

## Hybrid Technology of Water Purification Based on the Method of Dosing Sorption Material for Water Treatment Systems of Thermal Power Plants and Water Supply

Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Chichirov A.A., Kamaliev R.F.

Kazan State Power Engineering University  
Kazan, Russian Federation

**Abstract.** The work is devoted to the problem of water purification during the flowering of phytoplankton, as well as during salvo pollution by industrial effluents. Anthropogenic load significantly reduces the efficiency of purification according to the current technology, therefore, additional post-treatment methods must be used to obtain purified water of the required quality. The purpose of this article is to substantiate the choice of a sorbent within the framework of the considered water treatment technology, as well as to determine the optimal effective dosage of its dosing. This goal is achieved by implementing the following tasks: analysis of powdered sorption materials used in water treatment technology, selection of an effective dose and entry point of the selected sorption material based on experimental studies, analysis of the results obtained; and development of technical solutions for the organization of a hybrid purification plant. The most important results are: determination of the optimal dose of coal pulp and the frequency of dosing to maintain the required quality of purified water; and determination of key water quality indicators affected by treatment with activated carbon. The achievement of these results made it possible to determine the main technological features of the water purification method and determine the possibility of combining it with other purification technologies. The significance of the results obtained lies in the fact that new technical solutions have been proposed to improve the efficiency of water treatment facilities during a period of drastic changes in water quality at a water source.

**Keywords:** carbonization method, drinking water, coal pulp, powdered coal grade OU-A.

DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2024.3-63.02>

UDC: 628.16

### Tehnologie hibridă de purificare a apei pe baza metodei de dozare a materialului de sorbție pentru sistemele de tratare a apei din centralele termice și alimentarea cu apă

Filimonova A.A., Vlasova A.Yu., Chichirov A.A., Kamaliev R.F.

Universitatea de Stat de Inginerie Energetică din Kazan, Kazan, Federația Rusă

**Rezumat.** Lucrarea este dedicată problemei epurării apei în timpul înfloririi fitoplanctonului, precum și în timpul poluării salve cu efluenții industriali. Încărcarea antropică reduce semnificativ eficiența epurării conform tehnologiei actuale, prin urmare, trebuie utilizate metode suplimentare de post-tratare pentru a obține apă purificată de calitate necesară. Scopul lucrării este de a fundamenta alegerea unui sorbent în cadrul tehnologiei de tratare a apei luate în considerare, precum și de a determina dozarea eficientă optimă a dozării acestuia. Acest obiectiv este atins prin implementarea următoarelor sarcini: analiza materialelor de sorbție pulbere utilizate în tehnologia de tratare a apei, selectarea unei doze eficiente și a punctului de intrare a materialului de sorbție selectat pe baza unor studii experimentale, analiza rezultatelor obținute și dezvoltarea soluției pentru organizarea unei stații de epurare hibridă. Cele mai importante rezultate sunt: determinarea dozei optime de pastă de cărbune și a frecvenței de dozare pentru a menține calitatea necesară a apei purificate, determinarea indicatorilor cheie de calitate a apei afectați de tratarea cu cărbune activ. Obținerea acestor rezultate a făcut posibilă determinarea principalelor caracteristici tehnologice ale metodei de purificare a apei și determinarea posibilității combinării acestora cu alte tehnologii de purificare. Semnificația rezultatelor obținute constă în faptul că s-au propus noi soluții tehnice pentru îmbunătățirea eficienței instalațiilor de tratare a apei într-o perioadă de modificări drastice ale calității apei dintr-o sursă de apă.

**Cuvinte-cheie:** metoda de carbonizare, apă potabilă, pastă de cărbune, cărbune sub formă de pulbere OU-A.

**Гибридная технология очистки воды на основе метода дозирования сорбционного материала для систем водоподготовки тепловых электростанций и водоснабжения  
Филимонова А.А., Власова А.Ю., Чичиров А.А., Камалиева Р.Ф.**

Казанский государственный энергетический университет, Казань, Российская Федерация

**Аннотация.** Работа посвящена проблеме очистки воды в период цветения фитопланктонов, а также во время залповых загрязнений промышленными стоками. Антропогенная нагрузка существенно снижает эффективность очистки по действующей технологии, поэтому для получения очищенной воды требуемого качества необходимо использовать дополнительные методы доочистки. Так метод обработки воды активным углем является перспективным способом доочистки, так как технология проста в эксплуатации и легко комбинируется с действующим способом очистки. Целью данной статьи является обоснование выбора сорбента в рамках рассматриваемой технологии подготовки воды, а также определение оптимальной эффективной дозы его дозирования. Поставленная цель достигается за счет реализации следующих задач: анализ применяемых порошкообразных сорбционных материалов в технологии подготовки воды, подбор эффективной дозы и точки ввода выбранного сорбционного материала на основе экспериментальных исследований, анализ полученных результатов и разработка технических решений организации гибридной установки очистки. Наиболее важными результатами являются: определение оптимальной дозы угольной пульпы и кратность дозирования для поддержания требуемого качества очищенной воды, определение ключевых показателей качества воды, на которые влияет обработка активным углем. Достижение данных результатов позволило определить основные технологические особенности проведения метода доочистки воды и определить возможность комбинирования с другими технологиями очистки. Значимость полученных результатов состоит в том, что предложены новые технические решения повышения эффективности очистки водоподготовительных сооружений в период резких изменений качества воды в водоисточнике. Проведенные исследования позволили расширить знания в области подготовки питьевой воды и определить ключевые показатели качества воды, на которые влияет метод обработки воды активным углем.

**Ключевые слова:** метод обработки активным углем, вода питьевого качества, угольная пульпа, порошкообразный уголь марки ОУ-А.

## ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день качество воды в поверхностных водоисточниках постоянно ухудшается в результате активной промышленной деятельности человека. Особенно это заметно на промышленно развитых территориях, где водоисточники испытывают высокую антропогенную нагрузку [1]. Часто в реки сбрасываются техногенные отходы и чем больше развито водопотребление на протяжении всего течения, тем больше риск обнаружения промышленных стоков. С определенной периодичностью в реку сбрасываются недостаточно очищенные и загрязненные сточные воды. Так, антропогенная нагрузка негативно сказывается на качестве воды в водоисточнике и на протяжении многих лет характеризуется по степени загрязненности согласно классификации ISO 8689-1,2-2000. При этом характерными загрязняющими веществами являются соединения меди, азота и легко и трудно окисляемые органические вещества [3-6]. При увеличении концентраций загрязняющих веществ фитопланктон сразу же реагирует на условия изменения окружающей среды. В результате процесса фотосинтеза фитопланктона в воду выделяется кислород, а при избыточном его

развитии происходит «цветение» воды и как следствие резкое ухудшение показателей качества в период июль-август. Требуется разработка и внедрение дополнительных установок, позволяющих очистить воду до нормируемых значений.

Водоподготовка для тепловых электростанций и систем водоснабжения отличается требованиями к качеству очищенной воды. Вода, используемая в качестве теплоносителя на ТЭС должна быть деминерализованной, поэтому проходит две стадии очистки: предварительную ступень удаления органических примесей и обессоливание. Вода для систем водоснабжения должна быть питьевого качества и удовлетворять физико-химическим и бактериологическим показателям. Объединяет эти два способа очистки, то, что предварительная обработка воды для ТЭС и система подготовки воды для водоснабжения протекают по одной схеме: химическая обработка с помощью коагулянтов и флокулянтов и последующая фильтрация на механических фильтрах. При ухудшениях показателей качества воды в водоисточнике нагрузка одинаково увеличивается на обе системы очистки.

Для разработки эффективных решений по дополнительной очистке необходимо проанализировать состояние водосточника и определить причины резкого увеличения некоторых значений показателей, таких как химическое потребление кислорода (ХПК) и перманганатная окисляемость (ПО). При значениях ХПК = более 50 мг/л и ПО более 10 мгО/л очистные сооружения с действующей технологией не могут эффективно справиться с загрязнениями, даже при значительном увеличении дозы химических реагентов (коагулянт и флокулянт). Цель работы заключалась в разработке гибридной технологии, которая позволит поддерживать уровень очистки воды, независимо от изменения количественного состава исходной воды.

