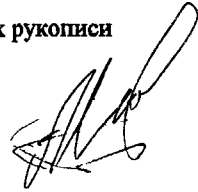


На правах рукописи

МАРОЧКИН Алексей Александрович



**РЕСУРСНО-ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ ДООЧИСТКИ  
БИОЛОГИЧЕСКИ ОЧИЩЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД НА  
ЕРШОВОАНТРАЦИТОВЫХ ФИЛЬТРАХ**

Специальность: 03.00.16 – «Экология»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Ростов – на – Дону, 2002

Работа выполнена в Ростовском государственном строительном университете (РГСУ)

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент  
Вильсон Елена Владимировна

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Страхова Наталья Анатольевна;  
кандидат технических наук  
Новосельцева Ирина Валентиновна

Ведущее предприятие: ОАО «Гипронинстройдормаш» (г. Ростов н/Д).

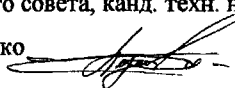
Защита диссертации состоится \_\_\_\_\_ 2002г. в \_\_\_\_ часов на заседании диссертационного совета № Д 21.207.03 в Ростовском государственном строительном университете по адресу: 344029, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистическая, 162, ауд.\_\_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке РГСУ.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять ученому секретарю диссертационного совета.

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_\_ 2002 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, канд. техн. наук,  
проф. Сергей Леонардович Пушенко



2002-А  
12254

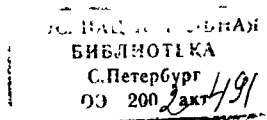
## 1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. **Актуальность темы исследований.** В России по сравнению с другими странами мирового сообщества установлены наиболее жесткие нормативы на сброс очищенных сточных вод в поверхностные водоемы. Для достижения нормативов СанПиН – 2 1.5.980 – 00 «Гигиенические требования к охране поверхностных вод» необходима доработка (а чаще всего - разработка) и совершенствование технологических решений по очистке и доочистке сточных вод существующих очистных станций. Экономическая обстановка в стране и инвестиционная политика в области очистки сточных вод не создают в обозримом будущем предпосылок к широкому строительству новых очистных сооружений. В связи с этим совершенствование существующих технологий и аппаратов с доведением показателей очистки и доочистки сточных вод до нормативных величин при минимальных экономических затратах является актуальной проблемой научных и практических разработок в ближайшие годы. Доочистка биологически очищенных сточных вод (БОСВ) не всегда обеспечивает нормативные показатели для сброса в поверхностные водоемы и нуждается в технологической и конструктивной модификациях с использованием появившихся в последние годы более эффективных материалов и оборудования.

Работа выполнялась по плану кафедры «водоснабжения и водоотведения» РГСУ в рамках государственной программы «Архитектура и строительство» по госбюджетной теме №01.9.40001739- «Совершенствование процессов очистки природных и сточных вод южного региона страны с учетом экологических требований».

1.2. **Область исследования** – прикладная экология – комплексная оценка влияния биологически очищенных сточных вод на ершвоантрацитовых фильтрах по ресурсно-экологическому потенциалу (РЭП) на природную среду.

1.3. **Объект исследования** – биологически очищенные сточные воды.



**1.4. Предмет исследования** – РЭП доочистки БОСВ фильтрованием на антрацитах Ростовского угольного бассейна

**1.5. Цель** настоящего диссертационного исследования: теоретико-экспериментальное обоснование и оптимизация РЭП ершевоантрацитовых фильтров при доочистке БОСВ.

**Задачи исследований:**

- научное обоснование РЭП доочистки БОСВ;
- научное обоснование целесообразности применения и методика проектирования ершевоантрацитовых фильтров для доочистки БОСВ;
- исследование физико-химических и механических характеристик антрацитов Донбасского бассейна Ростовской области применительно к загрузке фильтров для БОСВ;
- исследование и оценка каталитических свойств антрацитовой загрузки;
- разработка оптимальной конструкции и режимов доочистки БОСВ;
- расчет, строительство и внедрение ершевоантрацитовых фильтров новой конструкции для БОСВ;
- разработка Технических условий на выпуск фильтрующих антрацитов и рекомендаций и внедрение их в практику водоочистки.

**1.6. Основная идея работы** заключается в научном обосновании и оптимизации РЭП ершевоантрацитовых фильтров для доочистки БОСВ вследствие высокой эффективности очистки и дополнительного каталитического изъятия загрязнений антрацитовой загрузкой, что приводит к ресурсосбережению и снижению антропогенной нагрузки на окружающую среду.

**1.7. Методы исследования.** Исследования выполнены в лабораторных, полупроизводственных и опытно-промышленных условиях на производственных и модельных установках по общепринятым в практике водообработки методикам. Обработка результатов исследований проводилась на ПЭВМ по стандартным программам матстатистики (Исследования выполнялись в лаборатории кафедры «водоснабжения и

водоотведения» РГСУ, на очистных сооружениях сточных вод пос. Головинка (г. Сочи) и пос. Несветай ГРЭС (Ростовская область).

**1.8. Научная новизна работы** заключается в том, что:

- РЭП является обобщенной характеристикой ресурсосбережения и снижения антропогенных выбросов в окружающую среду при доочистке БОСВ и может применяться для оптимального выбора сравниваемых проектных вариантов;
- выдвинута гипотеза и получено экспериментальное подтверждение участия углерода и оксидов переходных металлов из антрацитов в катализе окислительно-восстановительных реакций при доочистке БОСВ;
- получена математическая модель и предложена инженерная методика расчета ершвоантрацитовых фильтров при доочистке БОСВ.

**1.9. Наиболее существенные научные результаты**, полученные лично автором, состоят в следующем:

- впервые применена комплексная методика оценки и определены численные значения РЭП доочистки БОСВ на ершвоантрацитовых и двухслойных фильтрах;
- обоснование оптимальной конструкции ершвоантрацитовых фильтров и технологического режима доочистки БОСВ на них.

