

EDN: YRJXKZ

УДК 621.182

Development of a Chemical Water Treatment System for a Steam Generator, Which Use in the Oil Field

Aleksandr A. Ershov*, Sulpan I. Kuskarbekova,
Danil U. Zulkarnaev and Konstantin V. Osintsev
*South Ural State University
Chelyabinsk, Russian Federation*

Received 12.06.2023, received in revised form 10.08.2023, accepted 28.09.2023

Abstract. The operation of a chemical water treatment system in the “softening” mode for the uninterrupted operation of a direct-flow coil type steam generator at an oilfield site is investigated. The main problem arising during the operation of a chemical water treatment system for a steam machine is described. A diagram of the installation of a Na-cationite filter operating as part of a water treatment unit is presented. An increase in water hardness is predicted due to the depletion of the filter material during the “softening” mode during the operation of the Na-cationite filter. A model of a coil in steam generator is presented when the water quality deteriorates due to exceeding the time of the “softening” mode. Conclusions are drawn about the adjustment of the time of the “softening” mode and the possible editing of the mode maps of the chemical water treatment system for timely switching from the main filter to the backup one in order to avoid deterioration of water quality.

Keywords: oil industry, water treatment, desalination.

Acknowledgement. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No0 22–19–20011, <https://rscf.ru/project/22–19–20011/>.

Citation: Ershov A. A., Kuskarbekova S. I., Zulkarnaev D. U., Osintsev K. V. Development of a chemical water treatment system for a steam generator, which use in the oil field. J. Sib. Fed. Univ. Eng. & Technol., 2023, 16(8), 912–921. EDN: YRJXKZ



Разработка системы химической очистки воды для паровой установки, применяемой в нефтепромысле

**А. А. Ершов, С. И. Кускарбекова,
Д. У. Зулкарнаев, К. В. Осинцев**

*Южно-Уральский государственный университет
Российская Федерация, Челябинск*

Аннотация. Исследована работа системы химической очистки воды в режиме «умягчение» для бесперебойной работы парового прямооточного котла змеевикового типа, работающего на нефтепромысловой площадке. Описана основная проблема, возникающая при эксплуатации системы химической очистки воды для котельного агрегата. Представлена схема установки Na-катионитового фильтра, работающего в составе водоподготовительной установки. Спрогнозировано повышение жёсткости воды в связи с истощением фильтрующего материала во время режима «умягчение» при работе Na-катионитового фильтра. Представлена модель змеевика парового прямооточного котла змеевикового типа при ухудшении качества воды из-за превышения времени режима «умягчение». Сделаны выводы о корректировке времени режима «умягчение» и возможном редактировании режимных карт системы химической очистки воды для своевременного переключения с основного фильтра на резервный во избежание ухудшения качества воды.

Ключевые слова: нефтепромысел, очистка воды, опреснение.

Благодарности. Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 22–19–20011 <https://rscf.ru/project/22–19–20011/>.

Цитирование: Ершов А. А. Разработка системы химической очистки воды для паровой установки, применяемой в нефтепромысле / А. А. Ершов, С. И. Кускарбекова, Д. У. Зулкарнаев, К. В. Осинцев // Журн. Сиб. федер. ун-та. Техника и технологии, 2023, 16(8). С. 912–921. EDN: YRJXKZ

Введение

В настоящее время существует проблема организации работы системы химической очистки для паровых котлов, которые предназначены для получения пара для бытовых нужд на нефтепромысловой площадке [1, 2]. Система химической водоочистки (далее по тексту – ХВО) представляет собой установку, состоящую из двух Na-катионитовых фильтров и из со-лерастворителя. Необходимо наличие двух установок системы ХВО на случай поломки одной из установок.

Каждый режим ХВО (умягчение, взрыхление, регенерация и отмывка) имеет регламентированное время, которое зависит от скорости фильтрации, степени загрязнения сырой исходной воды и степени жёсткости на выходе. Данные режимы представляются в виде режимных карт системы ХВО для операторов. Это проводится для того, чтобы каждый фильтр работал по заданному правильному сроку эксплуатации и во избежание истощения фильтрующего материала [3].