Практическая ценность данной работы заключается в том, что предлагаемое технологическое решение гибридной технологии позволит в короткие сроки и при небольших затратах решить проблему ухудшения качества очистки природной воды. Решение является безопасным, экономически целесообразным, а также простым в эксплуатации. Апробированы в промышленных условиях и обоснованы дозировки сорбционного материала. А также предложены рекомендации по точке ввода раствора сорбирующей суспензии.

Научная новизна работы заключается в решении научно-прикладных задач, направленных на повышение качества очистки воды как в период «цветения», так и в период залповых антропогенных выбросов в результате воздействия сорбционного активированного угля ОУ-А, а также определена эффективная доза с учетом качественного состава исходной воды.

В работе обоснованы и сформулированы принципы выбора сорбционных материалов для реализации технологического решения.

## I. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Высокая концентрация загрязняющих веществ в исходной воде всегда является основной проблемой для получения качественной очищенной воды.

Adenes Teixeira Alves [7] занимался вопросами очистки воды с применением сорбционного материала – активированного угля.

Благодаря своей высокой адсорбционной эффективности, сорбция активированным углем признана лучшей технологией очистки воды [8-9].

Очистка активированным углем на водоочистных станциях обычно устанавливается для удаления природных органических соединений, улучшения органолептических показателей (вкуса и запаха), а также удаление синтетических органических химикатов. Адсорбция активированного угля происходит благодаря физическим процессам, соединяет молекулы газовой или жидкой фазы с поверхностью активированного угля. [10]. Активированный уголь является эффективным адсорбентом, поскольку он представляет собой высокопористый материал и обеспечивает большую площадь поверхности, на которой могут адсорбироваться загрязнения [11-13].

Компании Veolia Water Solutions и Technolodge Seaport предложили метод очистки воды, который включает предварительное взаимодействие воды с порошкообразным активным углем в концентрации от 0,5 до 10 г/л, затем флокуляцию с образованием утяжеленных хлопьев. Затем происходит осаждение и удаление смеси осадка, балласта и порошкообразного адсорбента из нижней зоны осаждения, которая направляется в гидроциклон, а обработанная вода удаляется из верхней зоны осаждения. Балласт из гидроциклона возвращается в зону флокуляции, а иловая смесь и порошок сорбент частично возвращаются в зону предварительной обработки, куда добавляется новый сорбент при снижении концентрации угля ниже 0,5 г/л. Затем следует этап подкисления суспензии адсорбента [14]. Таким образом, использование этого метода позволяет возвращать часть отработанного адсорбента и добавлять необходимое количество свежей суспензии для получения качественной воды, что снижает расход адсорбента и уменьшает количество операций обработки воды для повышения ее качества.

Для проведения эффективной очистки Феофанов Ю.А. [15] предложил использовать коагулянт оксихлорид алюминия и высокомолекулярный флокулянт без предварительного хлорирования в периоды повышенной концентрации органических веществ в исходной воде, что позволит повысить эффективность предочистки более

чем на 10%. Ограничениями при использовании химических реагентов являются остаточная концентрация компонентов в очищенной воде. Также были проведены эксперименты промышленного масштаба Николаевой Т.А. и Плетниковой И.П., которые показали, что увеличение дозы коагулянта на 20–25% и введение полиакриламида концентрацией 0.35 мг/л значительно повышает эффективность очистки от взвешенных веществ и нефтепродуктов.

Другой способ улучшения качества очистки базируется на процессе озонирования воды с дозой озона 4 мг/л. Данный способ был предложен для удаления фенолов и поверхностно-активных веществ. Но исследования, проведенные на водах с различным качественным и количественным составом, показали, что, в зависимости от способа обработки, возможно, как разложение исходных веществ, так и образование более токсичных продуктов [16].

Но существуют и другие методы достижения высокого качества подготовки воды. Один из таких методов включает этапы первичного хлорирования, коагуляции и последующей очистки в отстойниках или осветлителях от взвешенных веществ и фильтрации, а также сорбции активными углями и вторичного хлорирования. Этот метод описан зарубежными авторами Robert M. Clark и др. [17] и отечественными учеными Ф.А. Шевелевым и Г.А. Орловым [18]. Однако на этапе первичного хлорирования образуются тригалогенметаны, а в случае наличия трудноокисляемых органических соединений в исходной воде наблюдается недостаточный эффект очистки. Кроме того, этот метод требует сложного процесса регенерации угля после 3–6 месяцев его использования.

Л.А. Кульский [19] описывает метод очистки, который включает первичное озонирование, реагентную очистку в отстойниках и фильтрах, а также доочистку порошковым угольным сорбентом, который подается в трубопровод перед насосной станцией первого подъема и песчаными скорыми фильтрами. Однако, добавление активного угля на этом этапе снижает эффективность пост-адсорбционной очистки, способствует быстрому увеличению потерь напора в загрузке и сокращает продолжительности фильтроцикла.

Шенфельд, Райк [20] предложили способ очистки воды, осуществляемый при помощи адсорбции в установке водоочистки, включающей одно основное адсорбционное устройство и адсорбционное устройство для пиковой нагрузки, которое включается при превышении заданного значения концентрации загрязнений и располагается выше по потоку от основного адсорбционного устройства. Адсорбционные устройства содержат неподвижный слой дисперсного активированного угля. Несмотря на уменьшение риска десорбции, использование этого метода не исключает возможность ее возникновения. Основным преимуществом внедрения адсорбционного устройства для пиковой нагрузки является отсутствие скачков загрязнений и увеличение срока службы установки водоочистки.

В качестве адсорбентов могут быть использованы различные материалы, как природного, так и синтетического происхождения. Наиболее важные характеристики адсорбентов для систем водоподготовки:

- площадь поверхности материала. Чем больше площадь поверхности адсорбента, тем выше его адсорбционная емкость;
- размер пор. Чем больше процентное содержание микропор, тем выше адсорбционные свойства и скорость поглощения;
- гидродинамические характеристики обмена (скорость фильтрации, время контакта между фазами).
- природа происхождения адсорбента и его строение.

А.В. Тарасевич [21] предложил процесс фильтрации исходной воды через адсорбент, содержащий графен и/или углеродные нанотрубки, а затем через мембрану с порами диаметром от 0,005 до 0,3 мкм. Изобретение позволяет повысить эффективность и надежность очистки воды и снизить ее стоимость. Вода после прохождения процесса очистки сохраняет свой минеральный баланс и становится более биологически активной, что позволяет использовать ее для питьевых и медицинских целей, а также для проведения различных водных процедур и в сельском хозяйстве.