**1.10. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается применением апробированных методик исследований с использованием аттестованных методик анализа, поверенных приборов, большим массивом и хорошей сходимостью экспериментальных данных с расчетными.

**1.11. Практическая значимость работы** состоит в том, что:

- определены механические, физико-химические и фильтрующие характеристики антрацитов Восточного каменноугольного бассейна Ростовской области, (шахта «Обуховская»), для использования в качестве загрузки фильтров для доочистки БОСВ;

- экспериментально обоснованы оптимальные параметры конструкции и режима эксплуатации ершовоантрацитовых фильтров для доочистки БОСВ;
- разработаны Технические условия на выпуск фильтрующих антрацитов для очистки природных и сточных вод, получены: решение Роспатента РФ на выдачу патента, Сертификат соответствия и Гигиеническое заключение Центра Госсанэпиднадзора о применении в соответствующих технологиях; антрацит шахты «Обуховская» вошел в «Перечень ...» Минздрава РФ для применения в очистке вод

**1.12. Реализация результатов работы:** запроектированы, встроены и эксплуатируются в течение 1,5 года на двух очистных сооружениях ершовоантрацитовые фильтры для доочистки БОСВ, обеспечивающие нормативное качество, внедрены в проекты ряда водосчетных станций, что подтверждено 6 актами внедрения.

**1.13. На защиту выносятся:**

- математическая модель и конструкция ершовоантрацитового фильгра для доочистки БОСВ, инженерная методика его расчета;
- оптимизация рабочих параметров и технологический режим доочистки БОСВ в производстве;
- гипотеза и экспериментальное подтверждение каталитического снижения концентрации загрязнений из БОСВ на поверхности антрацитовой загрузки;
- механические, физико-химические и технологические показатели антрацитов шахты «Обуховская» как фильтрующих материалов для загрузки водоочистных фильтров;
- методика обоснования и выбора конкурирующих вариантов доочистки БОСВ фильтрованием по РЭП.

**1.14. Апробация работы.** Основное содержание работы доложено и обсуждено на Международных научно-практических конференциях "Строительство –1999 – 2002 гг". - РГСУ, г. Ростов н/Д, «Человек и

окружающая природная среда - проблемы взаимодействия», г. Пенза, 2001 и 2002 гг.; на Первом конгрессе штата Керетаро «Проблемы и перспективы воды в штате Керетаро», Мексика, 2001 г.

**1.15. Публикации.** По результатам исследований опубликовано 7 статей и материалов докладов, 3 отчета по НИР, решение о выдаче патента РФ.

**1.16. Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, шести глав, выводов, перечня цитируемой литературы, включающего 123 источника. Диссертация содержит 189 стр., из них – 156 стр. текста, включая 31 таблицу и 20 рисунков. В приложении приведены экспериментальные и расчетные материалы, 6 актов внедрения.

## **2. СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Анализируются мотивы появления и обосновываются подходы к обеспечению нормативов СанПиН 2.1.5.980 – 00. Исключение из расчета степени очистки и ПДС учета разбавления и ассимилирующей способности водоемов приводит к тому, что доочистка БОСВ становится обязательным элементом каждой технологической схемы.*

Для доочистки БОСВ в настоящее время используются естественные и искусственные методы. К первым относится доочистка вод в различного типа и конструкций прудов (лагун) симбиозом микроорганизмов, водорослей и высшей водной растительности с участием природно-климатических факторов. Разновидностью естественной очистки и доочистки сточных вод является широко применяемая в последнее время в зарубежной практике технология «wett land» («мокрая земля»). Ко второй группе методов относится доочистка на фильтрах различных конструкций с плоскими и объемными фильтровальными элементами, с природными и искусственными фильтрующими материалами. Богатейший опыт фильтрования природных вод без экспериментальной проверки не может быть применен для доочистки БОСВ, т. к. разные по физико-химическим свойствам загрязнения определяют фундаментальную разницу в процессах очистки. (Например, библиографический поиск в Интернете по ключевым

словам «фильтрация вод» в декабре 2001 г. дал 4207 ссылок, а по ключевым словам «доочистка сточных вод фильтрованием» - всего 110). Тем не менее использование приемов фильтрации в водоподготовке как аналогов позволяет при доочистке БОСВ на фильтрах сократить объем исследований и время внедрения разработок.

Выбор и оценка фильтров только по качеству очищенных вод, технологическим и экономическим параметрам режимов, как это принято в настоящее время, являются неполными и нуждаются в расширенном анализе с позиций РЭП, т. е. с позиций ресурсосбережения и снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду. Технически это может быть достигнуто объединением в единой конструкции нескольких функционально разьединенных процессов: фильтрации, окисления, восстановления, сорбции и биологической деструкции задержанной биомассы.

При фильтрации БОСВ через пористую загрузку наблюдаются не только механические и физико-химические процессы задержания, транспортирования, сорбции, агрегации и течения воды через дополнительный фильтрующий слой из сформировавшихся загрязнений, но и биологические процессы окисления - восстановления, обусловленные жизнедеятельностью активного ила (био пленки), наличием (отсутствием) растворенного кислорода. В отдельных случаях фильтрующий материал может иметь также и каталитические свойства, ускоряя восстановление атомарного кислорода на своей поверхности и сопряженно окисляя при этом восстановленные ионы и молекулы загрязняющих веществ сточных вод, которые представлены БПК, ХПК, аммонийным азотом, нитритами, сульфидами, сульфатами и пр.

Как известно, способностью к катализу обладают оксиды и комплексы переходных металлов и в меньшей степени углерод определенной степени метаморфизма. Следовательно, для доочистки сточных вод более предпочтительной объемной пористой загрузкой может быть



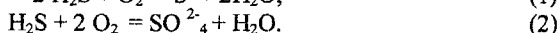
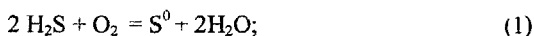
углеродсодержащая или антрацит. В этом случае одновременно с выделением клеток биомассы при доочистке БОСВ на фильтрах будет осуществляться частичное снижение коллоидных, молекулярных и ионных примесей, чего не наблюдается при инертных загрузках. А это в свою очередь означает, что антрацитовые фильтры выполняют не только водоочистную, но и ресурсосберегающую функцию, поскольку экономят природные ресурсы и снижают нагрузку на окружающую природную среду.

