

УДК: 541.13

<https://dx.doi.org/10.36522/2181-9637-2019-6-8>**НАНОКОМПОЗИТЛИ КАТИОНИТ АСОСИДА КИМЁВИЙ СУВ ТАЙЁРЛАШ
ТИЗИМЛАРИНИ ЯРАТИШ ВА ИШЛАБ ЧИҚАРИШНИ ЎЗЛАШТИРИШ****Ҳайдаров Ренат Рашидович**физика-математика фанлари номзоди,
фанлараро технологиялар лабораторияси мудири**Гарипов Илнур Тагирович**

докторант

Гапурова Ольга Урумбаевна

кичик илмий ходим

Юлдашев Бехзод Садикович

академик, директор

Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ядро физикаси институти

Аннотация. Мақола импорт ўрнини босувчи нанокөмпозитли катионит асосида кимёвий сув тайёрлаш тизимларини яратишининг долзарб масаласига бағишланган бўлиб, ҳозирда унинг ишлаб чиқарилиши Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Ядро физикаси институтида йўлга қўйилляпти. Шу каби тизимларнинг ишлаш тажрибаси шуни кўрсатадики, иссиқ иқлим шароитида аксарият ҳолларда катионитнинг микроорганизмлар билан тез ифлосланиши кузатилади, бу эса катионит гранулаларининг емирилишига ва қимматбаҳо кимёвий сув тайёрлаш тизимларининг хизмат кўрсатиши ва ишлаш муддатининг кескин қисқаришига олиб келади. Хорижий намуналардан фарқли ўлароқ, мақола муаллифлари томонидан кучли кислотали катионитни кумуш нанозаррачалар билан ўзгартирилишининг янги технологияси қўлланилди, бунда у бактерицид хусусиятларга эга бўлиб, Марказий Осиё иқлим шароитида кимёвий сув тайёрлаш тизимларининг хизмат кўрсатиши муддатини сезиларли даражада оширади. Ҳозирги вақтда нанокөмпозит катионитдан фойдаланган ҳолда кимёвий сув тайёрлаш тизимлари мамлакатимизда, хусусан, республика иситиши тизимини модернизация қилиши доира-сида қуриляётган мини-қозонларда фаол татбиқ этилмоқда.

Таянч тушунчалар: сув, сув қаттиқлиги, кумуш нанозарралари, катионит, сорбент, кимёвий сув тайёрлаш, сувни юмшатиши.

**СОЗДАНИЕ И ОСВОЕНИЕ ПРОИЗВОДСТВА СИСТЕМ ХИМВОДОПОДГОТОВКИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НАНОКОМПОЗИТНОГО КАТИОНИТА****Ҳайдаров Ренат Рашидович**кандидат физико-математических наук,
заведующий лабораторией междисциплинарных технологий**Гарипов Илнур Тагирович**

докторант

Гапурова Ольга Урумбаевна

младший научный сотрудник

Юлдашев Бехзод Садикович

академик, директор

Институт ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан

Аннотация. Статья посвящена актуальному вопросу создания импортозамещающих систем хим-водоподготовки с использованием нанокompозитного катионита, производство которого в настоящее время осваивается в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан. Опыт эксплуатации аналогичных систем показывает, что в условиях жаркого климата зачастую происходит быстрое загрязнение катионита микроорганизмами, что приводит к последующему разрушению его гранул и резкому сокращению срока службы/эксплуатации дорогостоящих систем химводоподготовки. В отличие от зарубежных аналогов авторами статьи используется новая технология модифицирования сильнокислотного катионита наночастицами серебра, что позволяет придать ему бактерицидные свойства и тем самым значительно увеличить срок эксплуатации систем химводоподготовки в климатических условиях Центральной Азии. В настоящее время разработанные системы химводоподготовки с использованием нанокompозитного катионита активно внедряются в Узбекистане, в т.ч. в мини-котельных, строящихся в рамках модернизации системы теплоснабжения.