Войтов Е.Л. и Сколубович Ю.Л. [22] предложили использовать специальную станцию водоподготовки, которая включает контактную камеру, осветлитель, скорый

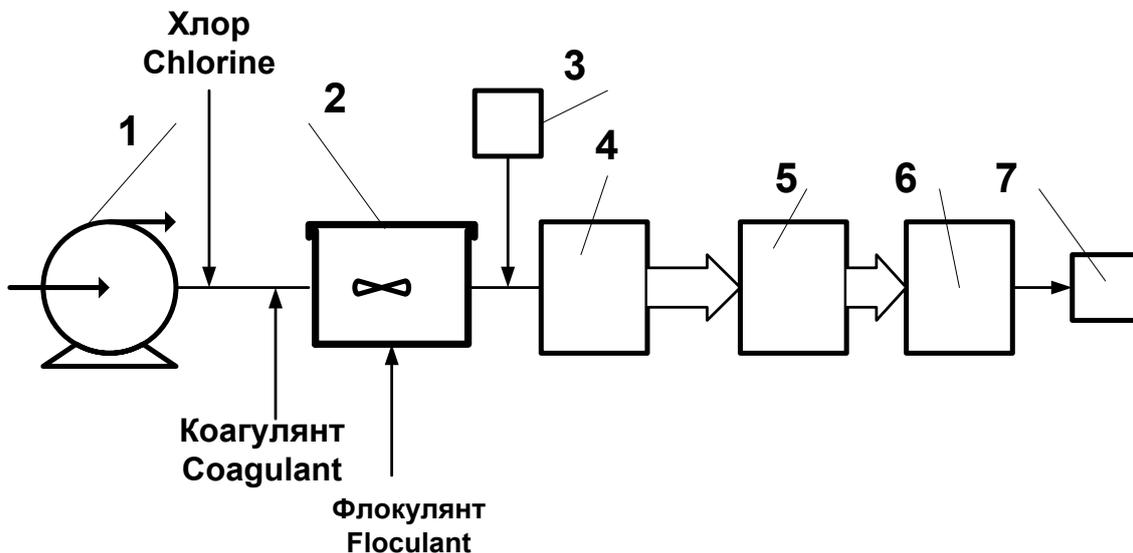
фильтр, бак чистой воды, сетевой насос, блок озонирования и хлорирования, установку коагулирования, резервуар-усреднитель промывной воды, сгуститель, фильтр-пресс, шламовый насос, эжектор-распылитель, аэратор-окислитель, блок питания, вентилятор, воздухоудку, бустерный насос, воздухоотделитель, установку флокулирования, промывной эжектор, отстойник контактной массы, сорбционный фильтр, загруженный гранулированным активным углем, промывной насос и насос для осветленной воды. Использование данной системы позволяет повысить технологическую и экономическую эффективность очистки сырой воды, а также обеспечить экологическую безопасность станции водоподготовки.

В результате анализа литературных данных можно сделать вывод, что технологии улучшения качества очистки включают эффективные методы адсорбции, окисления, коагуляции, которые должны быть экологически безопасными. Однако, внедрение рассмотренных методов требует кардинальных изменений действующих стандартов водоподготовки, что в свою очередь, ведет к большим капитальным затратам. Поэтому в данной работе

представлена технология очистки воды с минимальными изменениями в существующей схеме системы водоподготовки. Данная технология включает- простое оборудование и легко транспортируется блоком в собранном состоянии. В работе также приведены результаты промышленного эксперимента метода обработки воды с применением двух крайних доз угольной пульпы (минимальная и максимальная).

## II. МЕТОДИКА ПРОМЫШЛЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения промышленного эксперимента на станции очистки воды с целью поддержания показателей качества органической загрязненности водоема на нормативном уровне, за основу была взята действующая технология с возможностью отключения от основного потока части оборудования. Эксперимент проводился на одном из линий второй ступени очистки. Был выбран механический фильтр, на котором проводились испытания и второй фильтр, работающий в обычном режиме, для сравнения. Исходя из расположения были выбраны соседние фильтры (рис. 1).



1. Насосная станция.
2. Емкость с мешалкой.
3. Установка дозирования активного угля.
4. Отстойники.
5. Механические фильтры.
6. Озонаторная установка.
7. Резервуар чистой воды.

Рис. 1. Технологическая схема опытно-промышленного эксперимента.

1. Pumping station 1 lifting.
2. Vessel with mixer.
3. Active carbon dosing unit.
4. Settling tanks.
5. Mechanical filters.
6. Ozonation plant.
7. Clean water tank.

Fig. 1. Technological scheme of a pilot industrial experiment.

Действующая технология подготовки воды предполагает забор из водоемисточника на станции первого подъема, далее направляется на фильтровальную станцию. На вход смесителей в водные потоки подаются следующие реагенты: хлор с дозой 3 мг/л, коагулянт сернокислый алюминий с дозой по товарному продукту 300 мг/л и флокулянт Floram AN 905 PWG с дозой 0,2 мг/л. Стоит отметить, что промышленный эксперимент проводился в конце июля и дозировки реагентов полностью соответствуют рабочим. После смесителей вода самотеком направляется в камеры реакции и далее в горизонтальные отстойники, где происходит удаление основного количества взвешенных веществ и окрашенных примесей. После отстойников вода направляется на механические фильтры. После механических фильтров вода направлялась на озонаторную установку и затем накапливалась в резервуарах чистой воды (РЧВ).

Опытно-промышленные испытания по нормированию содержания органических веществ в воде были разделены на два блока с различной дозировкой угольной пульпы, были выбраны две крайние дозы (минимальная и максимальная) 3 и 10 мг/л, соответственно. Массовый расход угольной пульпы рассчитывался на основании скорости фильтрации на механическом фильтре. Подготовка угольной пульпы осуществлялась согласно технологической схеме, представленной на рисунке 2. Очищенная вода для приготовления суспензии угольной пульпы проходит через теплообменник и нагревается до температуры 40-50 °С. Далее подогретая вода, с помощью насоса, направляется в резервуар с перемешивающим устройством, в резервуар через барабанное сито подается порошкообразный сорбционный материал. Предварительный подогрев воды положительно сказывается на эффективности процесса, с увеличением температуры уменьшается вязкость суспензии и как

следствие процесс дозирования угольной пульпы протекает легче. Далее суспензия угольной пульпы через дозирующее устройство подается в воду.

В качестве марки угля для приготовления угольной пульпы был рекомендован уголь марки ОУ-А по ГОСТ 4453-74. Выбор данной марки основывается на высокой (не менее 225 мг/1г.) адсорбционной активности по индикатору метиленовому голубому или метиленовому синему (голубому) в миллиграммах на 1 г. продукта и имеет сильно развитую общую пористость, широкий диапазон пор и большую величину удельной поглощающей поверхности (более 1200 м<sup>2</sup> в 1 г угля). Для реализации метода обработки можно использовать следующие марки активных углей: ОУ-А, ОУ-Б, ОУ-В, ОУ-Г, АДУ-В, СПДК-27Д, ЭКСТРА-СОРБ-102. Характеристики основных марок активных углей представлены в таблице 1.

По диаграмме (рис. 2) очевидно, что наилучшими характеристиками обладают угли марок: ОУ-А, СПДК-27Д, ЭКСТРА-СОРБ-102. На практике наиболее часто используются угли марок ОУ-А и СПДК-27Д. Применение других марок углей будет существенно снижать эффективность метода обработки.

Для реализации данного метода обычно используется специализированный технологический модуль контейнерного типа. Установка включает следующее оборудование и материалы: бак, перемешивающее устройство с электродвигателем, соединительный шланг с краном, фильтрующий (сорбционный) материал – уголь активный осветляющий древесный порошкообразный марка ОУ-А. Для контроля и регулирования расхода пульпы использовался кран и измерительная шкала на баке. Каждый блок испытаний был проведен по одинаковой методике с корректировкой дозы угольной пульпы.

Таблица 1.