В последние годы (1999 – 2000) в Ростовской области на базе уникальных антрацитов шахты «Обуховская» (г. Зверево) производственно коммерческая фирма «Синтез» наладила промышленный выпуск антрацитов требуемых фракций для применения в процессах очистки вод. Зольность данных антрацитов не превышает 2%, в ее составе содержатся оксиды железа и марганца (переходные металлы). Однако опыта применения антрацитов данного состава для доочистки сточных вод не имелось до настоящего времени. Также до сих пор не были рассмотрены антрациты как вероятные катализаторы в процессе доочистки БОСВ.

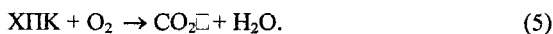
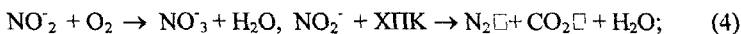
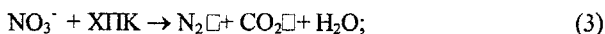
Волокнистые ерши широко применяются для очистки природных и сточных вод в различных водоочистных аппаратах (аэротенках, метантенках, фильтрах, фильтрах-биореакторах и т.д.). Положительный заряд материала, взаимодействующий с отрицательно заряженными частицами загрязнений, большая поверхность адсорбции и малое гидравлическое сопротивление ершей фильтрованию увеличивают перспективу их применение в качестве префильтра перед антрацитовой загрузкой для изъятия частиц активного ила. В этом случае при промывке антрацитовой загрузки обратным током воды неподвижный слой ершей выполняет роль «щеток», способствуя оттиранию загрязнений с поверхности антрацита и как следствие приводит к уменьшению расхода промывной воды и времени промывки. К тому же ерши препятствуют при этом выносу загрузки.

*Теоретически обосновано дополнительное преимущество применения антрацитовой загрузки (по сравнению с песчаной) для доочистки БОСВ за счет каталитических процессов, инициируемых углеродом и оксидами переходных металлов, входящими в состав неорганической части данного материала, а также с позиций РЭП.*

В работах Л. Н. Фесенко показано, что нет термодинамического запрета на каталитические реакции на поверхности антрацитовой загрузки по восстановлению свободного кислорода до воды и окислению двухвалентной серы при очистке вод в режиме орошения, т.е. в незатопленной загрузке:



По аналогии с (1) и (2) допустимо предполагать протекание следующих реакций при доочистке БОСВ фильтрованием на затопленной антрацитовой загрузке:



Применительно к доочистке фильтрованием БОСВ скорость реакции не является определяющим (расчетным) технологическим показателем и может быть заменена нагрузкой или удельной величиной изъятия загрязнений, определяемой из выражения:

$$H_m = \Delta C_i / m_a, \text{ мг / г}; \quad (6)$$

$$H_0 = \Delta C_i / W_a, \text{ мг / м}^3, \quad (7)$$

где  $H_m$  – нагрузка  $i$ -го компонента загрязнений на 1 г антрацита;  $H_0$  – то же на 1 м<sup>3</sup>. Данные величины требуется определить экспериментально, чтобы получить оценки РЭП антрацитовых фильтров.

РЭП процесса доочистки БОСВ фильтрованием характеризуется Р) ресурсными коэффициентами: 1- полезного фильтрования; 2 - потребности в антрацитовой загрузке для фильтра; 3 - вторичного

потребления антрацита (после вывода фильтров из эксплуатации); 4 - снижения потребности в промывной воде; Э - экологическими коэффициентами: 1- снижения антропогенной нагрузки на водоем – приемник сточных вод; 2 - увеличения антропогенной нагрузки на литосферу в виде твердой фазы, изъятой при промывке фильтров; 3 - эколого-экономической целесообразности доочистки БОСВ фильтрованием; 4 - снижения антропогенной нагрузки на атмосферу за счет снижения потребления электроэнергии на подачу воды и воздуха при промывке фильтрующей загрузки; 5 - снижения антропогенной нагрузки на окружающую среду за счет катализа. По аналогии с функцией желательности Харрингтона предложим шкалу количественных и качественных оценок РЭП (табл.1).

Каждому значению ресурсного или экологического коэффициента в соответствии с табл. 1 устанавливается частный коэффициент  $K_{чi}^{РЭП}$  (расчетом, экспериментом, методом экспертных оценок и т.д.) и степень взаимодействия с окружающей средой.

Таблица 1

Шкала оценок по РЭП

Значение функции оптимизации по РЭП	Оценка качественного воздействия по компоненту РЭП		
	обобщенному	ресурсному	экологическому
> 1 01	опасная	неудов	опасная
0 81 – 1 00	сильная	достаточная	сильная
0 80 – 0,631	удов	удов	средняя
0 63 – 0 371	средняя	средняя	удов
0 37 – 0.201	слабая	хорошая	слабая
0.20 – 0.01	отсутствие	высокая	отсутствие

После детерминации частных коэффициентов  $K_{чi}^{РЭП}$  вычисляется и описывается обобщенный (оценочный или оптимизационный) РЭП процесса:

$$РЭП = \sqrt[n]{K_{ч1}^{РЭП} K_{ч2}^{РЭП} K_{ч3}^{РЭП} \dots K_{чn}^{РЭП}}$$

*Изложены материалы и методики исследований.* В качестве основного фильтрующего материала использовали антрациты шахты «Обуховская» Ростовской области, а в качестве эталона сравнения – песок Вольского карьера Волгоградской области как наиболее широко распространенную загрузку фильтров. Изучение механических, физико-химических и фильтрующих характеристик антрацитов проводили в соответствии с рекомендациями ГНЦ «ВОДГЕО», НИИ КВиОВ АКХ им. Памфилова. Описаны предложенные в данной работе оригинальные методики по исследованию каталитических свойств антрацита при доочистке БОСВ, по оптимизации режима работы ершевоантрацитового фильтра, опытно-промышленных и промышленных исследований на очистных сооружениях пос. Головинка (г. Сочи) и пос. Несветай НсвГРЭС, где осуществлено промышленное внедрение фильтров с антрацитовой загрузкой. Обработка экспериментальных данных проводилась на ПЭВМ по стандартным статистическим программам.

