эффективность окисления по ХПК – 59,9% в течение первых 30 мин после обработки. В дальнейшем эффективность окисления по ХПК увеличивалась не столь значительно и к концу эксперимента составляла 67,9%. Для сравнения – в контрольной серии (без добавления ПУ) за первые 30 мин эффективность окисления по ХПК составила только 17,6%, а итоговое значение составило 61%.

В сериях опытов со СВ, содержащими НП, лучшие итоговые результаты удалось получить при увеличении концентрации НП в два раза – с 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> до 2,33–2,41 мл/дм<sup>3</sup>. В сериях опытов с концентрацией НП 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> в ёмкостях с ПУ эффективность окисления по ХПК в среднем достигала 91,5% через 30 мин после обработки СВ, что является лучшим результатом в данном временном интервале. Итоговое значение эффективности окисления по ХПК через 150 мин после начала эксперимента в данном варианте почти не изменилось и составило 90,3% (в контрольной серии – 84,2%), что может свидетельствовать о наступлении адсорбционного равновесия.

В сериях опыта с увеличенными концентрациями НП эффективность окисления по ХПК в ёмкостях с ПУ через 30 мин после обработки составила 75,9% (в контрольной серии – 21,6%), а к концу эксперимента достигла 95,5% (в контрольной серии только 65,3%).

Полученные результаты исследований изменения значения ХПК при биосорбционной очистке СВ, загрязнённых НП и СР, показали высокую сходимость с данными других авторов [2, 5, 14, 22–23].

Во всех сериях опытов наибольшее снижение ХПК происходит в первые 30 минут действия ПУ и активного ила (табл. 2, рис.). В контрольных сериях опытов, обозначенных номерами 1 и 5, где СВ проходили только биологическую очистку, снижение ХПК происходило постепенно, так как для очистки СВ от специфических загрязняющих веществ с помощью активного ила требуется больше времени. Также можно отметить, что через 60 мин после обработки стоков снижение значения ХПК замедляется во всех вариантах опыта, и дальнейшая очистка СВ не даёт эффекта даже при увеличении дозы ПУ, особенно в варианте с добавлением в СВ СР.

В третьем варианте (кривая 3 на рис.) при отсутствии в ёмкости ПУ резкое падение ХПК наблюдалось в течение первых 30 мин во всех четырёх повторностях. В аналогичных опытах (без добавления ПУ) активное окисление по ХПК продолжалось в течение 90 мин (кривые 1 и 5 на рис.). В данном варианте, несмотря на превышение допустимой концентрации НП для ОСК в 3 раза, значение ХПК через 150 мин уменьшилось более чем в 6 раз, в то время как в вариантах 1 и 5 (табл. 1 и 2) за аналогичный промежуток времени значение ХПК снизилось менее чем в 3 раза.

Сравнивая итоговые значения эффективности очистки СВ по ХПК после имитации

залпового сброса НП можно отметить, что в третьем варианте (без ПУ) оно составило только 84,2%, в то время как в четвертом варианте (с добавлением ПУ) эффективность окисления по ХПК достигла 90,3%. Сравнивая третий вариант с пятым, в котором содержание НП в СВ было в два раза выше, было выявлено, что итоговая эффективность окисления по ХПК в пятом варианте составила только 65,3% (в ёмкости с ПУ – 95,5%). Таким образом, при залповых сбросах НП с концентрацией 1,02–1,36 мл/дм<sup>3</sup> работа ОСК может обеспечить эффективность очистки до 84%, однако, при росте концентрации НП до 2,41 мл/дм<sup>3</sup> требуется ввод сорбирующих материалов, так как в противном случае эффективность очистки по ХПК не будет превышать 65%.