Ключевые слова: вода, жесткость воды, наночастицы серебра, катионит, сорбент, химводоподготовка, умягчение воды.

DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF CHEMICAL WATER TREATMENT SYSTEMS USING NANOCOMPOSITE CATION EXCHANGER

Khaydarov Renat Rashidovich

PhD in Physical and Mathematical Sciences,

Head of the Laboratory of Interdisciplinary Technologies

Garipov Ilnur Tagirovich

PhD student

Gapurova Olga Urumbayevna

Junior Researcher

Yuldashev Bekhzod Sadikovich

Academician, Professor

Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan

Abstract. The article is devoted to the creation of import-substituting chemical water treatment systems using nanocomposite cation exchanger, the production of which is currently being investigated at the Institute of Nuclear Physics of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan. The experience of operating similar systems shows that in hot climates, the cation exchanger is rapidly contaminated with microorganisms, which leads to the subsequent destruction of cation resin granules and dramatical reduction of the life time /operation of expensive chemical water treatment systems. Unlike foreign analogues, the authors of the article use a new technology for modifying strongly acid cation exchanger with silver nanoparticles, which provides bactericidal properties, and thereby significantly increases the life of chemical water treatment systems in climatic conditions of Central Asia. Currently, the developed chemical water treatment systems with nanocomposite cation exchangers are actively being applied in Uzbekistan, in particular to mini-boiler houses built as part of the modernization program of the heating system of the republic.

Keywords: water, water hardness, silver nanoparticles, cation exchanger, sorbent, chemical water treatment, water softening.

Введение

В Узбекистане в рамках Программы развития системы теплоснабжения на период 2018–2022 годы запланирован поэтапный переход на закрытую систему обеспечения

теплом многоквартирных домов и строительство локальных котельных. Для повышения экономичности, ликвидации накипи и отложений на теплопередающих поверхностях, а также продления срока службы каждая такая

котельная требует установки дорогостоящих специальных систем химводоподготовки (ХВО). Под системой ХВО понимают комплекс оборудования для изменения химических показателей состава исходной воды в соответствии с требованиями производителей котлов [1]. Непременным атрибутом ХВО является удаление солей жесткости (умягчение воды) на Na-катионитовых фильтрах. В импортных системах химводоподготовки удаление солей жесткости осуществляется, как правило, благодаря использованию сильнокислотных катионообменных смол (например, Purolite C100, КУ-2-8, Seplite SC 130 и пр.). Опыт эксплуатации подобных фильтров в Узбекистане показывает, что в условиях жаркого климата зачастую происходит быстрое загрязнение катионита микроорганизмами. Разрастание бактериальных образований и водорослей в слоях катионита внутри химколонн систем водоподготовки приводит к увеличению перепада давления в слое ионообменной смолы, к последующему разрушению гранул катионита и значительному снижению его обменной емкости, что является причиной резкого сокращения срока службы/эксплуатации дорогостоящих систем ХВО.

Таким образом, вопрос организации импортозамещающего производства недорогих систем химводоподготовки, максимально адаптированных к качеству воды и климатическим условиям Узбекистана, является крайне актуальным.

Материалы и методы

При разработке метода получения нанокompозитного катионита и изучении его свойств были использованы следующие химические соединения марки «ЧДА»: нитрат серебра AgNO_3 , боргидрид натрия NaBH_4 , а также катионообменная смола КУ-2-8 в Na^+ -форме, гидразин, природные полисахариды (альгинат натрия, кверцетин). Ионообменное насыщение катионита КУ-2-8 ионами серебра проводили с полным и частичным насыщением по серебру. Для этого проводили серию экспериментов, используя навески катионита в Na-форме одинаковой массы (по 1 г), концентрацию серебра варьировали в диапазоне $0,01 \div 0,4$ моль/л, объем водной фазы по 5 мл на каждую навеску. Сорбцию серебра проводили

в статическом режиме в течение 1 часа, после чего образцы промывали дистиллированной водой и осуществляли восстановление серебра, находящегося в матрице катионита.