*Экспериментально установлено, что загрузка из антрацитов шахты «Обуховская» по механическим, химическим, физико-химическим показателям соответствует требованиям, предъявляемым к фильтрующим загрузкам фильтров для очистки природных и сточных вод.* Перед песчаной загрузкой она имеет лучшие показатели по грязеемкости, химической стойкости, удельным величинам прироста потерь напора, по отмывке загрязнений. На базе полученных результатов разработаны Технические условия № 4859-001-49785509-99 на выпуск фильтрующих антрацитов, которые вошли в «Перечень» Минздрава России для применения в очистке вод для хозяйственных целей, а также получены Гигиенические сертификаты на производство.

Гипотезу о наличии каталитических свойств антрацита проверяли экспериментально на двух моделях фильтров диаметром 50 мм и высотой 1500 мм, загруженных на высоту 800 мм: первый - антрацитом фракцией 0,8 – 1,6 мм, второй – песком. В качестве модельной жидкости на первом этапе

исследований применяли водопроводную воду, содержащую по отдельности 4 – 12 мг/л азота аммонийного, нитратов и уксусной кислоты (по ХПК), а затем и их смеси (при известной начальной концентрации кислорода и ее температуре), а на втором - БОСВ (табл. 2).

Во всех случаях остаточные концентрации окисленных и восстановленных ингредиентов после антрацитовой загрузки в 1,09 – 1,63 раза меньше, чем после песчаной, что доказывает вклад каталитических свойств углерода и оксидов переходных металлов из антрацита в очистку вод. При этом уменьшается потребление кислорода на процесс. Установленные каталитические свойства повышают РЭП доочистки БОСВ, снижая ресурсо- и энергопотребление процесса.

Таблица 2

Средние показатели доочистки БОСВ в лабораторных условиях

Наименование	Исх. концентрация, мг/л	Показатели фильтрата после фильтрующей загрузки из							
		песка			антрацита				
		мг/л	$\Delta$ , мг/л	% <sub>п</sub>	мг/л	$\Delta$ , мг/л	% <sub>а</sub>	$\Delta$ <sub>п</sub> , мг/л	% <sub>а</sub> /% <sub>п</sub>
ХПК	42,3	16,8	25,5	60,3	9,33	32,97	77,9	17,6	1,29
ПО	12,7	7,00	5,70	44,9	3,40	9,30	73,2	28,3	1,63
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	3,87	0,93	2,94	76,1	0,40	3,47	89,7	13,6	1,19
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	3,20	3,45	0,25	---	3,84	0,64	---	0,39	1,56
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,18	0,03	0,15	83,3	0,018	0,162	90,0	6,7	1,09
O <sub>2</sub>	2,12	1,34	0,78	---	1,70	0,42	---	-0,36	0,54

Изучение влияния технологических факторов (скорости фильтрования, прироста потерь напора, длительности фильтроцикла, высоты и размера фракций загрузки, грязеемкости, намывного слоя) на доочистку БОСВ проводили на 3 лабораторных моделях ( $d = 100$  мм,  $h_p = 1800$  мм,  $h_{загр} = 800$  мм) фильтров. В первой серии определили показатели очищенных сточных вод (табл. 3) по отдельности на антрацитовой загрузке  $d_a = 2 - 5$  (№1);  $d_a = 0,8 - 1,6$  (№2) мм; ершах -  $d = 80$  мм (№3). Во второй серии исследований для изучения совместного эффекта антрацита и ершей при доочистке БОСВ

изготовлена модель фильтра (№4): 1-й слой – антрацит фракции 1,6 – 2,5 мм. 2-й слой – антрацит фракции 0,8 – 1,6 мм, 3-й – ерши. Размеры фильтра составляли: 400 x 800 x 2200 мм (рис.унок).

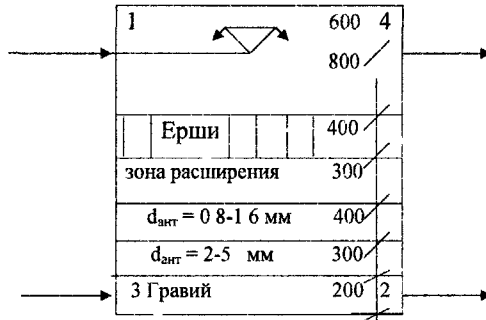


Схема ершовоантрацитового фильтра: подача 1 – исходной, 3 – промывной воды; отвод 2 – фильтрата, 4 – промывных вод.

Сравнивая усредненные данные 20 фильтроциклов по доочистке БОСВ (табл.3), можно видеть, что на фильтрах с намывным слоем (№3, №4) наблюдается увеличенный вынос взвешенных веществ при незначительном снижении органических загрязнений (по ХПК и ПО). Это можно объяснить выносом материалов намывного слоя. Также это указывает на статистически незначимый вклад намывного слоя в доочистку БОСВ в данных условиях, поэтому в дальнейшем данный технологический прием не рассматривался как способ интенсификации работы фильтров. После ершового фильтра (№3) в очищенных водах концентрация азота аммонийного, нитритов больше, а нитратов – меньше, что подтверждает наличие каталитических свойств в антрацитовых фильтрах (№1, №2).

