

Оценка эффективности противоточных схем работы натрий-катионитовых фильтров в процессах умягчения воды

О.Г. Селиванов, Е.С. Пикалов, Л.Н. Романова

Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых

Аннотация: В работе представлены результаты оценки эффективности умягчения воды на опытной установке ионного обмена с использованием одноступенчатой схемы натрий-катионирования при ламинарном режиме работы подачи потока исходной воды. Проведена сравнительная характеристика трех марок ионообменных смол, отработавших в течение двух фильтр-циклов с противоточными относительно направления подачи регенерационного раствора и промывной воды схемами работы. По итогам данной работы натрий-катионитовые смолы марок Purolite C100E и Токем-150 могут быть рекомендованы для применения в противоточных фильтрах с верхней подачей воды на слой ионита при более высокой требуемой производительности и в противоточных фильтрах с нижней подачей воды под слой ионита снизу при более высоких требованиях по степени умягчения.

Ключевые слова: очистка воды, умягчение воды, жесткость воды, соли жесткости, ионный обмен, натрий-катионитовые смолы, регенерация смолы, противоточная регенерация, ресурс смолы, степень регенерации смолы.

Введение

Вода является одним из основных природных ресурсов, который необходим для жизни животных и растений, являясь для многих из них еще и средой обитания, для хозяйственно-бытовой деятельности человека, сельского хозяйства и работы предприятий большинства отраслей промышленности, в т.ч. машиностроения, металлургии, нефтехимического комплекса и теплоэнергетики. С ростом численности населения и развитием промышленных производств потребности в воде возрастают с каждым годом. При этом одновременно возрастает и антропогенная нагрузка на водную среду. В связи с этим всё большую важность приобретает необходимость соблюдения показателей качества воды и контроль за концентрацией в ней различных веществ и соединений, которые определяют пригодность использования воды для различных целей, здоровье человека и живых организмов, качество получаемой продукции, эффективность и длительность работы оборудования [1-3].

Для соответствия воды предъявляемым требованиям проводят водоподготовку и водоочистку с использованием различных механических, физико-химических и биологических методов очистки, выбор которых зависит от исходного состава воды и нормативных требований [4-6]. Для получения умягченной воды требуемого качества используют многоступенчатую физико-химическую обработку исходной воды на водоподготовительных установках, с применением таких методов, как На-катионитовое умягчение, электрохимическое умягчение, нанофильтрация и обратный осмос, декарбонизация и финишное глубокое дообессоливание (Н-катионирование, ОН-анионирование) [7-9].

На сегодняшний день наиболее распространенным методом умягчения воды является натрий-катионирование с использованием одноступенчатых и многоступенчатых ионообменных фильтров, работа которых состоит из чередования стадий очистки воды и регенерации ионообменных смол [10-12]. Подача очищаемой воды и регенерационного раствора может проводиться прямотоком или противотоком. При противоточном режиме, когда направления подачи очищаемой воды и регенерационного раствора противоположны, достигаются более высокие степени очистки (до жесткости 0,01 мг-экв/л), значительно уменьшается удельный расход реагентов на регенерацию смолы и уменьшается объем образования минерализованных промывных сточных вод, которые необходимо в дальнейшем очищать [3, 10, 11]. Использование противотока в одну ступень позволяет получить минимальную остаточную концентрацию катионов жесткости. При этом противоточный режим может быть организован по двум схемам, предусматривающим подачу очищаемой воды на слой Na-катионитовых смол сверху или под слой Na-катионитовых смол снизу.

Целью данного исследования является сравнительная оценка эффективности различных вариантов противоточной подачи очищаемой воды

и регенерационного раствора при умягчении воды с использованием На-катионитовых смол.

Объекты и методы исследования

В качестве очищаемой в данной работе использовалась вода центрального водоснабжения Октябрьского района г. Владимира, средняя исходная жесткость которой при проведении экспериментов составляла от 5,35 до 5,84 мг-экв/л при изменении температуры в пределах 22-23 °С [10]. Для очистки воды применялись На-катионитовые смолы марок Purolite C100E (Германия), Токем-150 (Россия) и КУ-2-8 (Россия). В качестве регенерационного использовался водный раствор NaCl марки х.ч. по ГОСТ 4233-77 с концентрацией 8 %, который подавался при объемном соотношении смола : раствор = 1 : 5. Промывка смолы после регенерации проводилась дистиллированной водой по ГОСТ Р 58144-2018.