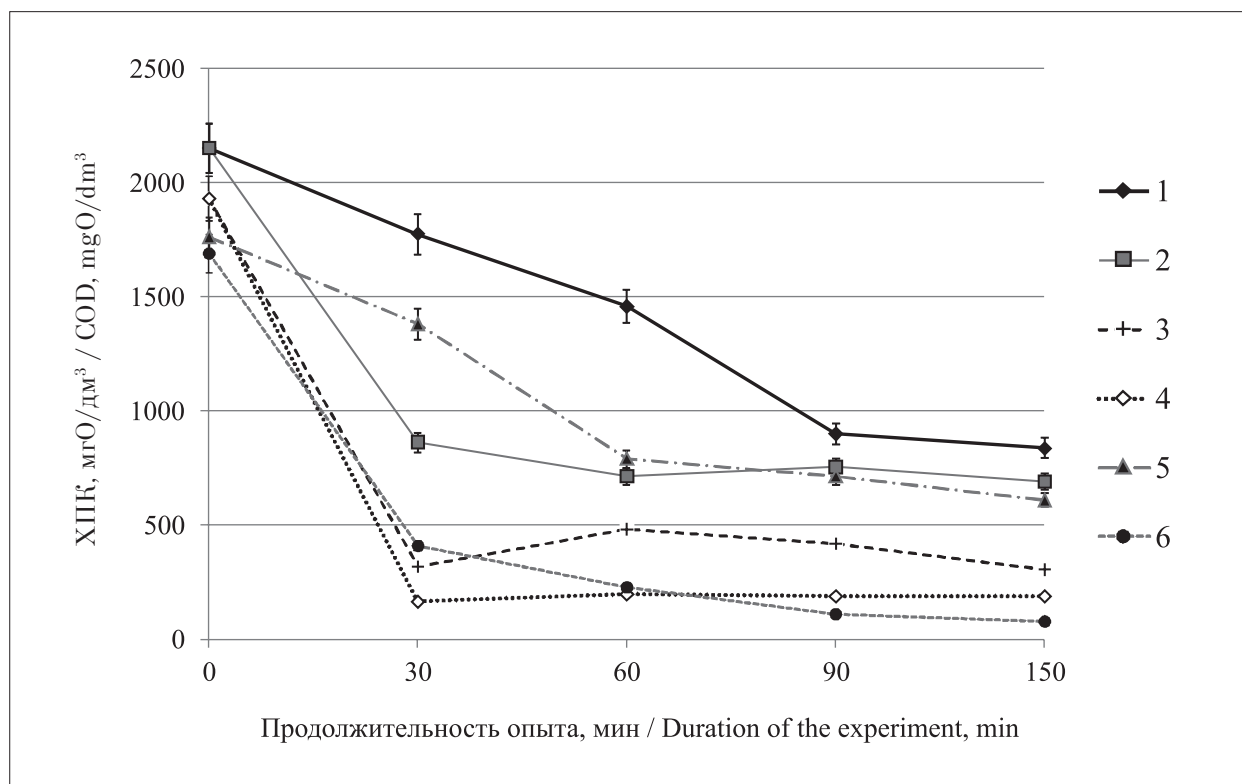
### Заключение

Результаты исследований показывали, что при залповых или аварийных сбросах в коммунальные сточные воды стоков пищевой

промышленности или нефтепродуктов применение в аэротенках в качестве сорбента пульпы ПУ позволяет сохранить эффективность работы очистных сооружений канализации.

При имитации залповых сбросов стоков пищевой промышленности добавление 5 мл спиртового раствора к 5 л сточных вод городской канализации привело к резкому росту ХПК с 230–330 мгО/дм<sup>3</sup> до 2150 мгО/дм<sup>3</sup>. Добавление в сточные воды 5 мл нефтепродуктов также сопровождалось резким ростом ХПК до 1930 мгО/дм<sup>3</sup>, добавление 10 мл нефтепродуктов способствовало увеличению ХПК до 1760 мгО/дм<sup>3</sup>.

Для снижения роста ХПК при биосорбционной очистке коммунальных сточных вод, загрязнённых промышленными стоками, в качестве сорбента в модельном эксперименте использовали пульпу ПУ с концентрацией 0,1 г/дм<sup>3</sup>. Через 30 минут после добавления ПУ в ёмкостях со спиртовым раствором значение ХПК снизилось на 59,9%, с нефтепродуктами – на 91,5%, в то время как в варианте



**Рис.** Изменение значения ХПК в нескольких сериях опытов: 1) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация СВ 1 мл/дм<sup>3</sup>; 2) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация СВ 1 мл/дм<sup>3</sup>; 3) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация НП 1 мл/дм<sup>3</sup>; 4) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация НП 1 мл/дм<sup>3</sup>; 5) контрольная серия без добавления ПУ, концентрация НП 2 мл/дм<sup>3</sup>; 6) концентрация ПУ 0,1 г/дм<sup>3</sup>, концентрация НП 2 мл/дм<sup>3</sup>