Характеристики различных марок углей

Марка угля	Адсорбционная активность по метиленовому голубому, мг/г	Степень измельчения, остаток на сетке 0,1 К, %, не более	Удельная поглощающая поверхность, м <sup>2</sup> /1 г угля
БАУ-А	60	-	500
ОУ-А	225	5	1200
ОУ-Б	210	-	1200
ОУ-В	не нормируется	5	-
ОУ-Г	не нормируется	5	-
АДУ-В	170	-	1000

СПДК-27Д	220	5	1200
ЭКСТРАСОРЬ-102	220	5	1200

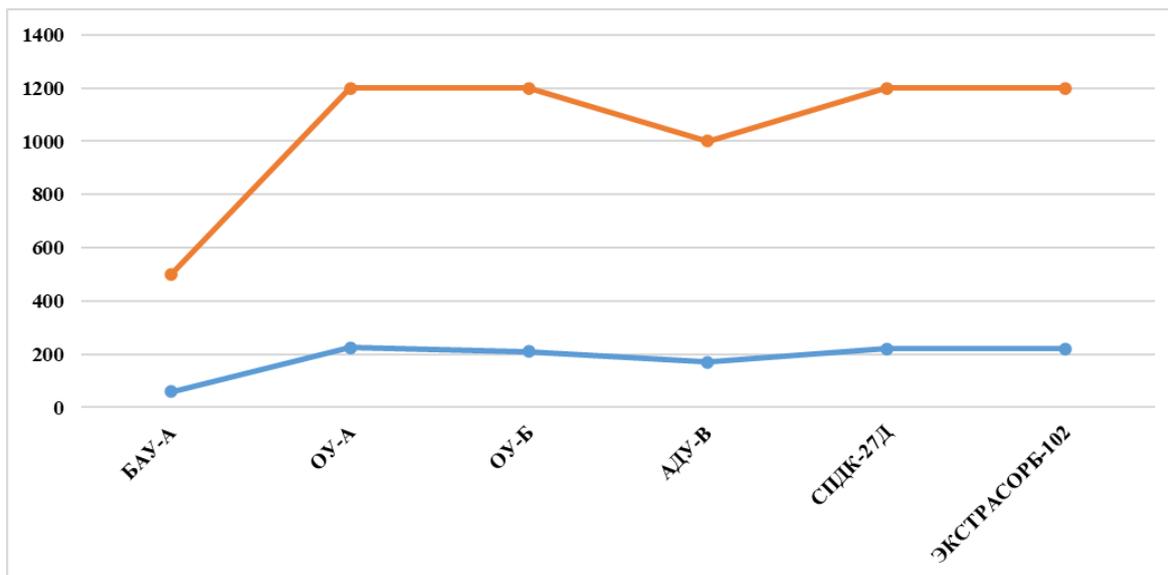
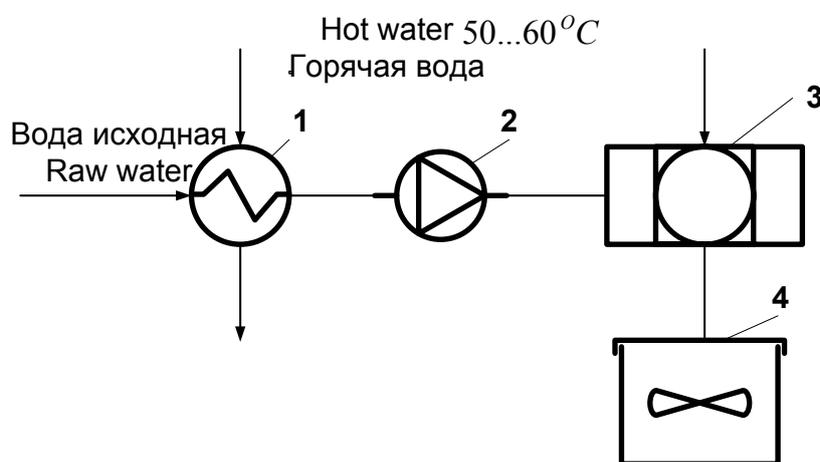


Рис. 2. Диаграмма характеристик различных марок углей.  
Fig. 2. Diagram of characteristics of various grades of coals.



1. Теплообменник 2. Насос, 3. Барабанное сито. 4. Резервуар с мешалкой.

Рис.3. Схема приготовления раствора угольной пульпы.  
Heat exchanger. 2. Pump. 3. Drum sieve. 4. Vessel with stirrer.  
Fig.3. Scheme for preparation of coal pulp solution.

Для реализации данного метода обычно используется специализированный технологический модуль контейнерного типа.

Установка включает следующее оборудование и материалы: бак, перемешивающее

устройство с электродвигателем, соединительный шланг с краном, фильтрующий (сорбционный) материал – уголь активный осветляющий древесный порошкообразный марка ОУ-А (рис. 3). Для контроля и регулирования

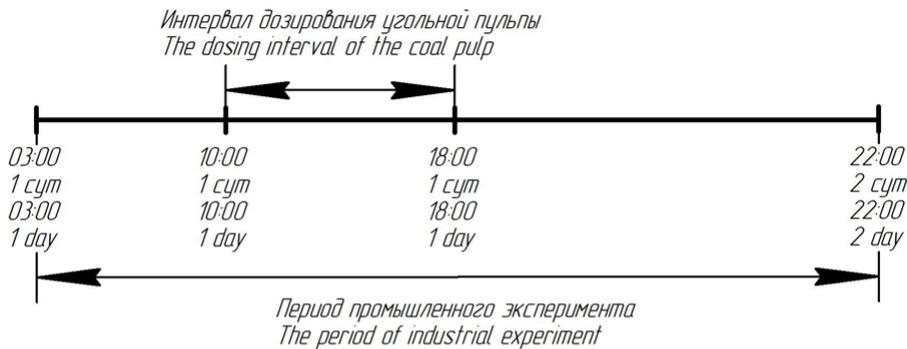
расхода пульпы использовался кран и измерительная шкала на баке. Каждый блок испытаний был проведен по одинаковой методике с корректировкой дозы угольной пульпы.

Методика испытаний заключалась в следующем: испытательный фильтр № 1 и фильтр сравнения № 2 после регенерации вводились в работу одновременно и обрабатывали в обычном режиме 8 часов. Далее в испытательный фильтр № 1 вводилась угольная пульпа в течении 8 часов работы, а фильтр сравнения работал в обычном режиме. По окончании дозирования угольной пульпы фильтр №1 работал в обычном режиме еще 32 часа (фильтроцикл 48 часов) и далее отключился на регенерацию одновременно с фильтром сравнения согласно схеме (рисунок 4). Перед проведением регенерации производился осмотр фильтров на объем насыпного материала, наличие илистых отложений на поверхности, распределение

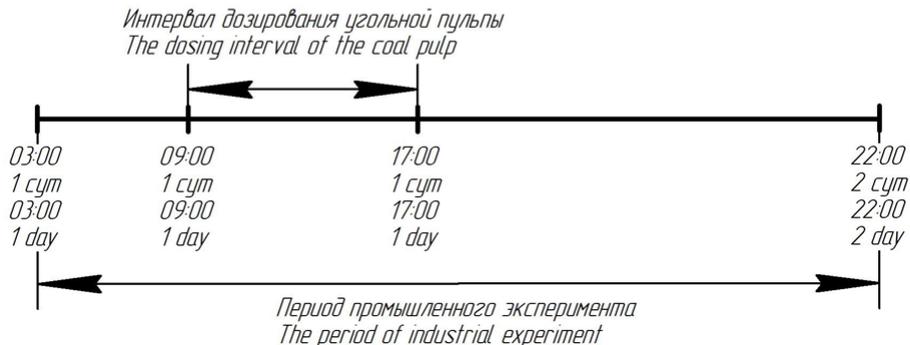
угольной пульпы по поверхности в фильтре № 1, измерена скорость фильтрации. Угольная пульпа равномерно распределилась по поверхности фильтрующего материала, не проникала на глубину более 5 см. Угольная пульпа с поверхности полностью отмывается в процессе регенерации. Время регенерации фильтра при дозировании угольной пульпы составляло не более 5 минут.

На протяжении всего эксперимента отбирались пробы воды из фильтра № 1 и фильтра сравнения № 2 согласно разработанной режимной карте. Для оценки эффективности снижения показателя органической загрязненности были выбраны следующие характеристики: цветность, мутность, остаточный суммарный хлор, перманганатная окисляемость (ПО), общий органический углерод (ООУ).

*Фильтр испытательный – дозирование 3 мг/л*  
*Test filter – dosage of 3 mg/l*



*Фильтр испытательный – дозирование 10 мг/л*  
*Test filter – dosage of 10 mg/l*



**Рис. 4. Схема промышленного эксперимента.**  
**Fig. 4. The scheme of the industrial experiment.**

Определение общего органического углерода проводилось согласно ГОСТ Р 52991–

2008 «Методы определения содержания общего и растворенного органического углерода», приводится методика определения содержания общего органического углерода в воде при помощи анализаторов углерода, принцип базируется на методе Дюма–Прегля, где проба сжигается в потоке инертного газа, а количественное определение концентрации углекислого газа производится на выходе с помощью датчика [23].