Показатели доочистки БОСВ на разных типах фильтров, мг/л

Наименование	Исходная вода	Фильтр №1	Фильтр №2	Фильтр №3	Фильтр № 4
В В	10,7	4,5	3,6	7,8	8,2
Бихроматная ок-ть (ХПК)	18	12,5	9,8	12,4	7,6
Перманганатная ок-ть	3,4	3,6	3,0	5,7	3,2
Фосфаты	2	1,7	1,6	2	1,6
Азот аммонийный	1,5	0,25	0,17	0,54	0,36
Нитраты	0,0	4,5	5,2	3,4	4,8
Нитриты	0,03	0,02	0,01	0,03	0,02

Изложены обоснование и оптимизация технологических и конструктивных особенностей полупроизводственных и опытно-промышленных фильтров.

Для оптимизации технологических параметров работы ершовоантрацитового фильтра, ранжирования их важности и получения расчетных зависимостей была реализована 1/16 дробной реплики полного факторного эксперимента типа  $2^{7-4}$  с варьируемыми факторами.

После реализации и статистической обработки активного эксперимента с исключением незначимых коэффициентов получены в кодированных переменных уравнения, адекватно описывающие следующие процессы:

- продолжительность фильтроцикла:

$$Y_1 = 30,31 - 2,56X_1 - 4,31X_4 + 3,06X_7, \quad (8)$$

(функция  $Y_1$  - возрастающая, т.е. большие ее значения увеличивают РЭП фильтра);

- отношение остаточных загрязнений по ПО к исходным:

$$Y_2 = 0,42 + 0,047X_1 - 0,060X_3 - 0,052X_4, \quad (9)$$

(функция  $Y_2$  - убывающая, т.е. меньшие ее величины увеличивают РЭП фильтра);

- то же по бихроматной окисляемости (ХПК):

$$Y_3 = 0,43 - 0,088X_1 - 0,049X_6, \quad (10)$$

(функция  $Y_3$  - убывающая);

- то же по взвешенным веществам:

$$Y_4 = 0,45 + 0,04X_2 - 0,08X_4 + 0,06X_5, \quad (11)$$

(функция  $Y_4$  - убывающая),

где  $X$  – высота загрузки антрацита фракции, 2 - 5мм;  $X_2$  – высота загрузки антрацита фракции 0.8-1,6 мм;  $X_3$  – высота ершовой загрузки, мм;  $X_4$  – скорость фильтрования, м/ч;  $X_5$  – продолжительность водяной промывки загрузки, мин;  $X_6$  – продолжительность продувки загрузки воздухом, мин;  $X_7$  – интенсивность водяной промывки, л/с  $m^2$ .

Параметры оптимизации процесса доочистки БОСВ:  $Y_1$  – продолжительность фильтрования до достижения заданных потерь напора, ч; эффективность доочистки БОСВ:  $Y_2$  – от легко окисляемых органических примесей по перманганатной окисляемости (ПО);  $Y_3$  – от суммы органических и неорганических веществ в восстановленной форме по ХПК;  $Y_4$  – от взвешенных веществ.

$X_1$  - высота слоя загрузки антрацита фракции 2 –5 мм. Алгебраически для повышения  $Y_1$  и снижения  $Y_2$  величину коэффициента при  $X_1$  необходимо уменьшать, а для  $Y_3$  – увеличивать. Технологически это означает, что загрузка данной фракции значимо влияет на продолжительность фильтроцикла вследствие повышенной ее грязеемкости и на выделение из БОСВ органических веществ. Однако она не имеет статистически значимого влияния на выделение взвешенных веществ.

Индивидуальная доля вклада  $X_1$  в процесс доочистки БОСВ составляет: для  $Y_1$   $(2,56/30,51) = 0,084$ ;  $Y_2$   $(0,047/0,42) = 0,112$ ; для  $Y_3$  –  $(0,088/0,43) = 0,205$ , суммарный вклад равен 0,399. Причем наибольшее влияние (в данном случае позитивное, требующее увеличение высоты слоя) он оказывает на доочистку вол по ХПК. Поэтому можно утверждать, что антрацит фракции 2 – 5 мм вносит преимущественный вклад в процесс



доочистки за счет каталитической активности загрузки. К тому же для увеличения степени доочистки БОСВ по ХПК требуется повышать высоту слоя антрацита и продувку воздухом, т. е. повышать концентрацию кислорода. Это также указывает на каталитическое восстановление кислорода до воды при окислении веществ, характеризуемых ХПК.

В зависимости от основного требования к процессу доочистки - максимальной длительности фильтроцикла или наибольшего выделения органических веществ - оптимальные высоты фильтрующего слоя антрацита ( $X_1$ ) при проектировании фильтров следует применять соответственно наилучшим значениям, полученным в эксперименте. Для оптимальной продолжительности фильтроцикла и снижения органических загрязнений по БПК высота загрузки - 200 мм, для снижения по ХПК - 400 мм. Как усредненную принимаем высоту - 300 мм. (Аналогично в работе приведен технологический анализ других факторов.):

Доля индивидуальных вкладов факторов в процесс доочистки БОСВ составляет:  $X_1 - (0,399)$ ;  $X_2 - (0,101)$ ;  $X_3 - (0,143)$ ;  $X_4 - (0,443)$ ;  $X_5 - (0,133)$ ;  $X_6 - (0,114)$ ;  $X_7 - (0,101)$ .

Для проектирования рекомендуется использование расчетных параметров процесса доочистки БОСВ в натуральных переменных:

- продолжительность полезного фильтрования:

$$\Gamma_{\text{пф}} = 39,08 - 12,8 h_{d2.5} - 1,08V + 0,77 J, \text{ ч}; \quad (12)$$

- отношение остаточных загрязнений  $C_{\text{ост}}^{\text{по}}$  перманганатной окисляемости к исходным  $C_{\text{исх}}^{\text{по}}$ :

$$C_{\text{ост}}^{\text{по}} / C_{\text{исх}}^{\text{по}} = 0,593 - 0,235 h_{d2.5} - 0,30 h_{\text{ерш}} - 0,013 V; \quad (13)$$

- то же по бихроматной окисляемости (ХПК) к исходным:

$$Y_3 = C_{\text{ост}}^{\text{ХПК}} / C_{\text{исх}}^{\text{ХПК}} = 0,567 - 0,44 h_{d2.5} - 0,0098 \tau_{\text{прод}}; \quad (14)$$