Экспериментальные исследования проводились на опытной установке одноступенчатого ионного обмена, разработанной и изготовленной ООО «БМТ» (г. Владимир), при ламинарном режиме течения жидкости при значениях критерия Рейнольдса от 176,76 до 397,7, обеспечивающем неподвижность частиц слоя ионообменной смолы. Данная установка предусматривает загрузку смолы в объеме 0,6 л.

Технологическая схема установки, представленная на рис. 1, предусматривала возможность двух вариантов противоточного режима работы:

- при подаче очищаемой воды на слой ионита сверху с подачей регенерационного раствора и промывной воды под слой ионита снизу (режим вода/ионит);
- при подаче очищаемой воды под слой ионита снизу с подачей регенерационного раствора и промывной воды на слой ионита сверху (режим ионит/вода);

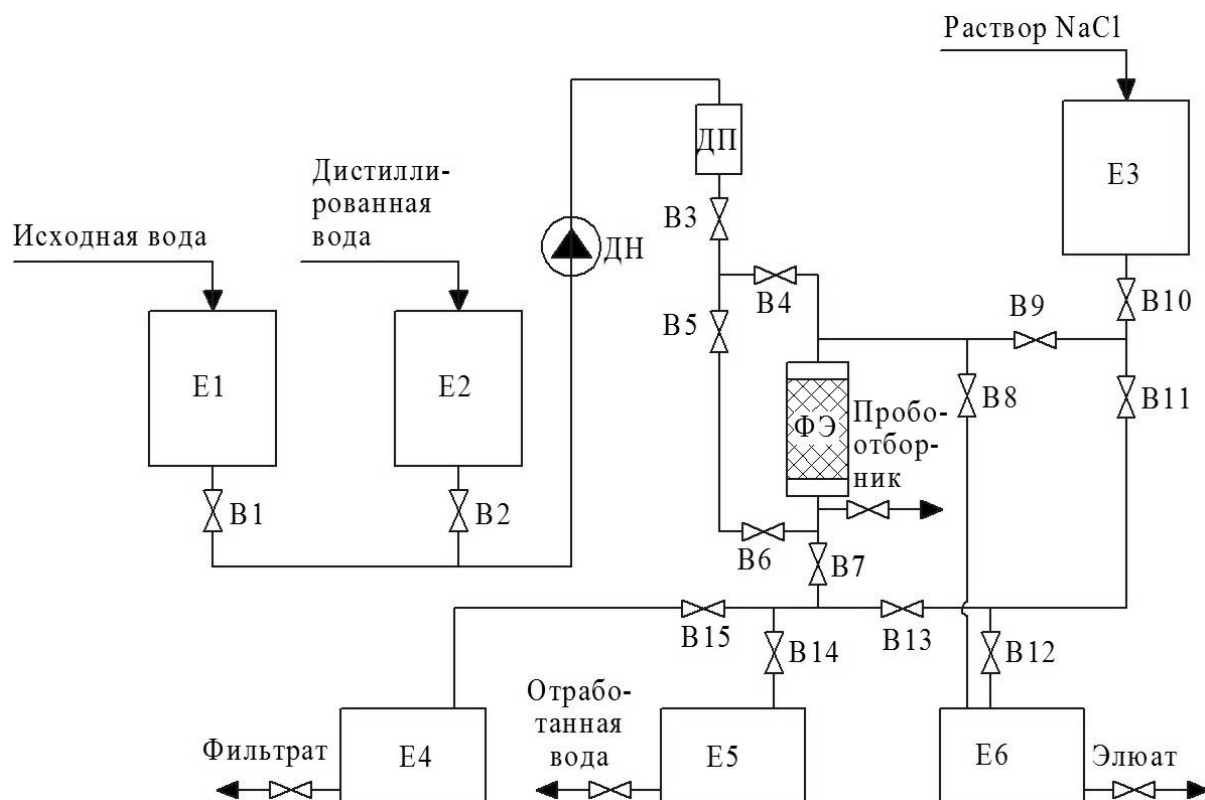


Рис.1. – Технологическая схема процесса натрий-катионирования на установке ионного обмена:

Е1 – емкость для исходной воды; Е2 – емкость для дистиллированной воды; Е3 – емкость для раствора NaCl; Е4 – емкость для фильтрата; Е5 – емкость для отработанной воды; Е6 – емкость для элюата; ДН – дозирующий насос; ДП – демпфер пульсаций; ФЭ – фильтрующий элемент; В1-В15 – вентили

Скорость подачи очищаемой воды в пределах от 20 до 45 м/ч (от 14,1 до 31,8 л/ч) регулировали при помощи дозирующего насоса марки Grundfos DME 48-3, а подача регенерирующего раствора проводилась самотеком и регулировалась при помощи вентиля. Промывная вода подавалась при помощи того же насоса, что и очищаемая вода, со скоростью подачи 20 м/ч (14,1 л/ч). Для подавления пульсации, связанной с возвратно-поступательным движением насоса, после насоса был установлен демпфер пульсации.