Определение ПО проводилось согласно ГОСТ Р 55684–2013 «Вода питьевая. Метод определения перманганатной окисляемости». Для определения значений цветности и мутности использовался турбидиметрический метод оценки. Остаточный суммарный хлор определялся по методике «ГОСТ Р 55683-2013. Вода питьевая. Метод определения содержания остаточного активного (общего) хлора на месте отбора проб».

Пробы, отобранные в промышленном эксперименте, анализировались в производственной лаборатории. Результаты анализов были обработаны с помощью статистических методов анализа и были вычислены основные статистические параметры невзвешенного ряда: средняя арифметическая, абсолютная погрешность, число степеней свободы, критерий Стьюдента, среднее квадратичное отклонение, дисперсия, ошибка средней арифметической, коэффициент вариации, показатель точности опыта. По результатам проведенного статистического анализа измеренные показатели качества воды являются верными ввиду большой достоверности критерия Стьюдента средней арифметической и долей ошибки средней арифметической не более 5%.

Результаты эксперимента представлены в виде гистограмм для большей наглядности эффективности метода обработки активированным углем с различными дозами.

### III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Сводные результаты лабораторных анализов воды представлены в виде гистограмм по каждому показателю на рисунках 5 – 9. Время дозирования пульпы с 10:00 до 18:00 (за первые сутки). Для получения достоверных значений и возможности проведения анализа результатов, отбор проб осуществлялся каждый час во время и после дозирования угольной пульпы.

По гистограмме (рис. 5) существенно заметно, что обработка активированным углем с дозой 10 мг/л снижает показатель цветности обработанной воды. Во время дозирования угольной пульпы наблюдается снижение цветности более чем на 35%, а после прекращения дозирования эффект от обработки углем пролонгирован еще 3-4 часа.

По полученным экспериментальным данным наблюдается снижение мутности до нормированных значений как в случае обработки воды активированным углем, так и без обработки. Согласно критериям нормативных значений, метод дозирования порошкообразного активированного угля, не влияет на показатель мутности (рис. 6).

По гистограмме (рис. 7) видно, что по традиционной технологии очистки воды (без обработки активированным углем) после механического фильтра содержание остаточного хлора снижается не более чем на 5%. При обработке высокосорбционным порошкообразным активированным углем наблюдается снижение остаточного хлора в воде, чем выше дозировка угольной пульпы, тем больше снижается концентрация остаточного хлора. Так при дозе угольной пульпы 3 мг/л, снижение остаточного хлора происходит более чем на 10% от первоначального показателя, а при дозе 10 мг/л показатель снижается более чем на 30%. Поэтому использование сорбционных методов очистки рекомендовано сочетать с процессом вторичного хлорирования.

Показатель перманганатная окисляемость является важным критерием оценки содержания органических соединений в очищенной воде. По полученным значениям можно сделать вывод, что с помощью обработки активированным углем можно добиться снижения показателя от 5 до 25%. Также в ходе эксперимента было выявлено, что установление рабочего режима осуществляется не менее чем за 4-5 часов и носит пролонгированный характер (рис. 8).

Анализ полученной гистограммы показал, что в процессе обработки активированным углем происходит снижение показателя общего органического углерода. При обработке дозой угольной пульпы 3 мг/л снижение происходит не более чем на 10%, при увеличении дозы до 10 мг/л снижение происходит более чем на 15% (рис. 9).

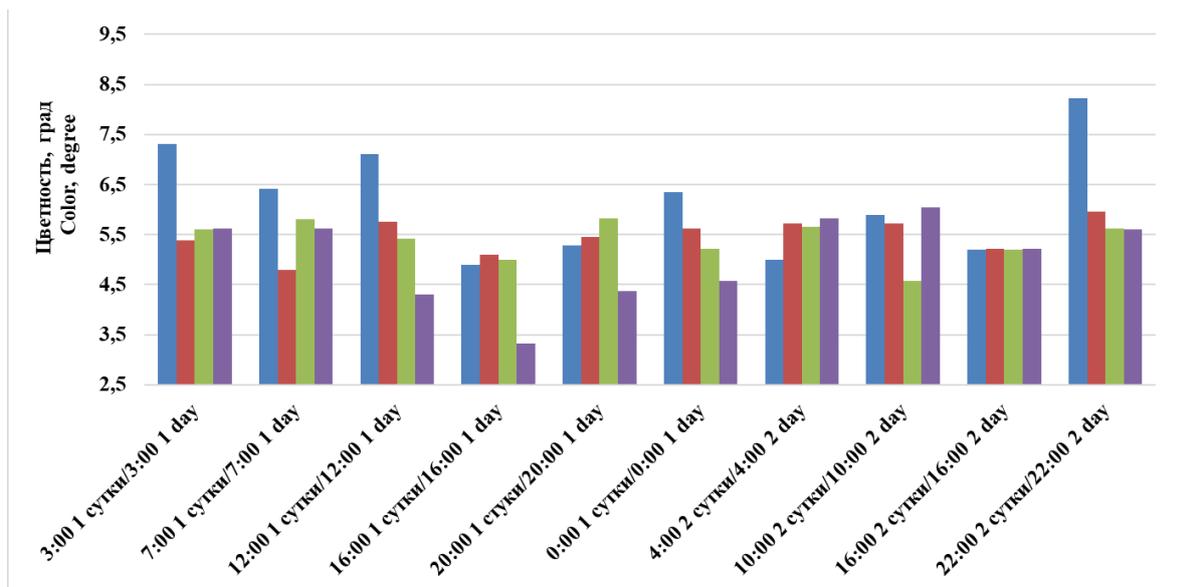


Рис. 5. Изменение показателя цветности в ходе эксперимента: синий - до фильтра, красный - после фильтра без обработки активированным углем, зеленый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 3 мг/л), фиолетовый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 10 мг/л).

Fig. 5. The change in the chromaticity index during the experiment: blue - before the filter, red - after the filter without treatment with activated carbon, green - after the filter with treatment with activated carbon (dose 3 mg/l), purple - after the filter with treatment with activated carbon (dose 10 mg/l).

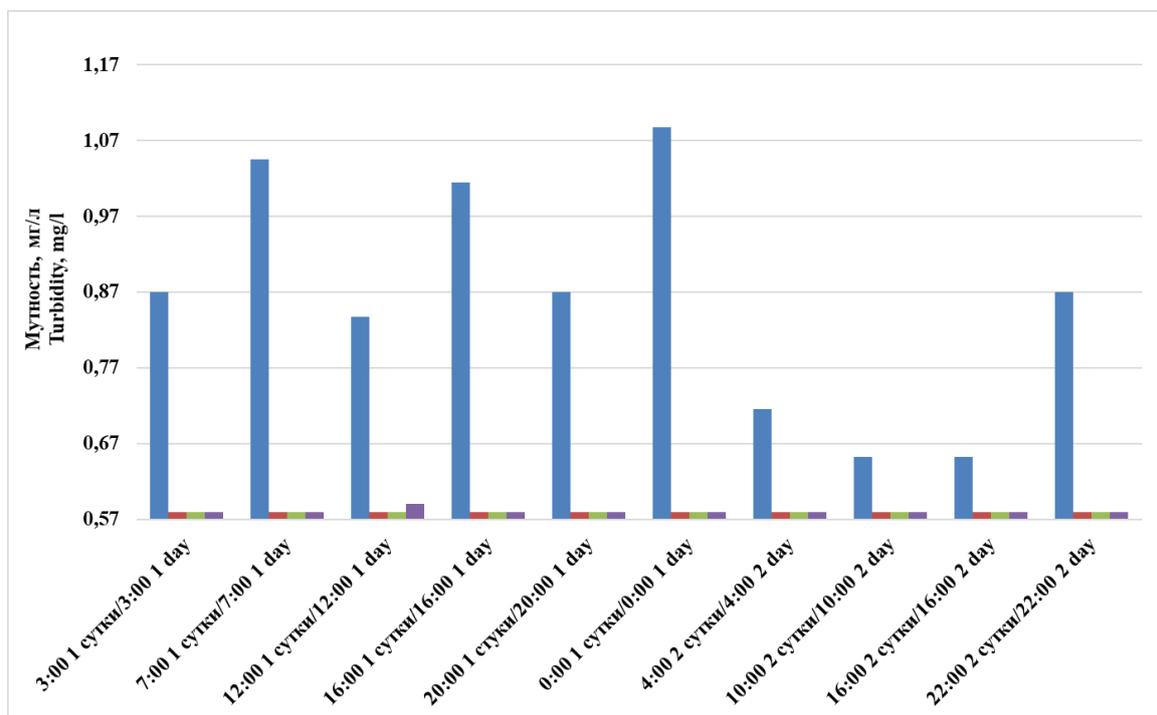


Рис. 6. Изменение показателя мутности в ходе эксперимента: синий - до фильтра, красный - после фильтра без обработки активированным углем, зеленый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 3 мг/л), фиолетовый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 10 мг/л).