Насыщение катионита ионами серебра проводили также и в динамическом режиме, используя стеклянную колонку диаметром 25 мм, в которую помещали 10 г катионита, высота рабочего слоя – 35 мм. Через слой катионита пропускали раствор нитрата серебра концентрацией 0,01 моль/л со скоростью 5 мл/мин. до полного насыщения катионита. Полученная в результате эксперимента полная обменная емкость (ПОЕ) катионита по серебру составила 200 мг/г, что соответствует примерно 1,9 ммоль/г. Концентрацию ионов серебра в экспериментах определяли потенциометрическим методом с использованием ионоселективного электрода типа «ЭЛИС-131 Ag». Диапазон определяемых концентраций ионов серебра: $5 \times 10^{-7} \dots 10^{-1}$ моль/л. Для восстановления были взяты свежеприготовленные растворы боргидрида натрия концентрацией 0,05-0,1-0,2-1%, концентрация альгината натрия – 0,1-1,0%, кверцетина – 0,5% и гидразина – 0,1%.

Поверхности гранул катионита, модифицированного коллоидными частицами серебра, исследовались посредством сканирующей электронной микроскопии (Zeiss SEM EVO MA10) в г. Ташкент, в Центре передовых технологий Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.

При проведении эксплуатационных испытаний разработанной системы химводоподготовки использовался метод определения жесткости воды (ГОСТ 4151-72), который состоит в образовании комплексного соединения Трилона Б с ионами кальция и магния. Определение проводят титрованием пробы воды Трилоном Б при $\text{pH} \sim 10$ в присутствии индикатора.

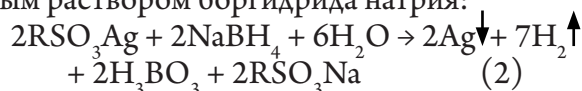
Результаты и обсуждение

В составе систем химводоподготовки авторами предлагается использовать нанокompозитный катионит, созданный на основе разработанного метода получения наночастиц серебра в сильнокислотном катионите КУ-2-8, приводящего к образованию слоя наносеребра на поверхности гранул катионита (рис. 1.).

Формирование частиц серебра в матрице ионообменника – двухстадийный процесс. На первой стадии происходит ионообменная сорбция ионов серебра из раствора и их локализация около фиксированных групп ионообменника:



На второй стадии ионы серебра восстанавливаются до наночастиц свежеприготовленным раствором боргидрида натрия:



Растущие частицы серебра заполняют свободный объем гидрофильных пор, однако их дальнейший рост становится невозможным вследствие того, что жесткая матрица катионита мало подвержена деформации.

Восстановление катионов Ag^+ в матрице зернистого катионита КУ-2-8 сопровождается частичным переходом наноразмерных частиц серебра из фазы ионита в раствор, что характеризуется окрашиванием раствора восстановителя. Поверхность образцов катионита с высоким содержанием серебра в процессе восстановления покрывается слоем металлического серебра. Полная обменная емкость катионита КУ-2-8 по ионам серебра составляет 2,05 ммоль/г.

Введение наноразмерных включений серебра при помощи боргидридного восстановления позволяет получать нанокompозиты с различным распределением восстановленного серебра в фазе ионообменника.

В результате проведенных исследований установлено, что концентрация восстановителя оказывает существенное влияние на распределение восстановленного серебра. При химическом восстановлении катионов Ag^+ в

матрице КУ-2-8 уменьшение концентрации боргидрида натрия способствует восстановлению катионов серебра преимущественно в поверхностном слое зерна, что приводит к формированию токопроводящего слоя металлического серебра. Рост концентрации восстановителя способствует получению объемно-модифицированных образцов.