- то же по взвешенным веществам:

$$Y_4 = C_{\text{ост}}^{\text{ВВ}} / C_{\text{исх}}^{\text{ВВ}} = 0,33 + 0,4 h_{d0.8-1.5} - 0,02V - 0,02 \tau_{\text{вд}}. \quad (15)$$

Расчетные зависимости (12 - 15) показателей доочистки БОСВ верны в рамках границ исследований: высота слоя антрацита ( $h_{d2.5}$ ) фракции 2 - 5

мм: 0,0 - 0,4 м; то же фракции ( $h_{d0,8-1,6}$ ) 0,8 – 1,6 мм: 0,3 – 0,5 м; то же ершей ( $h_{ерш}$ ) : 0,3 - 0,6 м; скорость фильтрования (V): 6 – 14 м/ч; время водной промывки ( $\tau_{пл}$ ): 5 – 11 мин; время продувки загрузки воздухом при регенерации ( $\tau_{вз}$ ): 0 – 10 мин; интенсивность водяной промывки (J): 2 – 10 л/с·м<sup>2</sup>.

Определим пределы изменения показателей процесса, подставив граничные значения факторов в (12) – (15): продолжительность полезного фильтрования ( $T_{пф}$ ): 21,4 – 40,3 ч; отношение остаточных загрязнений по перманганатной окисляемости  $C_{ост}^{ПО} / C_{исх}^{ПО}$  : 0,231 – 0,519, что соответствует эффекту доочистки 48,1 – 76,9 %;  $C_{ост}^{ХПК} / C_{исх}^{ХПК}$  : 0,249 – 0,523, что соответствует эффекту очистки 47,7- 75,1 %; то же по взвешенным веществам:  $C_{ост}^{ВВ} / C_{исх}^{ВВ}$ : 0,03 – 0,43, что соответствует эффекту очистки 57 – 97 %.

Для оценки «узких» мест в режимах эксплуатации очистных сооружений сточных вод и на ее базе установления ранга, последовательности проведения и очередности финансирования работ по выводу объекта на нормативные показатели Национальным агентством по охране окружающей среды США предложена методика ранжирования, которую мы адаптировали и дополнили применительно к Российским условиям. Проведя обследование очистных сооружений пос. Несветай ГРЭС, где для доочистки БОСВ применяются биологические пруды, на базе этой методики установили, экономическую и экологическую целесообразность внесения в технологию ершовоантрацитовых фильтров.

По полученным расчетным зависимостям запроектированы, изготовлены и смонтированы фильтры доочистки на очистных сооружениях пос. Головинка (г. Сочи) и г. Красный Сулин (Ростовская обл.).

Анализ данных эксплуатации фильтров в течение 1,5 года показал, что при отсутствии внезапных отказов, чаще всего это отключение электроэнергии, - режим работы фильтров стабильный, прост и надежен в эксплуатации, а показатели состава после доочистки БОСВ в основном

соответствуют нормам (табл. 4) В процессе эксплуатации уточнены грязеемкость, время промывки фильтров и концентрации взвесей в промывной воде, необходимые как для контроля, так и составления баланса по твердой фазе, что требуется для расчета и размещения отходов.

Таблица 4

Сравнительные усредненные показатели работы очистных сооружений с доочисткой на ершовых (2000 г.) и ершовоантрацитовых фильтрах (2001 г.)

Год	БПК <sub>5</sub> , мг/л		Э, %	ВВ, мг/л		Э, %	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> , мг/л		Э, %	PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> , мг/л		Э, %
	вх	вых		вх	вых		вх	вых		вх	вых	
2000	68,8	4,66	87,3	68,8	3,93	94,3	14,7	0,32	97,8	7,68	3,38	89,8
2001	67,4	3,14	95,1	63,4	2,72	95,7	12,0	0,14	98,8	6,5	2,35	91,8

Примечание Во всех случаях на выходе концентрации нитритов в очищенных водах не превышали 0,012 мг/л, а нитратов составляли 4,5 – 7,5 мг/л

В настоящее время только на единичных очистных станциях в России имеется автоматизированный контроль состава поступающих и очищенных сточных вод, по данным которого ведется оперативное управление процессом. При принятом на большинстве станций «ручном» методе анализа сточных вод сведения о составе чаще всего служат для отчета перед контролирующими органами, чем для оперативного управления режимом.

Нами обоснован и применен для оперативного технологического управления на очистных сооружениях сточных вод пос. Головинка статистический экспресс-контроль показателей состава сточных вод на основе корреляции с перманганатной окисляемостью (ПО). (Время анализа ПО не более 10 мин). Для этого были сформированы статистические ряды, увязывающие ПО с БПК<sub>5</sub>, азотом аммонийным, нитратами, фосфатами и взвешенными веществами. В программе Microsoft EXCEL ряды проанализированы с помощью линейных, логарифмических, степенных, экспоненциальных и полиномиальных зависимостей по величине коэффициента детерминации R<sup>2</sup>. При этом в соответствии с правилами статистики полагали, что устойчивая связь между случайными событиями наблюдается при R > 0,7, т. е. R<sup>2</sup> > 0,49.

Статистически достоверные зависимости получены для описания содержания компонентов в биологически очищенных и доочищенных сточных водах (во всех случаях  $R^2 = 0,51 - 1,0$ ). Например, зависимость концентрации взвешенных веществ (у) от ПО (х) имеет вид:  $y = 0,8043x - 0,7371$  ( $R^2 = 0,92$ ). Таким образом, представление в виде статистических зависимостей данных эксплуатации позволит не только оперативно реагировать на изменения в составе сточных вод, но и экономить затраты на химанализы. К тому же в перспективе эти зависимости могут составить в основу компьютерного управления очисткой воды.

На базе экспериментально полученных материалов и теоретических положений выполнена оценка РЭП ершевоантрацитовых фильтров для доочистки БОСВ и проведено ее сравнение с двухслойными фильтрами (табл. 5), рекомендованными СНИП.