Fig. 6. Change in the turbidity index during the experiment: blue - before the filter, red - after the filter without treatment with activated carbon, green - after the filter with treatment with activated carbon (dose 3 mg/l), purple - after the filter with treatment with activated carbon (dose 10 mg/l).

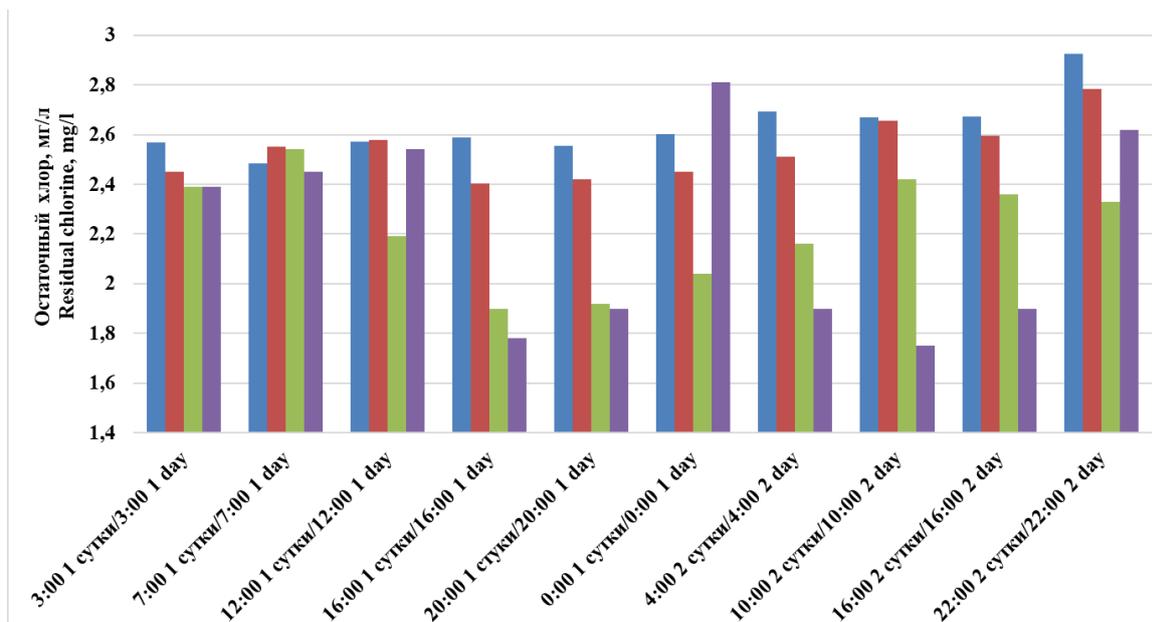


Рис. 7. Изменение значений остаточного хлора в ходе эксперимента: синий - до фильтра, красный - после фильтра без обработки активированным углем, зеленый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 3 мг/л), фиолетовый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 10 мг/л).

Fig. 7. Changes in the values of residual chlorine during the experiment: blue - before the filter, red - after the filter without treatment with activated carbon, green - after the filter with treatment with activated carbon (dose 3 mg/l), purple - after the filter with treatment with activated carbon (dose 10 mg/l).

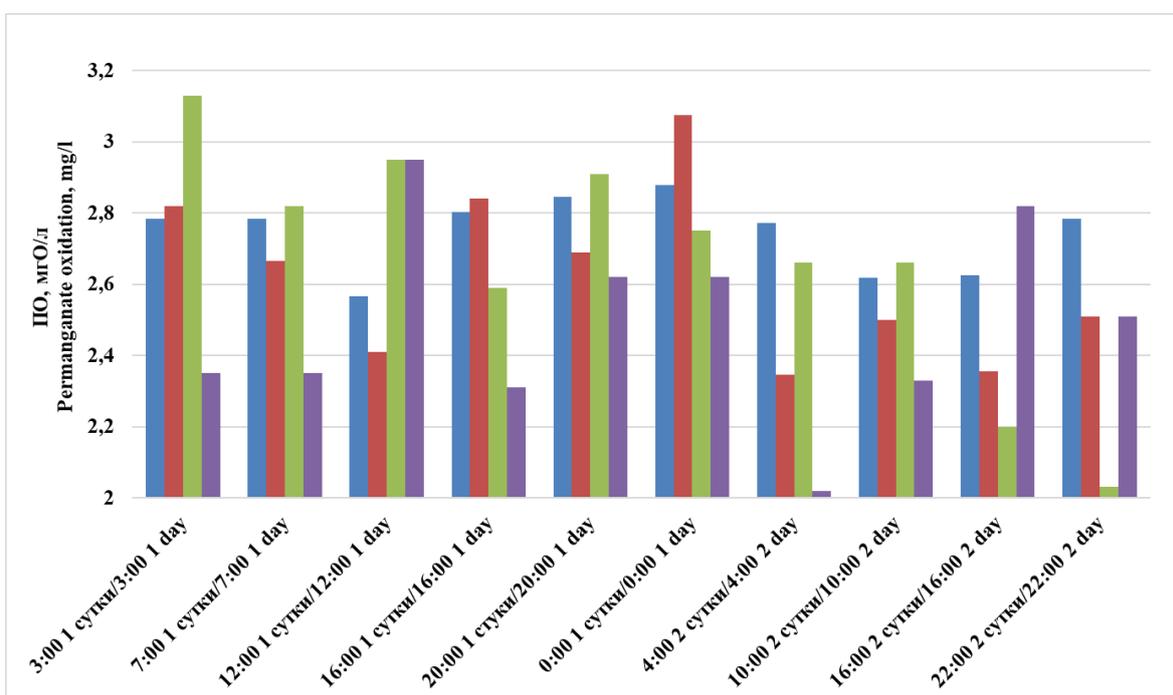


Рис. 8. Изменение значений перманганатной окисляемости в ходе эксперимента: синий - до фильтра, красный - после фильтра без обработки активированным углем, зеленый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 3 мг/л), фиолетовый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 10 мг/л).

Fig. 8. Changes in the values of permanganate oxidizability during the experiment: blue - before the filter, red - after the filter without treatment with activated carbon, green - after the filter with treatment with activated carbon (dose 3 mg/l), purple - after the filter with treatment with activated carbon (dose 10mg/l).

На основе полученных экспериментальных данных при дозировании угольной пульпы 3 мг/л можно сделать следующие выводы:

- во время дозирования угольной пульпы достоверно снизилась цветность на фильтре, на фильтре сравнения снижения нет;
- во время дозирования угольной пульпы достоверно снизилась мутность;
- во время дозирования достоверно снизился остаточный активный хлор на фильтре с

обработкой активным углем, на фильтре сравнения снижения нет;

- во время дозирования угольной пульпы перманганатная окисляемость не изменилась на фильтре с обработкой и фильтре сравнения;
- во время дозирования угольной пульпы показатель общего органического углерода достоверно не изменился на фильтрах как на фильтре с обработкой активным углем, так и на фильтре сравнения.