Фильтрат, представляющий собой умягченную воду, элюат, представляющий собой отработанный регенерирующий раствор, и отработанная промывочная вода собирались в отдельные емкости.

Для оценки эффективности процесса умягчения жесткость исходной воды и жесткость воды на выходе из фильтрующего элемента определялись по ГОСТ 31954-2012. По полученным данным о жесткости определялись эффективность очистки воды (Э, %) смолами от солей жесткости по отношению к исходной воде и степень регенерации ионитов по отношению эффективностей очистки до и после регенерации.

Результаты и обсуждение

Полученные в ходе данной работы результаты эффективности умягчения воды с помощью применяемых марок смол при двух противоточных режимах работы в период первого фильтр-цикла показаны на рис. 2-4. Из полученных данных видно, что с увеличением скорости подачи очищаемой воды повышается эффективность умягчения. Как было установлено ранее, это связано с более быстрой сменой слоя воды, контактирующего с поверхностью частиц ионита, которая приводит к постоянному смещению равновесия реакции ионного обмена в сторону поглощения ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} [10].

Из представленных данных также следует, что при подаче воды под слой ионита (режим ионит/вода) эффективность умягчения выше. Это связано с тем, что при такой схеме подачи гидравлическое сопротивление слоя ионита выше, и на его преодоление расходуется напор потока воды, а это приводит к большему уплотнению слоя, чем при подаче воды на слой ионита. В результате улучшается распределение потока воды по сечению слоя и происходит увеличение времени прохождения воды через слой при сохранении ее расхода.

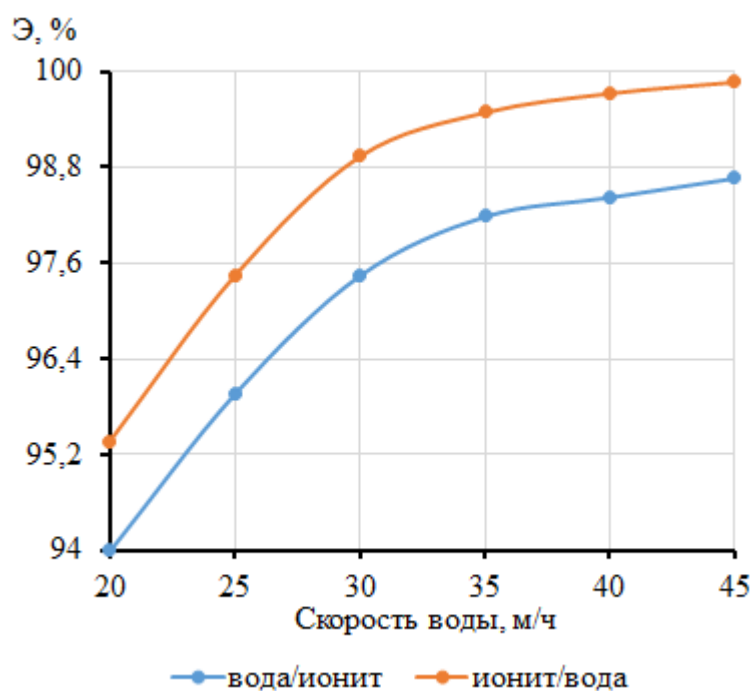


Рис.2. Зависимость эффективности умягчения воды от скорости потока и схемы подачи очищаемой воды для смолы Purolite C100E