Основная проблема, которая часто возникает при эксплуатации системы ХВО, – это позднее переключение фильтров на регенерацию из-за широкого временного диапазона. Для понятия сути проблемы необходимо продемонстрировать загрязнение змеевика котла в момент

повышения жёсткости воды в конце режима «умягчения» по времени, чтобы оператор заранее мог оценить возможность сокращения времени этого режима.

Метод Na-катионирования основан на химической ионообменной реакции, в результате которой катион натрия Na^+ занимает место катионов кальция и магния, тем самым происходит умягчение воды. Na-катионитовые фильтры широко применяются в котельных и на тепловых электростанциях и электроцентралях. Формулы (1, 2) являются основными для процесса ионного обмена в Na-катионитовых фильтрах.



На рис. 1 показана принципиальная схема блочной водоподготовительной установки ВПУ – 1,0 У-М, которая используется для очистки воды перед подачей её в паровой прямоточ-

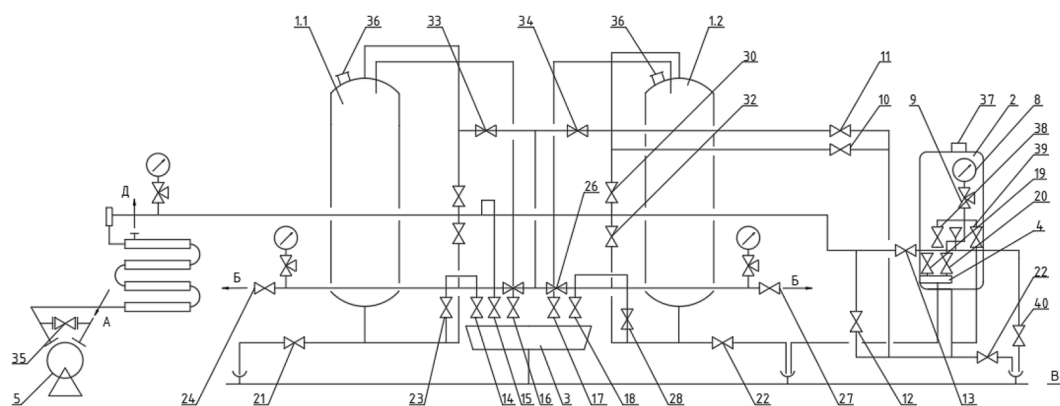


Рис. 1. Принципиальная схема блочной водоподготовительной установки ВПУ – 1,0 У-М: А – подвод воды на обработку; Б – отвод обработанной воды; В – дренаж; Г – подвод теплоносителя; Д – отвод теплоносителя; 1.1, 1.2 – Na- катионитные фильтры; 2 – солерастворитель; 3, 4 – бачки отбора проб; 5 – агрегат электронасосный ВК-1/16; 6 – водоподогреватель; 7 – термометр; 8 – манометр; 9 – кран трехходовой для манометра; 10, 11 – вентили на линии подвода раствора соли в фильтры; 12 – вентиль на линии взрыхления антрацита (фильтрующего слоя); 13 – вентиль на линии подвода воды в солерастворитель; 14, 15, 18, 20, 38, 39 – вентили для отбора пробы воды; 16, 17, 19 – вентили на линии сброса воздуха и взрыхляющей воды; 21, 22 – вентили на линии сброса в дренаж; 23, 24, 27, 28 – вентили на линии отвода обработанной воды; 29, 30 – вентили на линии подачи исходной воды на обработку; 31, 32 – вентили на линии подачи воды на взрыхление; 25, 26, 33, 34 – вентили на линии подачи воды из фильтра первой ступени в фильтр второй ступени; 35 – вентиль на байпасной (обводной) линии насоса; 36 – люк загрузки катионита; 37 – люк загрузки антрацита; 40 – вентиль на линии отвода воды при взрыхлении антрацита