На основании полученных результатов подобраны оптимальные условия для получения модифицированного ионами серебра катионита КУ-2-8:

1. Концентрация раствора нитрата серебра – 0,5 моль/л.
2. Объем раствора нитрата серебра, взятый для обработки катионита, – 10–50 мл (в зависимости от поставленной задачи).
3. Время контакта раствора нитрата серебра с катионитом в статическом режиме – 1 час.
4. Отмывка катионита дистиллированной водой.
5. Восстановление ионов серебра, находящихся в матрице катионита, свежеприготовленным раствором боргидрида натрия концентрацией 0,05–0,1%.
6. Отмывка катионита дистиллированной водой от продуктов восстановления.

Внешний вид нанокompозитного катионита с различной концентрацией наночастиц серебра в его структуре приведен на рис. 2.

На рис. 3 представлен снимок поверхности нанокompозитного катионита, полученный на сканирующем электронном микроскопе. Как видно из рисунка, частицы серебра на поверхности катионита имеют сферическую форму, а их размер варьируется в диапазоне от десятков нм до 1000 нм.

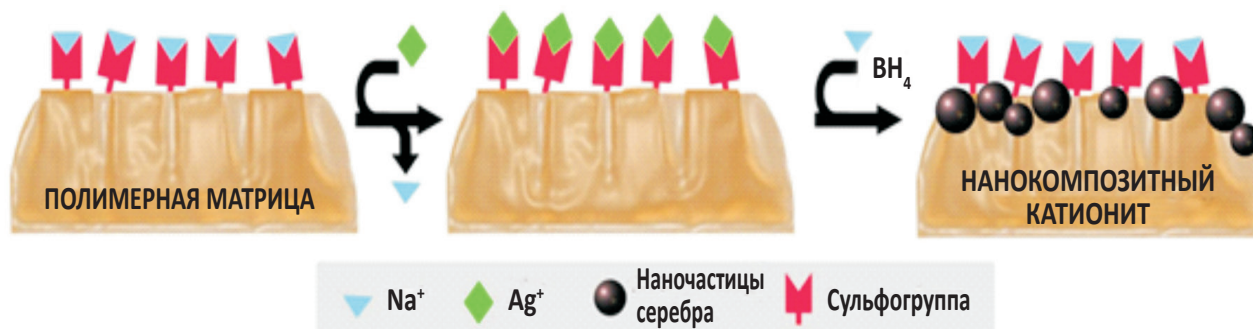


Рис. 1. Синтез наночастиц серебра на поверхности полимерной ионообменной матрицы



Рис. 2. Фотография исходного нового катионита КУ-2-8 (слева) и синтезированного нанокompозитного катионита с концентрацией 0,1 ммоль/г (в центре) и 0,25 ммоль/г (справа)

Исполнителями проекта накоплен значительный опыт в области модифицирования различных материалов наносеребром с целью придания им биоцидных свойств [2-9]. Использование наночастиц серебра в структуре катионита позволяет предотвратить рост бактерий и биопленок на его поверхности и тем самым значительно увеличить срок его службы при сохранении высокого значения обменной емкости, характерной для сильнокислотных ионообменных смол.

В отличие от существующих зарубежных аналогов в составе создаваемых систем химводоподготовки (ХВО) предполагается

использовать модифицируемый наночастицами серебра катионит, биоцидное воздействие которого позволяет значительно увеличить срок эксплуатации систем при незначительном увеличении стоимости катионита (не более 12-15%). Недавние исследования [3, 8] микробиологической активности созданного нанокompозитного катионита продемонстрировали его выраженное антибактериальное действие на тест-культуре *Staphylococcus aureus* и *Pseudomonas aeruginosa*.

В рамках выполнения данного проекта была создана схема технологической линии по синтезу нанокompозитного катионита, позволяющая получать до 100 кг/сутки (рис. 4). При необходимости изменения технологической схемы обработки катионита КУ-2-8 для использования в более значительных промышленных масштабах необходимо учитывать производственные условия организации, предусмотреть максимальную автоматизацию запланированных процессов и операций, соблюдение условий для получения высококачественной продукции, а также сокращение производственных потерь.