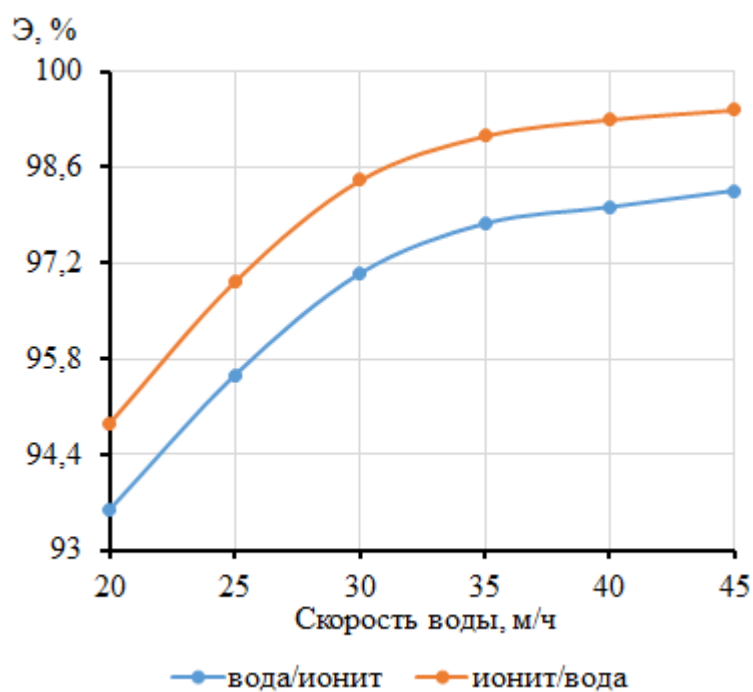


Рис. 3. Зависимость эффективности умягчения воды от скорости потока и схемы подачи очищаемой воды для смолы Tokem 150

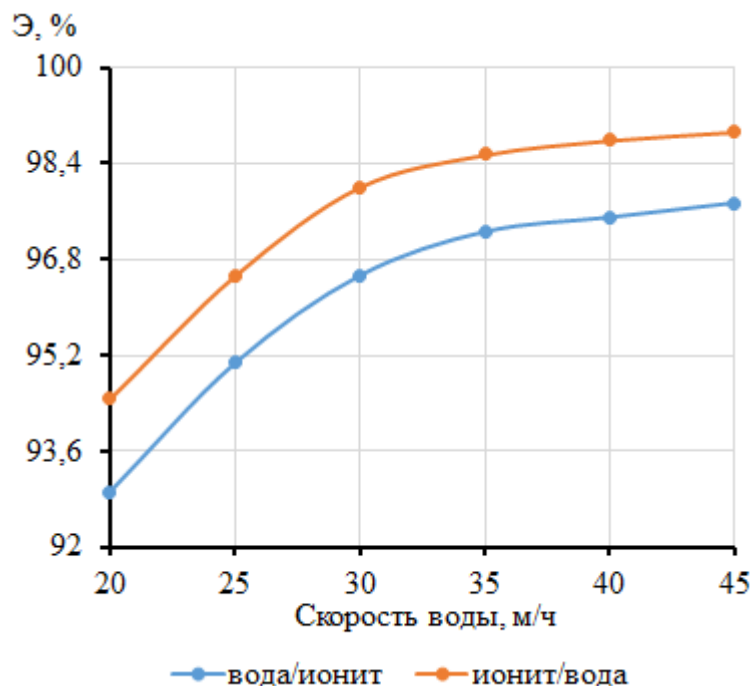


Рис. 4. Зависимость эффективности умягчения воды от скорости потока и схемы подачи очищаемой воды для смолы КУ-2-8

Это способствует увеличению времени реакции ионного обмена подвижных ионов Na^+ смолы на ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} в умягчаемой воде. Кроме того, из представленных зависимостей видно, что при подаче воды под слой ионита (режим ионит/вода) эффективность умягчения выше. Это связано с тем, что при такой схеме подачи гидравлическое сопротивление слоя ионита выше, и на его преодоление расходуется напор потока воды, а это приводит к большему уплотнению слоя, чем при подаче воды на слой ионита. В результате улучшается распределение потока воды по сечению слоя и происходит увеличение времени прохождения воды через слой при сохранении ее расхода. Это способствует увеличению времени реакции ионного обмена подвижных ионов Na^+ смолы на ионы Ca^{2+} и Mg^{2+} в умягчаемой воде.