Fig. 1. Schematic diagram of the block water treatment plant VPU – 1,0 U-M: A – water supply for treatment; B – drainage of treated water; C – drainage; D – coolant supply; D – coolant removal; 1.1, 1.2 – Na- cationite filters; 2 – salt solute; 3, 4 – sampling tanks; 5 – electric pump unit VK-1/16; 6 – water heater; 7 – thermometer; 8 – pressure gauge; 9 – three-way valve for pressure gauge; 10, 11 – valves on the line of salt solution supply to filters; 12 – valve on the line of anthracite loosening (filter layer); 13 – valve on the line of water supply to solerastvoritel; 14, 15, 18, 20, 38, 39 – valves for water sampling; 16, 17, 19 – valves on the air and loosening water discharge line; 21, 22 – valves on the drainage discharge line; 23, 24, 27, 28 – valves on the treated water discharge line; 29, 30 – valves on the source water supply line for treatment; 31, 32 – valves on the water supply line for loosening; 25, 26, 33, 34 – valves on the water supply line from the first stage filter to the second stage filter; 35 – valve on the bypass (bypass) pump line; 36 – cationite loading hatch; 37 – anthracite loading hatch; 40 – valve on the water discharge line when anthracite is loosened

ный котёл змеевикового типа. В состав блочно-модульной паровой котельной входит паровой прямоточный котёл и система ХВО, универсальная блочная водоподготовительная установка ВПУ – 1,0 У-М, а также транспортабельная паровая установка ППУ-1600.

Исследование О. Ю. Кузнецова, Д. А. Афанасьевой и Д. А. Алябьевой [4] показало, что одним из способов ресурсосбережения является обработка сточных вод реагентными и безреагентными методами и направление сточных вод в цикл восстановления обменных ёмкостей катионита.

В исследовании В. Г. Михайлова, А. Н. Малюгина, Г. С. Михайлова, К. Ю. Вильгельма [5] предлагается модернизация режима «умягчение» Na-катионитового фильтра путём перевода установки с противоточного режима на прямоточный. Вследствие этого снижается расход солевого раствора при проведении регенерации фильтра.

В научной работе М. А. Морозовой, А. А. Карасева, А. В. Вязникова [6] рассмотрен вопрос оптимизации системы ХВО путём замены H-катионитовых фильтров на Na-катионитовые фильтры.

Однако в данных работах не отражен тот период, когда необходимо заканчивать режим «умягчения» Na-катионитового фильтра и когда нужно переключать очистку воды на вторую ступень. Эти факторы стали отправной точкой для более тщательного изучения режима «умягчение» Na-катионитового фильтра.

Изучение режима «умягчение» системы химической очистки воды для паровых прямоточных котлов змеевикового типа ранее не проводилось.

Материалы и методы исследования

При повышении жёсткости воды возникает большое количество загрязнений поверхностей нагрева парового прямоточного котла змеевикового типа, что приводит к нерациональному расходу топлива и к уменьшению паропроизводительности [7].

Во время работы Na-катионитовой установки фильтрующий материал истощается, и качество воды становится хуже. Необходимо спрогнозировать момент истощения фильтрующего материала, не дожидаясь критических показателей жёсткости воды, и переключить на систему ХВО на вторую ступень очистки (или вторую систему ХВО), сохраняя качество воды на должном уровне.

Для решения поставленной задачи необходимо рассчитать время режима «умягчение» для рассматриваемой системы ХВО и парового прямоточного котла. Время режима «умягчение» рассчитывается по формуле (3) [8]:

$$t = \frac{V}{w \cdot F}, \quad (3)$$

где V – объём бака питательной воды, м³; w – скорость фильтрации, м/ч; F – площадь фильтрования, м².

Объём бака питательной воды для транспортабельной парогенераторной установки ППУ-1600 составляет 1,6 м³. Скорость фильтрации Na-катионитового фильтра в водоподготовительной установке ВПУ – 1,0 У-М имеет значение – 6,7 м/ч. Площадь фильтрования Na-катионитового фильтра в данной системе ХВО равна 0,15 м².

Максимальная жёсткость воды для бесперебойной эксплуатации Na-катионитового фильтра составляет 20 мкг-экв/л.

Для построения зависимости повышения жёсткости воды от времени режима «умягчение», необходимо спрогнозировать увеличение жёсткости воды в процессе работы водоподготовительной установки Na-катионирования за регламентированный промежуток времени. График покажет изменение качества воды во времени по мере истощения фильтрующего материала.

Результаты и их обсуждение

В табл. 1 представлены результаты расчётов времени и прогнозов значений жёсткости воды при работе системы ХВО в режиме «умягчение».