Стоимость создаваемой системы ХВО (с производительностью до 5 м³ в час) при мелкосерийном производстве составляет 24 млн сум. (материалы и компоненты рассчитаны по ценам на декабрь 2019 г.), что как минимум вдвое ниже, чем у используемых в настоящее

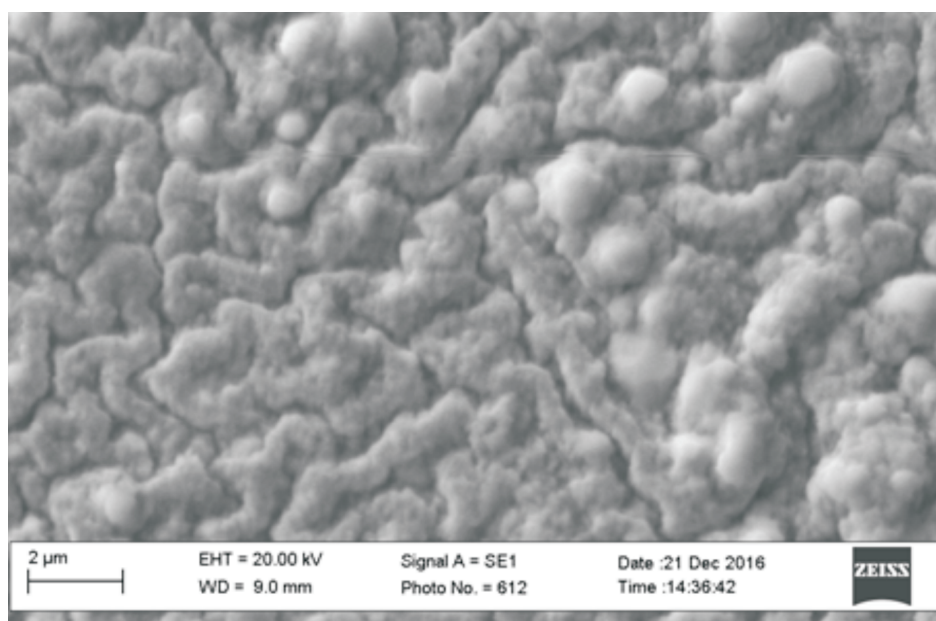
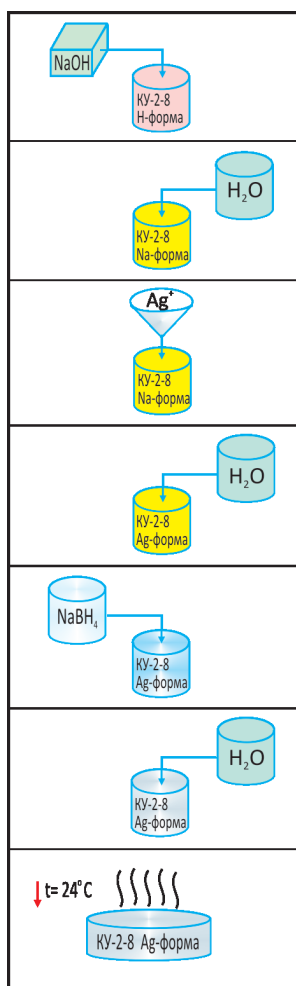


Рис. 3. Снимок поверхности нанокompозитного катионита, полученный на сканирующем электронном микроскопе (Zeiss SEM EVO MA10)



1. Обработка исходного катионита КУ-2-8 в H^+ -форме раствором 5 н. NaOH до полного насыщения ионами Na^+ (изменения значения pH от 6-7 до 8).
2. Промывка деионизированной водой обработанного катионита.
3. Сорбция серебра на обработанном катионите Na-формы (около 1 часа).
4. Отмывка дистиллированной водой катионита в Ag-форме.
5. Восстановление ионов серебра свежеприготовленным раствором боргидрида натрия в статическом режиме.
6. Отмывка катионита от продуктов восстановления дистиллированной водой.
7. Высушивание нанокompозитного катионита при комнатной температуре.