**Fig.** Change of COD value in several series of experiments: 1) control series without adding powdered activated carbon (PAC), alcohol solution (AS) concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 2) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, AS concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 3) control series without addition of PAC, oil product concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 4) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, oil product concentration 1 mL/dm<sup>3</sup>; 5) control series without adding PAC, oil product concentration 2 mL/dm<sup>3</sup>; 6) PAC concentration 0.1 g/dm<sup>3</sup>, oil product concentration 2 mL/dm<sup>3</sup>

без ПУ – на 17,6 и 83,6% соответственно. Со временем (в течение 150 мин наблюдений) эффективность очистки сточных вод с добавлением спиртового раствора в контрольном варианте (без ПУ) значительно возросла, однако значения ХПК всё равно оставались более высокими по сравнению с опытными (с ПУ) – 840 и 690 мгО/дм<sup>3</sup> соответственно.

В эксперименте с НП эффективность очистки сточных вод методом биосорбции была довольно высокой как в контрольном варианте, так и в варианте с ПУ, однако при двукратном увеличении дозы нефтепродуктов в сточных водах очистка сточных вод с участием ПУ была в три раза эффективнее, особенно в течение первых 30 мин после добавления НП в СВ.

При этом следует отметить, что постоянное применение ПУ может быть экономически нецелесообразным, учитывая необходимость дополнительных сооружений для приготовления и хранения пульпы, а также необходимость регенерации ПУ после его использования. Вариантом решения проблемы может быть доставка расчётного объёма пульпы ПУ на очистные сооружения от станций водоподготовки после получения сообщения от промышленных предприятий о залповых или аварийных сбросах стоков.

### Литература

1. Харькина О.В. Эффективная эксплуатация и расчёт сооружений биологической очистки сточных вод. Волгоград: Панорама, 2015. 433 с.
2. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Iskhakova R.Ya. Wastewater treatment of industrial enterprises using carbonate sludge // Nature Environment and Pollution Technology. 2015. V. 14. No. 4. P. 947–950.
3. Dyagelev M.Y., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Article No. 042077.
4. Фризоргер Г.Г., Исаков В.Г., Абрамова А.А. Применение метода иерархий в оценке эффективности обращения с жидкими отходами в процессе уничтожения высокотоксичных веществ // Теоретическая и прикладная экология. 2012. № 4. С. 50–55.
5. Шлёкова И.Ю., Кныш А.И. Повышение эффективности аэробной биологической очистки нефтесодержащих сточных вод // Теоретическая и прикладная экология. 2021. № 1. С. 203–209.
6. Данилович Д.А., Козлов М.Н., Мойжес О.В., Исаков В.Г., Шотина К.В. Технологические мероприятия эксплуатации сооружений биологической очистки в

аварийных и экстремальных условиях // Сборник статей и публикаций Московского водоканала. М.: Мосводоканал, 2008. С. 154–163.

7. Феофанов Ю.А., Ряховский М.С. О применении природных сорбентов для очистки воды от нефтепродуктов // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2018. № 6 (126). С. 32–38.

8. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ia. Enhancement of biological treatment of petrochemical industry wastewater // Vodosnabzhenie i Sanitarnaia Tekhnika. 2016. No. 11. P. 50–55.

9. Reif D., Saracevic E., Runjavec M.Š., Haslinger J., Schaar H., Kreuzinger N. Desorption of organic micropollutants from loaded granular activated carbon // Water. 2020. V. 12. No. 10. Article No. 2754.

10. Ferri M., Campisi S., Polito L., Shen J., Gervasini A. Tuning the sorption ability of hydroxyapatite/carbon composites for the simultaneous remediation of wastewaters containing organic-inorganic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2021. V. 420. Article No. 126656.

11. Сироткин А.С., Шулаев М.В., Понкратова С.А., Нуруллина Е.Н., Емельянов В.М. Биосорбционные технологии очистки сточных вод // Вестник Казанского технологического университета. 2010. № 6. С. 65–75.

12. Информационно-технический справочник по наилучшим доступным технологиям ИТС 10-2015. Очистка сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений, городских округов. М.: Бюро НДТ, 2015. 395 с.