Таблица 5

## Частные ресурсно-экологические оценки процесса доочистки

Компонент процесса	Наименование коэффициента	Частные оценки процесса доочистки БОСВ на фильграх			
		ершевоантрацитовых		двухслойных	
		количественное	качественное	количественные	качественные
РЕ-СУРСНЫЙ	Ркпф	0,55	Средняя	0,65	Удов
	Ркпа	0,30	Хорошая	1,0	Достаточ.
	Рвпа	0,83	Достаточ	1,0	Достаточ
	Рпрв	0,09	Высокая	1,0	Достаточ
ЭКОЛОГИЧЕСКИЙ	Эанв	0,72	Средняя	0,88	Пред доп
	Эанл	1,04	Опасная	1,0	Пред доп
	Эана	0,57	Удов	1,0	Пред доп
	Кээц	0,37	Слабая	0,45	Удов
	Эако	0,46	Удов	1,0	Пред доп

Рассмотрим структуру и величины РЭП:

1. Ресурсная компонента доочистки БОСВ на ершовоантрацитовых фильтрах  $RЭП_{\text{реаф}} = \sqrt[4]{0,55 \cdot 0,30 \cdot 0,83 \cdot 0,09} = 0,33$ ; на двухслойных фильтрах:  $RЭП_{\text{рдф}} = \sqrt[4]{0,65 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0} = 0,90$ .
2. Экологическая компонента доочистки БОСВ на ершовоантрацитовых фильтрах:  $RЭП_{\text{эсаф}} = \sqrt[5]{0,72 \cdot 1,0 \cdot 0,57 \cdot 0,37 \cdot 0,46} = 0,59$ ; на двухслойных фильтрах:  $RЭП_{\text{эсаф}} = \sqrt[5]{0,88 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,45 \cdot 1,0} = 0,83$ .

По данным табл.5 вычислим обобщенный РЭП процесса доочистки:

РЭП ершовоантрацитовых фильтров:

$$RЭП_{\text{са}} = \sqrt[9]{0,55 \cdot 0,30 \cdot 0,83 \cdot 0,09 \cdot 0,72 \cdot 1,0 \cdot 0,57 \cdot 0,37 \cdot 0,46} = 0,46;$$

РЭП двухслойных фильтров:

$$RЭП_{\text{дф}} = \sqrt[9]{0,65 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,88 \cdot 1,0 \cdot 1,0 \cdot 0,45 \cdot 1,0} = 0,86.$$

По величине обобщенного РЭП (0,46) процесс доочистки БОСВ на ершовоантрацитовых фильтрах характеризуется как «средняя» степень ресурсосбережения и воздействия на окружающую среду, а на двухслойных фильтрах (0,86) - как «сильная». Тогда доочистка БОСВ на ершовоантрацитовых фильтрах в (0,86 / 0,46) 1,87 раза более эффективна, чем рекомендуемое СНИП применение для этой цели двухслойных фильтров. По значениям удельных вкладов компонент в величину обобщенного РЭП наибольшую долю вносит ресурсная составляющая процесса, которая не учитывается в настоящее время при технико-экономическом и экологическом обосновании выбора технологий. Поэтому методология обоснования и выбора по РЭП, на наш взгляд, может быть распространена и на другие технологические природоохранные процессы.

### 3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Научно обосновано, что ресурсно-экологический потенциал является обобщенной характеристикой ресурсосбережения и снижения воздействия на окружающую среду при доочистке БОСВ и может применяться для оптимального выбора сравниваемых проектных вариантов.
2. Выдвинута гипотеза и получено экспериментальное подтверждение участия углерода и оксидов переходных металлов из антрацитов в катализе

окислительно-восстановительных реакций при доочистке БОСВ. За счет этого достигается улучшение показателей доочистки сточных вод на антрацитах по сравнению с песчаной загрузкой в 1,09 – 1,63 раза.

3. Получена математическая модель и предложена инженерная методика расчета ершевоантрацитовых фильтров, по которой запроектированы и эффективно эксплуатируются на двух очистных станциях в течение полутора лет антрацитовые фильтры доочистки БОСВ. Методика принята рядом проектных институтов, что подтверждено актами внедрений.

4. Антрациты шахты «Обуховская» соответствуют всем требованиям, предъявляемым к фильтрующим загрузкам фильтров для очистки вод, и имеют технологические преимущества перед песком. На основе наших исследований разработаны Технические условия, а ООО ПКФ «Синтез» наладила промышленный выпуск фильтрующих загрузок.

5. Промывка загрузки производственных фильтров на 90 – 95 % достигается в течение 5 – 6 минут с интенсивностью 6 – 8 л/с м<sup>2</sup>. При нисходящем режиме фильтрования ерши, помимо функции префильтра, способствуют отмывке загрязнений с поверхности загрузки и препятствуют выносу антрацита при промывке.

6. Статистическим анализом данных эксплуатации показана возможность оперативного управления режимом очистки на основе контроля лишь перманганатной окисляемости в сточных водах. Получены аппроксимирующие зависимости, которые в перспективе могут быть положены в основу компьютерного управления режимом очистки вод.

7. Показано, что оперативный эколого-менеджерский анализ работы очистных сооружений является информативным инструментарием для выявления проблемных узлов и ранжирования приоритетных модификаций режимов или аппаратов очистки на станции. На основании такого анализа на одной из очистных станций обоснована замена существующих прудов доочистки на антрацитовые фильтры.

8. По величине обобщенного РЭП (0,46) процесс доочистки БОСВ на ершвоантрацитовых фильтрах характеризуется как «средняя» степень ресурсосбережения и воздействия на окружающую среду, на двухслойных фильтрах (0,86) - как « сильная», т.е. доочистка БОСВ на ершвоантрацитовых фильтрах в 1,87 раза более эффективна.