Рис. 4. Схема технологической линии по синтезу нанокompозитного катионита

время в Узбекистане зарубежных аналогов, благодаря использованию сырья и материалов, доступных на местном рынке. Создаваемые системы к тому же обеспечивают малые потери напора, что позволит успешно их применять как в напорных, так и в проточных схемах.

Для организации производства созданных систем были разработаны и утверждены в агентстве «Узстандарт» технические условия Ts 16241929-03:2016, согласованные в Министерстве здравоохранения Республики Узбекистан (действительны до 22.12.2021), получено санитарно-эпидемиологическое заключение и сертификат соответствия. В 2019 году серийное производство разработанных систем химводоподготовки запущено на базе конструкторского бюро с экспериментальным заводом (КБ с ОЗ) в Институте ядерной физики Академии наук Узбекистана. Запуск производства открывает возможность широкого внедрения и использования разработанных

импортозамещающих систем ХВО в мини-котельных по всей республике, а также поставки систем организациям, эксплуатирующим оборудование (термопластавтоматы, экструдеры, парогенераторы, градирни, обратноосмотические системы и пр.), требующее поступления исходной мягкой воды. Следует отметить, что созданные системы благодаря своим конструктивным особенностям наилучшим образом адаптированы к качеству воды и климатическим условиям Узбекистана.

В ходе эксплуатационных исследований разработанной системы химводоподготовки также был выявлен эффект восстановления нанокompозитным катионитом растворенного в воде кислорода (табл. 1). Рассматривая данный процесс подобно научным работам [10-13], можно выделить следующие стадии, протекающие в зерне нанокompозита: внутренняя диффузия кислорода по порам нанокompозита, адсорбция кислорода

на центрах наносеребра, окислительно-восстановительная реакция кислорода с наночастицами серебра. Окислительно-восстановительная реакция заканчивается образованием ионов серебра или оксидо- и гидроксообразованием.

Таким образом, разработанный нанокон-
 позитный катионит может выполнять функ-

цию удаления растворенного кислорода из воды, что требует проведения дальнейших исследований, и, возможно, станет одним из направлений научных изысканий авторов в ближайшие годы.

Проведенные эксплуатационные испытания (табл. 1) установленных систем совмест-

Таблица 1

**Значения жесткости воды на выходе разработанной системы
 химводоподготовки при различных значениях исходной жесткости,
 производительности и прочих начальных условиях**

Исходная жест- кость воды, мг-экв/л	Производительность 1 м ³ /ч		Производительность 3 м ³ /ч		Производительность 5 м ³ /ч	
	Пропу- щенный объем, м ³	Жесткость на выходе, мг-экв/л	Пропущен- ный объем, м ³	Жесткость на выходе, мг-экв/л	Пропущен- ный объем, м ³	Жесткость на выходе, мг-экв/л
15-16	2	0,05-0,06	2	0,08	2	0,3
	4	0,08-0,15	4	0,2	5	0,45
	6	0,60-0,80	6	0,3	7	0,60
	8	1,70-2,50	8	0,5	8	7,2
	10	6,20-6,50	10	3,6	10	12,8
10-12	1	0,04				
	3	0,06	3	0,10	3	0,10-0,20
	5	0,20-0,30	5	0,25	5	0,3-0,5
	8	0,30-0,50	10	0,60	8	0,5-0,8
	10	0,50-0,60				
7,0-8,0			2	0,03-0,04	3	0,06
			3	0,03-0,04	6	0,08
	2	0,03-0,04	6	0,04-0,05	9	0,16
	10	0,10	8	0,05	12	0,24
	20	0,50-0,80	10	0,06-0,08	15	0,36
	23	1,50-1,70	20	0,5-0,8	18	0,65
			23	1,8-2,0	21	0,80
					24	6,80
5,0-6,0	5	0,02-0,03	5	0,03-0,04	5	0,03-0,04
	10	0,02-0,03	10	0,03-0,04	10	0,03-0,04
	15	0,03-0,05	20	0,03-0,04	15	0,05-0,09
	20	0,05-0,06	25	0,03-0,04	20	0,20-0,30
	25	0,06-0,08	30	0,05-0,08	25	0,30-0,50
	30	0,20-0,30	35	0,20-0,30	25	4,20-4,60
			40	2,15-2,50	40	
2,0-3,0	5	0,02-0,03	5	0,02-0,03	5	0,03-0,04
	10	0,02-0,03	10	0,02-0,03	10	0,04-0,05
	15	0,02-0,03	15	0,02-0,03	15	0,04-0,05
	20	0,03-0,04	20	0,02-0,03	20	0,05-0,06
	25	0,03-0,04	30	0,03-0,04	25	0,06-0,08
	30	0,04-0,05	40	0,04-0,05	30	0,08-0,10
					35	0,20-0,30
					40	0,30-0,50