13. Corral-Bobadilla M., Lostado-Lorza R., Somovilla-Gómez F., Escribano-García R. Effective use of activated carbon from olive stone waste in the biosorption removal of Fe(III) ions from aqueous solutions // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 294. Article No. 126332.

14. Сироткин А.С., Понкратова С.А., Шулаев М.В. Современные технологические концепции аэробной очистки сточных вод. Казань: Изд-во КГТУ, 2002. 163 с.

15. Рахимьянова Л.Р., Дряхлов В.О., Шайхиев И.Г., Свергузова С.В. Комбинированная очистка водомасляной эмульсии с использованием мембран и адсорбционным методом // Вестник Технологического университета. 2018. Т. 21. № 5. С. 90–93.

16. Decrey L., Bonvin F., Bonvin Ch., Bonvin E., Kohn T. Removal of trace organic contaminants from wastewater by superfine powdered activated carbon (SPAC) is neither affected by SPAC dispersal nor coagulation // Water Research. 2020. V. 185. Article No. 116302.

17. Скугорева С.Г., Кантор Г.Я., Домрачева Л.И. Биосорбция тяжёлых металлов микромцетами: особенности процесса, механизмы, кинетика // Теоретическая и прикладная экология. 2019. № 2. С. 14–31.

18. Горелкина А.К., Тимощук И.В., Голубева Н.С., Беляева О.В., Гора Н.В., Иванова Л.А. Адсорбция хлор- и кислородсодержащих загрязняющих веществ из сточных вод активными углями // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 28–37.

19. Dyagelev M.Y., Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. V. 839 (4). Article No. 042035.

20. Чаплина Т.О., Пахненко В.П. Особенности очистки поверхностных вод от углеводов с использованием природных сорбентов // Теоретическая и прикладная экология. 2022. № 4. С. 38–44.

21. ПНД Ф 14.1:2:4.190-2003. Количественный химический анализ вод. Методика измерения бихроматной окисляемости (химическое потребление кислорода) в пробах природных, питьевых и сточных вод фотометрическим методом с применением анализатора жидкости «Флюорат-02». М., 2003. 28 с.

22. Кирсанов В.В. Влияние соотношения рециркуляционного активного ила и химстока, периода аэрации на эффективность биоокисления по ХПК и токсичности в трёхкоридорных аэротенках // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 13. С. 250–251.

23. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. Wastewater Engineering, Treatment and Reuse (Fourth Edition). Lasing: McGraw-Hill, 2003. 1820 p.

## References

1. Harkina O.V. Efficient operation and calculation of biological wastewater treatment facilities. Volgograd: Panorama, 2015. 433 p. (in Russian).

2. Nikolaeva L.A., Laptev A.G., Iskhakova R.Ya. Wastewater treatment of industrial enterprises using carbonate sludge // Nature Environment and Pollution Technology. 2015. V. 14. No. 4. P. 947–950 (in Russian).

3. Dyagelev M.Y., Nepogodin A.M., Grakhova E.V. Determination of the flotation effectiveness of industrial waste water in a laboratory // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Article No. 042077. doi: 10.1088/1757-899X/962/4/042077

4. Frizorger G.G., Isakov V.G., Abramova A.A. Application of a hierarchy analysis method at assessing the efficiency of handling liquid waste during highly toxic substances decommission // Theoretical and Applied Ecology. 2012. No. 4. P. 50–55 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2012-4-059-063

5. Shlyakova I.Yu., Knysh A.I. Improving the efficiency of aerobic biological purification of oily wastewater // Theoretical and Applied Ecology. 2021. No. 1. P. 203–209 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2021-1-203-209

6. Danilovich D.A., Kozlov M.N., Mojzes O.V., Isakov V.G., Shotina K.V. Technological measures of operation of biological treatment facilities in emergency and extreme conditions // Collection of articles and publications of Moscow Vodokanal. Moskva: Mosvodokanal, 2008. P. 154–163 (in Russian).

7. Feofanov Yu.A., Ryakhovsky M.S. On the use of natural sorbents for water purification from petroleum products // Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2016. No. 6 (126). P. 32–38 (in Russian).