#### 4. СПИСОК ОСНОВНЫХ ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

1. Вильсон Е. В., Марочкин А.А. Применение донских антрацитов в процессах очистки воды // «Строительство – 2000»: Материалы Междунар. научно –практич. конф. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2000. –31 с. (объем автора - 50%).
2. Вильсон Е. В., Марочкин А. А., Садовников А. Ф. Оптимизация доочистки биологически очищенных сточных вод на антрацитах шахты «Обуховская» / Материалы IV Междунар науч.-практ. конф. «Человек и окружающая среда - проблема взаимодействия». – Пенза, 2001, с. 115 – 117 (объем автора – 50%).
3. Вильсон Е. В., Марочкин А. А., Садовников А. Ф. Применение фильтрующих материалов марки «Пуrolат» в процессах очистки воды // «Строительство – 2001»: Материалы Междунар. науч. –практ. конф. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2001. –16 с. (50%)
4. Serpokrilov N.S., Vilson E.V., Marochkin A.A., Sadovnikov A.F // Optimizacion del tratamiento terciario de aguas residuales en filtro compuesto (esperiencia rusa). - Memorias del I congreso estatal. – Queretaro, Mexico, 2001. – P. 12 – 18 (35%).
5. Вильсон Е.В, Марочкин А.А., Серпокрьлов Н.С.. Ресурсно-экологический потенциал доочистки биологически очищенных сточных вод фильтрованием через антрацитовую загрузку: / Материалы IV Междунар. науч.-практ. конф. «Человек и окружающая среда – проблема взаимодействия». – Пенза, 2002, с. 219 – 221 (50%).
6. Марочкин А. А. Результаты производственных исследований доочистки биологически очищенных сточных вод на трехслойном фильтре // «Строительство – 2002»: Материалы Междунар. науч. –практ. конф. – Ростов н/Д: Рост. гос. строит. ун-т, 2002. – С. 16 – 17.
7. Марочкин А. А., Макаридзе И. Н. Регулирование режимов очистки на базе статистических данных анализов сточных вод // Там же. С. 21- 23 (60%).
8. Серпокрьлов Н. С., Куликов Н. И., Марочкин А. А., Зубов М.Г. Решение РОСПАТЕНТА от 10.12.01г. выдаче патента РФ “Фильтр для очистки природных и доочистки сточных вод” по заявке 2001118500/12(019613), (30%).

### 5. УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

$U$  - скорость реакции на твердом катализаторе;  $dn_i$  - изменение концентрации вещества;  $m_k$  - масса катализатора;  $\tau$  - время процесса;  $k_0$  - предэкспоненциальный множитель;  $E$  - энергия активации молекул;  $R$  - универсальная газовая постоянная;  $T$  - температура;  $F^1$  - удельная поверхность катализатора,  $m^2/g$ ;  $\Delta C$  - изменение концентрации веществ за время процесса;  $N_m$  - нагрузка  $i$ -го компонента загрязнений на 1 г антрацита;  $\Delta C_i$  - разница концентраций  $i$ -го компонента с момента начала и конца фильтрования;  $m_a$  - масса антрацита;  $N_o$  - нагрузка  $i$ -го компонента загрязнений на  $1m^3$  антрацита;  $W_a$  - объем антрацита;  $Kч_i^{РЭП}$  - частный коэффициент ресурсно-экологического потенциала;  $h_{\phi}$  - высота лабораторной модели фильтра;  $h_{загр}$  - высота загрузки антрацита;  $d_a$  - диаметр зерен антрацита;  $X_1$  - высота загрузки антрацита фракции, 2-5мм;  $X_2$  - высота загрузки антрацита фракции 0,8-1,6 мм;  $X_3$  - высота ершовой загрузки, мм,  $X_4$  - скорость фильтрования, м/ч;  $X_5$  - продолжительность водяной промывки загрузки, мин;  $X_6$  - продолжительность продувки загрузки воздухом, мин;  $X_7$  - интенсивность водяной промывки, л/с  $m^2$ ;  $Y_1$  - продолжительность фильтрования до достижения заданных потерь напора, час; эффективность доочистки БОСВ:  $Y_2$  - параметр оптимизации от легко окисляемых органических примесей по перманганатной окисляемости (ПО);  $Y_3$  - параметр оптимизации от суммы органических и неорганических веществ в восстановленной форме по ХПК;  $Y_4$  - то же, от взвешенных веществ;  $h_{д2-5}$  - высота слоя антрацита фракции 2 - 5 мм;  $h_{д0.8-1.6}$  - высота слоя антрацита фракции 0.8-1.6мм;  $h_{ерш}$  - высота слоя ершей ;  $V$  - скорость фильтрования;  $\tau_{вд}$  - время водной промывки;  $\tau_b$  - время продувки загрузки воздухом при регенерации;  $J$  - интенсивность водяной промывки;  $T_{пф}$  - продолжительность полезного фильтрования;  $C_{ост}^{ПО} / C_{исх}^{исх}$  - отношение остаточных загрязнений по перманганатной окисляемости;  $C_{ост}^{ХПК} / C_{исх}^{ХПК}$  - отношение остаточных загрязнений по ХПК;  $C_{ост}^{ВВ} / C_{исх}^{ВВ}$  - то же по взвешенным веществам;  $РЭП_{ресф}$  - ресурсная компонента ершовоантрацитовых фильтров;  $РЭП_{ресф}$  -- ресурсная компонента двухслойных фильтров;  $РЭП_{ээф}$  - экологическая компонента доочистки на ершовоантрацитовых фильтрах;  $РЭП_{ээф}$ -экологическая компонента доочистки на двухслойных фильтрах;  $РЭП_{са}$  - обобщенный РЭП процесса доочистки на ершовоантрацитовых фильтрах;  $РЭП_{дф}$  - обобщенный РЭП процесса доочистки на двухслойных фильтрах.

ЛР 020818 от 13.01.99. Подписано в печать 15.04.02. Формат 60x84/16. Бумага белая. Ризограф. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 91.

Редакционно-издательский центр  
Ростовского государственного строительного университета  
344022, г.Ростов-на-Дону, 22, ул.Социалистическая, 162.