но со специалистами ГУП «Toshissiqquvvati» не выявили каких-либо выраженных недостатков, и на момент написания данной статьи никаких претензий со стороны потребителей к поставленным системам химводоподготовки получено не было.

Немаловажно отметить, что создаваемые системы благодаря своим конструктивным особенностям также наилучшим образом адаптированы к качеству воды и климатическим условиям Узбекистана. Изготовленные опытные образцы разработанной системы были представлены на Форуме инноваций InnoWeek 2019, организованном Министерством инновационного развития Республики Узбекистан и прошедшем в Ташкенте в период 29–31 октября 2019 г., что позволило выявить большой интерес к разработке со стороны представителей государственных и коммерческих организаций Узбекистана.

Данная разработка была включена в дорожную карту мероприятий по исполнению постановления Президента Республики Узбекистан от 14 июля 2018 г. № ПП-3855 «О дополнительных мерах по повышению эффективности коммерциализации результатов

научной и научно-технической деятельности». В настоящее время выпускаемые в Институте ядерной физики системы химводоподготовки с использованием нанокompозитного катионита активно внедряются в мини-котельных, строящихся в рамках модернизации системы теплоснабжения (рис. 5). Общая сумма выполняемых в 2019 г. пилотных договоров составляет более 260 млн сумов.

Выводы

В соответствии с Указом Президента Республики Узбекистан от 14 июля 2018 года № ПП-3855, в Институте ядерной физики Академии наук Республики Узбекистан проводятся работы по реализации дорожной карты в целях обеспечения коммерциализации разработки «Система химводоподготовки с использованием нанокompозитного катионита». Производственные мощности КБ с ОЗ при Институте ядерной физики полностью подготовлены к серийному выпуску продукции по заказам. В настоящее время выпускаемые системы химводоподготовки с использованием нанокompозитного катионита активно внедряются в стране, в т.ч. в мини-котельных, строящихся в рамках модернизации системы теплоснабжения.

Предлагаемый подход открывает возможности широкого использования создаваемых систем химводоподготовки в Узбекистане, позволит отказаться от импорта данной продукции и обеспечить полностью потребности внутри страны. Благодаря использованию сырья и материалов, имеющих и доступных на рынке Узбекистана, стоимость создаваемых систем водоподготовки более чем в 2 раза ниже по сравнению с иностранными аналогами, применяемыми в настоящее время. Кроме того, создаваемые системы благодаря своим конструктивным особенностям наилучшим образом адаптированы к качеству воды и климатическим условиям Узбекистана, а также обеспечивают малые потери напора, что позволит успешно применять их как в напорных, так и в проточных схемах. Научно-технический уровень разработки по сравнению с известными в мировой практике определяется тем, что в составе создаваемых систем химводоподготовки (ХВО) используется модифици-



Рис. 5. Система химводоподготовки с применением нанокompозитного катионита, установленная в мини-котельной, эксплуатируемой ГУП «Toshissiqquvvati» в Мирзо-Улугбекском районе г. Ташкент

рованный наночастицами серебра катионит, биоцидное воздействие которого позволяет значительно увеличить срок эксплуатации систем в климатических условиях Узбекистана при незначительном увеличении стоимости катионита (не более 10-12%).