8. Nikolaeva L.A., Iskhakova R.Ia. Enhancement of biological treatment of petrochemical industry wastewater // Vodosnabzhenie i sanitarnaia tekhnika. 2016. No. 11. P. 50–55 (in Russian).

9. Reif D., Saracevic E., Runjavec M.Š., Haslinger J., Schaar H., Kreuzinger N. Desorption of organic micropollutants from loaded granular activated carbon // Water. 2020. V. 12. No. 10. Article No. 2754. doi: 10.3390/w12102754

10. Ferri M., Campisi S., Polito L., Shen J., Gervasini A. Tuning the sorption ability of hydroxyapatite/carbon composites for the simultaneous remediation of wastewaters containing organic-inorganic pollutants // Journal of Hazardous Materials. 2021. V. 420. Article No. 126656. doi: 10.1016/j.jhazmat.2021.126656

11. Sirotkin A.S., Shulaev M.V., Pankratova S.A., Nurullina E.N., Emelyanov V.M. Biosorption technologies of wastewater treatment // Bulletin of Kazan Technological University. 2010. No. 6. P. 65–75 (in Russian).

12. Information and technical guide to the best available technologies ITG 10-2015 Wastewater treatment using centralized wastewater disposal systems of settlements, urban districts. Moskva: NDT Bureau, 2015. 395 p. (in Russian).

13. Corral-Bobadilla M., Lostado-Lorza R., Somovilla-Gómez F., Escribano-García R. Effective use of activated carbon from olive stone waste in the biosorption removal of Fe(III) ions from aqueous solutions // Journal of Cleaner Production. 2021. V. 294. Article No. 126332. doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126332

14. Sirotkin A.S., Ponkratova S.A., Shulaev M.V. Modern technological concepts of aerobic wastewater treatment. Kazan: Publishing House of KSTU, 2002. 163 p. (in Russian).

15. Rakhimyanova L.R., Dryakhlov V.O., Shaikhiyev I.G., Sverguzova S.V. Combined purification of water-oil emulsion using membranes and adsorption method // Bulletin of the Technological University. 2018. V. 21. No. 5. P. 90–93 (in Russian).

16. Decrey L., Bonvin F., Bonvin Ch., Bonvin E., Kohn T. Removal of trace organic contaminants from wastewater by superfine powdered activated carbon (SPAC) is neither affected by SPAC dispersal nor coagulation // Water Research. 2020. V. 185. Article No. 116302. doi: 10.1016/j.watres.2020.116302

17. Skugoreva S.G., Kantor G.Ya., Domracheva L.I. Biosorption of heavy metals by micromycetes: specificity of the process, mechanisms, kinetics // Theoretical and Applied Ecology. 2019. No. 2. P. 14–31 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2019-2-014-031

18. Gorelkina A.K., Timoshchuk I.V., Golubeva N.S., Belyaeva O.V., Gora N.V., Ivanova L.A. Adsorption of chlo-

rine- and oxygen-containing pollutants from wastewater by activated carbons // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 28–37 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-028-037

19. Dyagelev M.Y., Pavlov I.I., Nepogodin A.M., Grakhova E.V., Lapina A.A. The review of aeration systems for biological wastewater treatment // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. V. 839. No. 4. Article No. 042035. doi: 10.1088/1755-1315/839/4/042035

20. Chaplina T.O., Pakhnenko V.P. Peculiarities of surface water purification from hydrocarbons using natural sorbents // *Theoretical and Applied Ecology*. 2022. No. 4. P. 38–44 (in Russian). doi: 10.25750/1995-4301-2022-4-038-044

21. PND F 14.1:2:4.190-2003. Quantitative chemical analysis of water. Methods for measuring bichromate acidity (chemical oxygen demand) in natural, potable and waste water samples by photometric method using “Fluorat-02” liquid analyzer. Moskva, 2003. 28 p. (in Russian).

22. Kirsanov V.V. Influence of the ratio of recirculating activated sludge and chemical stock, aeration period on the efficiency of biooxidation by COD and toxicity in three-corridor aerotanks // *Bulletin of Kazan Technological University*. 2014. V. 17. No. 13. P. 250–251 (in Russian).

23. Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D. *Wastewater Engineering. Treatment and Reuse* (Fourth Edition). Lasing: McGraw-Hill, 2003. 1820 p.