При сравнении эффективности умягчения для разных марок смол видно, что полученные зависимости носят практически аналогичный характер. В то же время можно сделать вывод о том, что наибольшая эффективность достигается при использовании смолы марки Purolite C100E, а наименьшая эффективность характерна для смолы КУ-2-8. Различия в показателях эффективности связаны с тем, что смолы марок Purolite C100E и Токем-150 проявляют более высокую активность в реакциях ионного обмена [10]. После снижения средних значений эффективности умягчения в два раза по сравнению со средними значениями этого показателя при стабильном режиме работы установки для каждой из смол проводились противоточные регенерация и промывка для каждой из исследуемых схем работы: вода/ионит и ионит/вода. После этого для каждой из смол в каждой из двух противоточных схем работы были установлены основные показатели работы смол. Результаты сравнения показателей для первого и второго фильтр-циклов представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица № 1

Показатели эффективности применения натрий-катионитовых смол по схеме вода/ионит

Ионит	Ресурс, л		Эффективность, %		Степень регенерации, %
	1 цикл	2 цикл	1 цикл	2 цикл	
Purolite C100E	177,2	185,3	98,67	98,11	99,43
Токем 150	173,2	184,3	98,25	96,47	98,19
КУ-2-8	183,3	157,4	97,74	94,47	96,65

Таблица № 2

Показатели эффективности применения натрий-катионитовых смол по схеме ионит/вода

Ионит	Ресурс, л		Эффективность, %		Степень регенерации, %
	1 цикл	2 цикл	1 цикл	2 цикл	
Purolite C100E	206,2	186,8	99,87	99,39	99,52
Token 150	202,1	185,2	99,44	97,74	98,29
KY-2-8	211,2	158,2	98,93	95,63	96,66

Как следует из полученных данных, противоточная схема ионит/вода показывает более высокие значения эффективности умягчения и степени регенерации, а использование противоточной схемы вода/ионит позволяет достичь более высоких величин ресурса работы смол. Данная тенденция сохраняется при переходе ко второму фильтр-циклу.

Подобные зависимости для эффективности умягчения и ресурса смолы также можно объяснить более высоким гидравлическим сопротивлением слоя ионита при подаче воды снизу по схеме ионит/вода, т.к. уплотнение слоя смолы способствует более полному ионному обмену, что с одной стороны повышает эффективность умягчения, а с другой – уменьшает время достижения максимальной обменной емкости смолы.

Степени регенерации при подаче регенерационного раствора и промывной воды под слой ионита (вода/ионит) практически аналогичны, но несколько уступают значениям этих показателей для другого режима работы установки (ионит/вода). Различия в значениях могут быть связаны с тем, что при подаче регенерационного раствора и промывной воды сверху (ионит/вода) из-за более низкого гидравлического сопротивления такой подаче степень уплотнения слоя ниже, что облегчает прохождение потока жидкости и как в

случае с повышением скорости подачи очищаемой воды, смещает равновесие реакции ионного обмена подвижных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} с ионами Na^+ в регенерационном растворе, а также способствует процессу промывания слоя от остаточного количества раствора NaCl .

Из полученных данных также следует, что для обеих рассмотренных в данной работе противоточных схем умягчения воды показатели эффективности умягчения и степени регенерации для смол марок Purolite C100E и Токем-150 практически аналогичны и выше, чем для смолы марки КУ-2-8, которая при этом отличается более высоким ресурсом на первом фильтр-цикле, однако уже на втором фильтр-цикле значения этого показателя начинают уступать значениям для других смол.

Выводы

В результате выполнения работы установлено, что при противоточной работе натрий-катионитовых фильтров подача воды на слой ионита сверху увеличивает ресурс смолы, а подача воды под слой ионита снизу повышает степень умягчения за счет разной степени уплотнения смолы, которая выше при подаче снизу. Также установлено, что подача регенерационного раствора и промывной воды сверху за счет более низкой степени уплотнения способствует более полному обмену подвижных ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} в смоле с ионами Na^+ в растворе и процессу промывки.

По результатам проведения исследований с натрий-катионитовыми смолами разных марок установлено, что смолы марок Purolite C100E и Токем-150 отличаются более высокими показателями эффективности умягчения, ресурса и степени регенерации, чем смола марки КУ-2-8, которая отличается только более высоким ресурсом на первом фильтр-цикле.

По итогам данной работы можно рекомендовать применение натрий-катионитовых смол марок Purolite C100E и Токем-150 в противоточных фильтрах с подачей воды на слой ионита сверху при более высокой

требуемой производительности и в противоточных фильтрах с подачей воды под слой ионита снизу при более высоких требованиях по степени умягчения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (Соглашение о предоставлении субсидии от 23 июня 2021 г. № 075-11-2021-031 ИГК 000000S407521QKN0002) в рамках реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств, утвержденных постановлением Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218.