На рис. 2 представлена зависимость жёсткости воды от времени режима «умягчение». Исходя из графика, полученного по результатам расчёта и прогнозирования работы Na-катионитового фильтра в режиме «умягчение», можно сказать, что допустимое время данного режима работы фильтра лежит в промежутке от точки А до точки С, так как предельно допустимая жёсткость воды при эксплуатации установки ВПУ – 1,0-М составляет 20 мкг-экв/л. Если проводить умягчение воды более 60 минут, то качество теплоносителя для котельного агрегата станет значительно хуже [9].

По результатам расчётов можно сказать, что чем меньше время процесса «умягчения» Na-катионитового фильтра, тем меньше жёсткость воды. Это значит, что при меньшем времени умягчения воды в системе ХВО меньше будет количество загрязнений поверхностей нагрева парового прямоточного котла змеевикового типа.

На рис. 2 показана зависимость жёсткости воды от времени режима умягчения воды в трёх циклах системы химической очистки воды, каждый из которых состоит из 4 режимов: умягчение, взрыхление, регенерация и отмывка.

Исходя из рис. 3, можно сказать, что с каждым последующим циклом системы ХВО время режима умягчения становится меньше. Это значит, что обслуживающему персоналу необходимо переключать Na-катионитовый фильтр на режим «взрыхление» катионита либо переключать на резервный фильтр раньше с каждым последующим циклом.

Таблица 1. Результаты расчётов времени и прогнозов значений жёсткости воды при работе системы ХВО в режиме «умягчение»

Table 1. Results of calculations of time and forecasts of water hardness values during operation of the HVAC system in the “softening” mode

Время режима «умягчение»	Жёсткость воды, мкг-экв/л в циклах установки системы ХВО		
	1 цикл	2 цикл	3 цикл
20 минут	–	–	10
30 минут	–	10	15
40 минут	10	15	20
50 минут	15	20	25
60 минут	20	25	–
70 минут	25	–	–

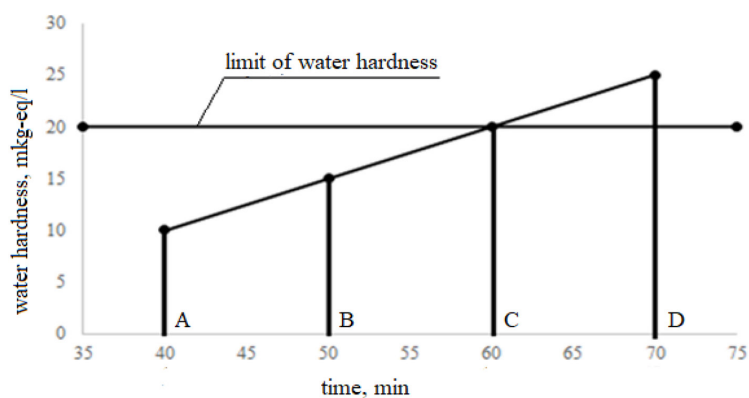


Рис. 2. Зависимость повышения жёсткости воды от времени режима «умягчение»

Fig. 2. Dependence of the increase in water hardness on the time of the “softening” mode

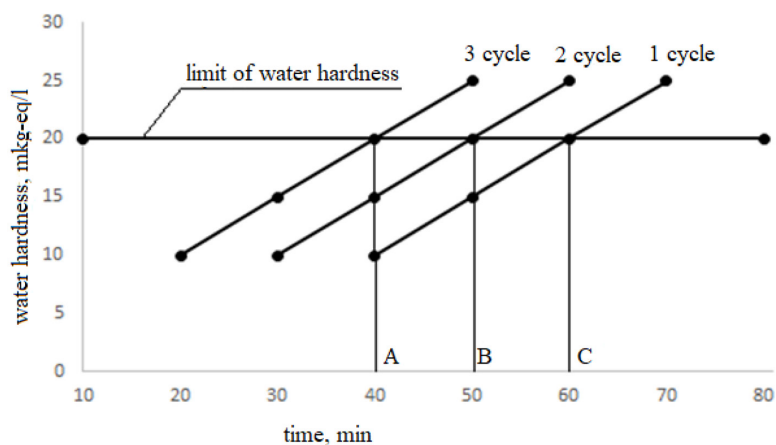


Рис. 3. Зависимость повышения жёсткости воды от времени режима «умягчение» для трёх циклов работы Na-катионитового фильтра

Fig. 3 Dependence of the increase in water hardness on the time of the “softening” mode for three cycles of operation of the Na-cationite filter

Для изучения влияния своевременного переключения с режима умягчения воды был смоделирован теплообмен между топочными газами и водой с использованием программируемой инженерной среды Ansys.