Источники и литература

1. Водоподготовка: Справочник / Под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. – 240 с.
2. Khaydarov R.A., Khaydarov R.R., Evgrafova S., Estrin Y. Using silver nanoparticles as an antimicrobial agent // *Biodefence, Series: NATO Science for Peace and Security Series A: Chemistry and Biology*, Springer, Netherlands – 2011. – pp. 169-177.
3. Garipov I.T., Khaydarov R.R., Gapurova O.U., Khaydarov R.A., Firdaus M.L., Efimova I.L., Evgrafova S.Yu. Silver nanoparticles as a new generation of antimicrobial prophylaxis // *J. Sib. Fed. Univ. Biol.* – 2019. – 12(3) – pp. 266-276.
4. Khaydarov R.R., Khaydarov R.A., Gapurova O., Evgrafova S., Wagner S., Cho S.Y. Environmental and Human Health Issues of Silver Nanoparticles Applications // *Environmental Security and Ecoterrorism, NATO Science for Peace and Security Series C: Environmental Security.* – 2011. – pp. 117-127.
5. Sambale F., Wagner S., Stahl F., Khaydarov R.R., Scheper T. and Bahnemann D. Investigations of the Toxic Effect of Nanoparticles on Mammalian Cell Lines // *Journal of Nanomaterials.* – Volume 2015. – Article ID 136765 – 9 p.
6. Khaydarov R.A., Khaydarov R.R., Gapurova O., Estrin Y. A novel method of continuous fabrication of aqueous dispersions of silver nanoparticles // *Int. J. Nanoparticles.* – 2010. – №3. – pp. 77-91.
7. Khaydarov R.A., Khaydarov R.R., Cho S. Natural disaster: prevention of drinking water scarcity // *Threats to Global Water Security* (Jones, J. et. al.: Eds.), Springer, Netherlands. – 2009. – pp. 381-384.
8. Garipov I., Khaydarov R.R., Khaydarov R.A., Gapurova O. Silver nanoparticles as a biocide for water treatment applications // R. Prasad, K. Thirugnanasambandham (eds.), *Advanced Research in Nanosciences for Water Technology, Nanotechnology in the Life Sciences*, Springer Nature Switzerland. – 2019. – pp. 407-419.
9. Вода питьевая. Гигиенические требования и контроль за качеством. O'zDSt 950:2011.
10. Вольф И.В. Подготовка воды для парогенераторов с помощью ионообменников / И.В. Вольф, А.В. Романов, М.А. Синякова // *Журн. прикл. химии.* – 2010. – Т. 83. – Вып. 5. – С. 858-860.
11. Кравченко Т.А. и др. Глубокое удаление молекулярного кислорода из воды с использованием нано-композита металл-ионообменник / *Вода: экология и химия.* – 2009. – №8. – С. 7-12.
12. Волков В.В., Кравченко Т.А., Ролдугин В.И. Наночастицы металлов в полимерных каталитических мембранах и ионообменных системах для глубокой очистки воды от молекулярного кислорода // *Успехи химии.* – 2013. – Т. 82. – № 5. – С. 465-482.
13. Хорольская С.В. Кооперативные взаимодействия наночастиц металла (Cu, Ag, Bi, Ni) в ионообменной матрице при восстановлении растворенного в воде кислорода: автореф. дисс. кандидата химических наук. – Воронеж, 2014.

Рецензент:

Ибрагимова Э.М., доктор физико-математических наук, Центр передовых технологий Министерства инновационного развития Республики Узбекистан.