Литература

1. Молоканов Д.А., Ищенко Е.В. Выбор метода и технологии очистки сточных вод // Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение. 2008. №7. С. 26-28.
2. Древин В.Е., Шипаева Т.А., Гиззатова Г.Л. Определение качества воды и ее использование в пищевой промышленности // Пищевая промышленность. 2014. № 9. С. 34-35.
3. Хусаинов Р.М., Перерва М.Е., Гайсин Э.М. Сравнительный анализ химической очистки воды в прямоточных и противоточных фильтрах // E-Scio. 2020. № 3. С. 389-395.
4. Вертинский А.П. Физико-химические методы очистки сточных вод: проблемы, современное состояние и возможные пути усовершенствования // Инновации и инвестиции. 2019. №11. С. 257-261.
5. Уварова А.С., Виткалова И.А., Пикалов Е.С. Применение керамических отходов для обезжелезивания природных и сточных вод методом сорбции // Экология и промышленность России. 2022. №3. С. 34-39.
6. Кудрявцев П.Г., Кудрявцев Н.П. Очистка сточных вод с использованием матрично-изолированных нанокomпозиционных



флокулянтов-коагулянтов // Инженерный вестник Дона. 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5045

7. Горбань Я.Ю., Черкасова Т.Г., Неведров А.В. Методы удаления из воды солей кальция и магния // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. № 2. С. 126-135.

8. Мартынова Н.К. Электрохимический метод умягчения воды и его применение в энергетике // Агроинженерия. 2015. №6. С. 45-59.

9. Shahmirzadi M.A.A., Hosseini S.S., Luo J., Ortiz I. Significance, evolution and recent advances in adsorption technology, materials and processes for desalination, water softening and salt removal // Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 215. P. 324-344.

10. Селиванов О.Г., Пикалов Е.С. Оценка эффективности применения натрий-катионитовых смол в процессе умягчения воды для работы теплогенерирующих установок // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 5. С. 14-18.

11. Бажанов А.Г., Прокопов Н.Г. Импульсная регенерация катионита в натрий-катионом фильтре // Инженерный вестник Дона. 2021. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7195

12. Громов С.Л., Пантелеев А.А. Технологии противоточной регенерации ионитов для водоподготовки. Часть 2 // Теплоэнергетика. 2006. № 11. С. 50-55.

13. Жадан А.В., Бушуев Е.Н. Практическая реализация противоточной технологии ионного обмена // Вестник Ивановского государственного энергетического университета. 2012. № 5. С. 10-15.

14. Амосова Э.Г., Долгополов П.И., Потапова Н.В., Малахов Д.Г., Журавлев С.П. Опыт применения технологии противоточного натрий-катионирования в котельных // Сантехника. 2003. №2. С. 13-17.

References

1. Molokanov D.A., Ishchenko E.V. Vodoochistka. Vodopodgotovka. Vodosnabzhenie. 2008. №7. pp. 26-28.
2. Drevin V.E., Shipaeva T.A., Gizzatova G.L. Pishchevaya promyshlennost'. 2014. № 9. pp. 34-35.
3. Husainov R.M., Pererva M.E., Gajsin E.M. E-Scio. 2020. № 3. pp. 389-395.
4. Vertinskij A.P. Innovacii i investicii. 2019. №11. pp. 257-261.
5. Uvarova A.S., Vitkalova I.A., Pikalov E.S. Ekologiya i promyshlennost' Rossii. 2022. №3. pp. 34-39.
6. Kudryavcev P.G., Kudryavcev N.P. Inzhenernyj vestnik Dona. 2018. №2. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5045
7. Gorban' Ya.Yu., Cherkasova T.G., Nevedrov A.V. Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. 2016. № 2. pp. 126-135.
8. Martynova N.K. Agroinzheneriya. 2015. №6. pp. 45-59.
9. Shahmirzadi M.A.A., Hosseini S.S., Luo J., Ortiz I. Journal of Environmental Management. 2018. Vol. 215. pp. 324-344.
10. Selivanov O.G., Pikalov E.S. Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika. 2022. № 5. pp. 14-18.
11. Bazhanov A.G., Prokopov N.G. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. №9. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n9y2021/7195
12. Gromov S.L., Panteleev A.A. Teploenergetika. 2006. № 11. pp. 50-55.
13. Zhadan A.V., Bushuev E.N. Vestnik Ivanovskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta. 2012. № 5. pp. 10-15.
14. Amosova E.G., Dolgopolov P.I., Potapova N.V., Malahov D.G., Zhuravlev S.P. Santekhnika. 2003. №2. pp. 13-17.