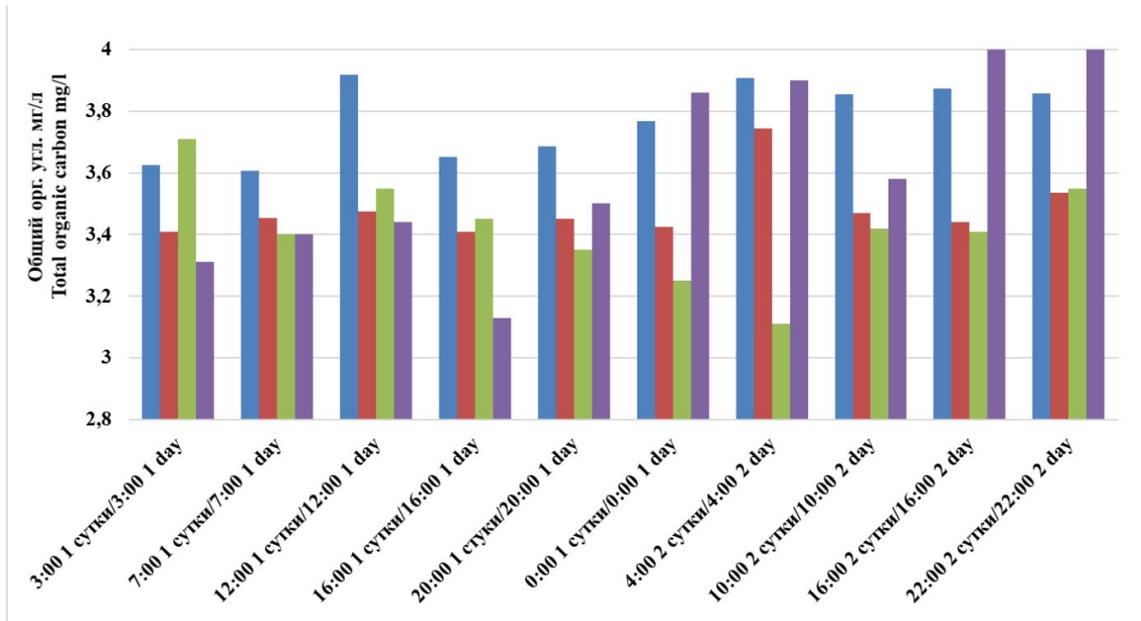


Рис. 9. Изменение значений общего органического углерода в ходе эксперимента: синий - до фильтра, красный - после фильтра без обработки активированным углем, зеленый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 3 мг/л), фиолетовый - после фильтра с обработкой активированным углем (доза 10 мг/л).

Fig. 9. Changes in the values of total organic carbon during the experiment: blue - before the filter, red - after the filter without treatment with activated carbon, green - after the filter with treatment with activated carbon (dose 3 mg/l), purple - after the filter with treatment with activated carbon (dose 10 mg/l).

Также стоит отметить, что после прекращения дозирования угольной пульпы на фильтре № 1, еще в течение 4 часов наблюдалось достоверное снижение цветности, мутности, содержание активного хлора. Учитывая высокую адсорбционную способность угля марки ОУ-А, то достоверное снижение остаточного активного хлора оправдано сорбционными свойствами.

После прекращения эксперимента с дозой угольной пульпы 3 мг/л, фильтры были выведены на регенерацию. Процесс отмывки фильтров составил 5 минут, что является нормой для фильтров без обработки активны углем. После регенерации на этих же фильтрах был проведен эксперимент с

максимальной дозой угольной пульпы 10 мг/л. Время дозирования пульпы с 9:00 до 17:00 (за первые сутки). Поэтому отбор проб осуществлялся каждый час во время и после дозирования угольной пульпы.

На основании полученных данных по дозированию угольной пульпы 10 мг/л можно сделать следующие выводы:

1. Во время дозирования достоверно снизилась цветность на фильтрах № 1 и № 2. Но в фильтре с обработкой активным углем снижение больше на 17%. В осенне-весенние период данный процент снижения будет заметен более явно;

2. Во время дозирования достоверно снизилась мутность как на фильтре с

обработкой углем, так и на фильтре сравнения;

3. Во время дозирования достоверно снизилось остаточное количество активного хлора на фильтре с обработкой углем, на фильтре сравнения снижение не является достоверным;

4. Во время дозирования угольной пульпы перманганатная окисляемость достоверно снизилась на фильтре с обработкой активным углем;

5. Во время дозирования угольной пульпы содержание общего органического углерода достоверно снижалось.

Также необходимо отметить, что после прекращения дозирования угольной пульпы в течение 3–4 часов еще наблюдалось достоверное снижение: мутности, перманганатной окисляемости, остаточного активного хлора. Также после прекращения дозирования угольной пульпы на фильтре содержание общего органического углерода достоверно снижалось еще в течение часа, далее активное действие угольной пульпы начинало ослабевать.

По результатам промышленного эксперимента разработаны технологические схемы по контролю превышения показателей органической загрязненности питьевой воды с учетом существующих методов коагуляции и обработки сильными окислителями. По результатам эксперимента рекомендовано разделить период превышения фоновых уровней концентраций веществ в воде на: период с незначительным превышением и на период с экстремальным превышением. Для периода с незначительным превышением рекомендована технологическая схема с включением метода «углевания» порошкообразным активным углем ОУ-А, доза 10-15 мг/л, точка ввода в смеситель. Технологическая схема представляет собой следующую последовательность: первичное озонирование (4-6 мг/л) – «углевание» ПАУ 10-15 мг/л – реагентная обработка «сульфат алюминия+ПАА» / «гидроксохлорид алюминия+ПАА» – отстаивание – механическое фильтрование — вторичное хлорирование дозы 2-6 мг/л.

Для периода с экстремальным превышением рекомендовано двойная обработка активным углем. Технологическая схема будет включать две точки ввода угольной пульпы марки ОУ-А:

-первая точка ввода в смесители, доза угольной пульпы в паводковый период 15-20 мг/л;

-вторая точка ввода на входе в фильтр с выносом на фильтрующую поверхность, доза угольной пульпы 5-10 мг/л. Технологическая схема представляет собой следующую последовательность: первичное хлорирование дозы 2-6 мг/л – обработка с дозированием ПАУ 15-20 мг/л – реагентная обработка «сульфат алюминия+ПАА» / «гидроксохлорид алюминия+ПАА» – отстаивание – углевание ПАУ 5-10 мг/л - механическое фильтрование – вторичное озонирование 4-6 мг/л – вторичное хлорирование дозы 2-3 мг/л.

Дозировка угольной пульпы зависит от применяемой технологической цепочки. При выборе технологической цепочки учитываются экспериментальные исследования по подбору рабочей концентрации и особенностей системы очистки.

#### IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам промышленного эксперимента можно сделать выводы, что обработка активным углем достоверно снижает показатели, характеризующие органические вещества, в сравнении с фильтром без обработки: цветность, мутность, ПО, ООУ. Эффект увеличивается с повышением дозировки. Так дозировка 3 мг/л снижает цветность, а 10 мг/л цветность, ПО, ООУ. После прекращения дозирования эффект от обработки проявляется еще в течение 4 часов. Доказано влияние метода обработки активным углем на снижение содержания активного хлора, как при дозировке 3 мг/л, так и 10 мг/л. Поэтому при использовании метода обработки активным углем как способа улучшения показателей качества воды необходимо предусмотреть систему вторичного хлорирования или иные способы дополнительного бактериологического обеззараживания.

Большой эффект от метода обработки углем наблюдался при дозировке 10 мг/л. Поэтому подбор дозировки угольной пульпы необходимо производить экспериментальным способом и именно так можно получить высокую эффективность применяемого метода. Также необходимо следовать рекомендациям по выбору технологической цепочки ввода угольной пульпы и прописанным дозировкам.

На результаты промышленного эксперимента влияет качественный и количественный состав исходной воды. При высоких значениях содержания органических веществ, мутности эффект от метода обработки активным углем более выражен. Тем не менее в процессе эксперимента было достигнуто достоверное снижение цветности, содержания органических веществ, мутности. Результаты подтвердили, что обработка активным углем рекомендуется применять как дополнительную обработку только при повышенных значениях цветности более 20 град., мутности более 20 мг/л, перманганатной окисляемости более 10 мг O<sub>2</sub>/л.

На основании полученных результатов промышленного эксперимента можно сделать вывод, что метод обработки углем является эффективным экспресс способом улучшения степени очистки. Выбор сорбционного материала с высокой поглощающей способностью позволит подобрать минимальные рабочие дозировки, что существенно снизит стоимость очистки. Проведенные исследования позволили расширить значения в области подготовки питьевой воды и определить ключевые показатели качества воды, на которые влияет метод обработки активным углем.

### БЛАГОДАРНОСТЬ

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки «Изучение процессов и гибридной энергетической установке топливный элемент – газовая турбина» шифр проекта FZSW-2022-0001.

### БИБЛИОГРАФИЯ (REFERENCES)

- [1] Reshetnyak O.S., Grishanova Yu.S. *Mноголетние и сезонные изменения развития фитопланктона и оценка состояния реки Ока в районе г. Дзержинск* [Long-term and seasonal changes in the development of phytoplankton and assessment of the state of the Oka River in the area of Dzerzhinsk]. *Вода: химия и экология – Water: chemistry and ecology*, 2016, V.3, no. 93, pp 14-21. (in Russian).
- [2] Abramova E.A. *Оценка уровня антропогенной нагрузки на бассейн реки Оки в пределах Московской области* [Assessment of the level of anthropogenic load on the Oka River basin within the Moscow region]. *Vestnik MGOU – Bulletin of the Moscow State University*, 2011, no.1, pp. 77-83. (in Russian).
- [3] *ISO 8689-2-2000. Water quality. Biological classification of rivers. Part 2: Guidance on the presentation of biological quality data from surveys of benthic macroinvertebrates*. 15.03.2000. 10 p.
- [4] *ISO 8689-1-2000. Water quality. Biological classification of rivers. Part 1: Guidance on the interpretation of biological quality data from surveys of benthic macroinvertebrates*. 15.03.2000. 12 p.
- [5] Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A. *Presnovodnye jekosistemy v impaktnyh rajonah Rossii* [Freshwater ecosystems in the impact regions of Russia]. Rostov-on-Don: «NOK», 2006, 275 p. (in Russian).
- [6] Nikanorov A.M., Bryzgalov V.A., Reshetnyak O.S. *Reki Rossii v uslovijah chrezvychajnyh jekologicheskikh situacii* [Rivers of Russia in environmental emergencies]. Rostov-on-Don: «NOK», 2012, 308 p. (in Russian).
- [7] Alves A., Lasmar D., Miranda I., Chaar J., Reis J. *The potential of activated carbon in the treatment of water for human consumption, a study of the state of the art and its techniques used for its development*. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 2021, no. 12, pp. 143-153.
- [8] Cheng W., Dastgheib S.A., Karanfil T. *Adsorption of dissolved natural organic matter by modified activated carbons*. *Water Research*, 2005, no. 39, pp. 2281-2290.
- [9] Hamdaoui O., Naffrechow, E. *Modeling of adsorption isotherms of phenol and chlorofenols onto granular activated carbon. Part I. Two-parameter models and equations allowing determination of thermodynamic parameters*. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, no. 147, pp. 381-394.
- [10] Phan N.H., Sebastien R., Catherine F., Laurence L.C., Pierre L.C., Thanh H.N. *Production of fibrous activated carbons from natural cellulose (jute, coconut) fibers for water treatment applications*. *Carbon*, 2006, no. 44, pp. 2569-2577.
- [11] Ecycle. *Carvão ativado: Usos e cuidados*. 2021. Available at: <https://www.ecycle.com.br/6914-carvao-ativado.html>. (accessed 07.04.2024)
- [12] Portal Tratamento de Água. *Uso eficiente do carvão ativado como meiofiltrante em processos industriais*. 2021. Available at: <https://tratamentodeagua.com.br/artigo/uso-eficiente-do-carvao-ativado-como-meio-filtrante-em-processos-industriais>. (accessed 07.04.2024)
- [13] De Oliveira L.R. *Remoção de alumínio em sistema contínuo por adsorção em coluna de leito fixo com carvão ativado*. Dissertação de Mestrado. Uberlândia, 2014, 122 p.
- [14] Soljushn V.U. *Sposob ochistki vody* [Method of water purification]. Patent RF, no. 2523480, 2014.
- [15] Feofanov Ju.A. *Problemy i zadachi v sfere obespechenija naselenija pit'evoj vodoj* [Problems and tasks in the field of providing drinking water to the population]. *Voda i jekologija: problemy i reshenija*, 1999, no. 1, pp. 4-7. (in Russian).
- [16] Nikolaeva T.A., Pletnikova I.P. *Gigienicheskaja ocenka sushhestvujushhej tehnologii ochistki*

- pit'evoj vody i nekotorye puti ee uluchsheniya [Hygienic assessment of the existing drinking water purification technology and some ways to improve it]. *Gig Sanit*, 1975, no. 7, pp. 29–33. (in Russian).
- [17] Clark R.M., Lykins B.W. Jr. *Granular Activated Carbon: Design, Operation and Cost*. Boca Raton: Lewis Publishers, 1989, 342 p.
- [18] Shevelev F.A., Orlov G.A. *Vodosnabzhenie bol'shikh gorodov zarubezhnykh stran* [Water supply of large cities of foreign countries]. M.: Strojizdat, 1987, 347 p. (in Russian).
- [19] Kul'skij A.L. *Teoreticheskie osnovy i tehnologija kondicionirovaniya vody* [Theoretical foundations and technology of water conditioning]. Kiev: Naukova dumka. 1971. 499 p. (in Russian).
- [20] Shenfel'd P. e.a. *Sposob i ustanovka dlja obrabotki i/ili ochistki vody* [Method and installation for water treatment and/or purification]. Patent RF, no. 2745515, 2021.
- [21] Tarasevich A.V. *Sposob ochistki vody i ustrojstvo dlja ego osushhestvleniya* [A method of water purification and a device for its implementation]. Patent RF, no. 2502680, 2013. (in Russian).
- [22] Vojtov E.L. e.a. *Stancija vodopodgotovki* [Water treatment plant]. Patent RF, no. 2328454, 2008. (in Russian).
- [23] *GOST 52991–2008. Metody opredeleniya sodержaniya obshhego i rastvorennogo organicheskogo ugleroda*. [State Standard 52991–2008. Water. Methods for determination of total and dissolved organic carbon]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 17 p.

### Сведения об авторах.



**Филимонова Антонина Андреевна**, доктор технических наук, доцент. Область научных интересов: технологии водоочистки и водоподготовки, ресурсосберегающие комплексы и системы.  
E-mail: [aachichirova@mail.ru](mailto:aachichirova@mail.ru)



**Власова Алена Юрьевна**, кандидат технических наук, доцент. Область научных интересов: водоснабжение и водоотведение, современные методы и технологии очистки сточных вод.  
E-mail: [vlasovaay@mail.ru](mailto:vlasovaay@mail.ru)



**Чичиров Андрей Александрович**, доктор химических наук, профессор. Область научных интересов: химические технологии, подготовка воды для промышленного использования, ресурсосберегающие технологии очистки сточных вод, системы водопользования.  
E-mail: [pinpin3@yandex.ru](mailto:pinpin3@yandex.ru)



**Камалиева Рузина Фарисилловна**, инженер. Область научных интересов: технологии подготовки воды на ТЭС и АЭС.  
E-mail: [ruzzi@yandex.ru](mailto:ruzzi@yandex.ru)