Сначала была создана геометрическая модель топочной камеры парового котла змеевикового типа, а также сам змеевик. В рамках создания этой модели было допущено, что факел пламени имеет фиксированный размер и температуру в каждой своей точке. Также было создано поле обратных скоростей, для имитации атмосферного воздуха [10]. При проектировании была использована программа Ansys SpaceClaim.

Следующим этапом стало создание конечно-элементной сетки при помощи программы Ansys Icem CFD поверх уже созданной геометрической модели. Для воды, проходящей по змеевику, были подобраны необходимые параметры, указан материалы для стенок змеевика, а так-

же обмуровки котельного агрегата. Вода была взята в двух разных состояниях, близких по параметрам к необходимой жесткости.

После введения всех параметров, которые требуются для решения, был произведён запуск расчёта модели, результаты которого представлены в виде схемы распределения температур.

На рис. 4 показана модель процесса нагревания воды и дальнейшего парообразования при своевременном переключении с режима умягчения воды на режим взрыхления катионита.

На рис. 5 показана модель процесса нагревания воды и дальнейшего парообразования в том случае, когда переключение с режима умягчения воды на режим взрыхления катионита происходит несвоевременно.

Перспективы совершенствования установки

В настоящее время разработки в области возобновляемых источников энергии позволяют дополнить практически любой технологический агрегат в части экологически чистых и энергоэффективных технологий. Наиболее простым решением в этой области, с точки зрения авторов, является тепловой насос – установка, действующая за счёт использования низкопотенциальной или сбросной энергии. Для транспортабельных установок в условиях Крайнего Севера для решения проблемы сброса сточных вод котельной при температуре 40–45 °С в грунт – в вечную мерзлоту – использование теплового насоса внесет не только экологическую составляющую, но и экономическую, поскольку будет использоваться низкопотенциальная теплота. На рис. 6 приведена технологическая схема работы теплового насоса.

Принцип работы установки по рис. 6 заключается в следующем: в замкнутом контуре циркулирует хладагент, который испаряется при низких температурах в испарителе 2 за счет теплоты сбросной воды 1, далее пар хладагента сжимается в компрессоре 3, а в конденсаторе 4 пар конденсируется и отдает теплоту нагреваемой среде – воде, после чего давление пара сбрасывается в дросселе 6 и цикл повторяется.

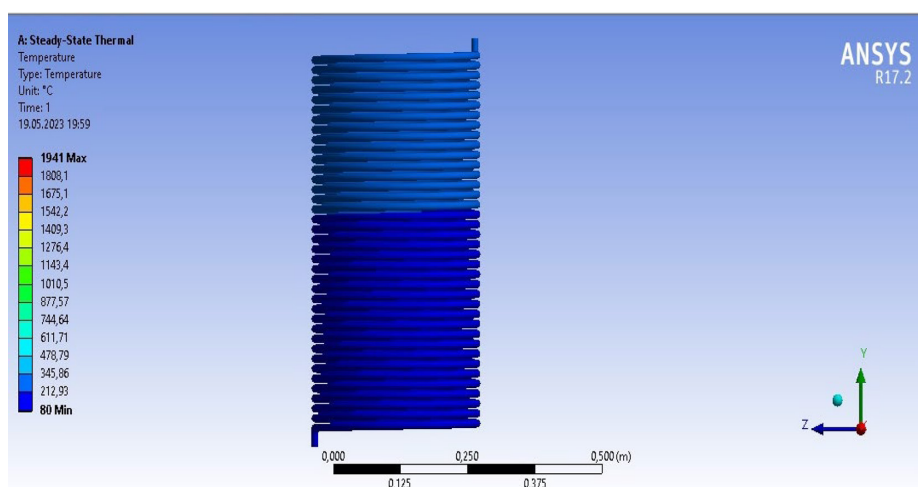


Рис. 4. Нагревание воды в змеевике при своевременном переключении с режима «умягчение» на режим «взрыхление»

Fig. 4. Heating of water in the coil with timely switching from the “softening” mode to the “loosening” mode

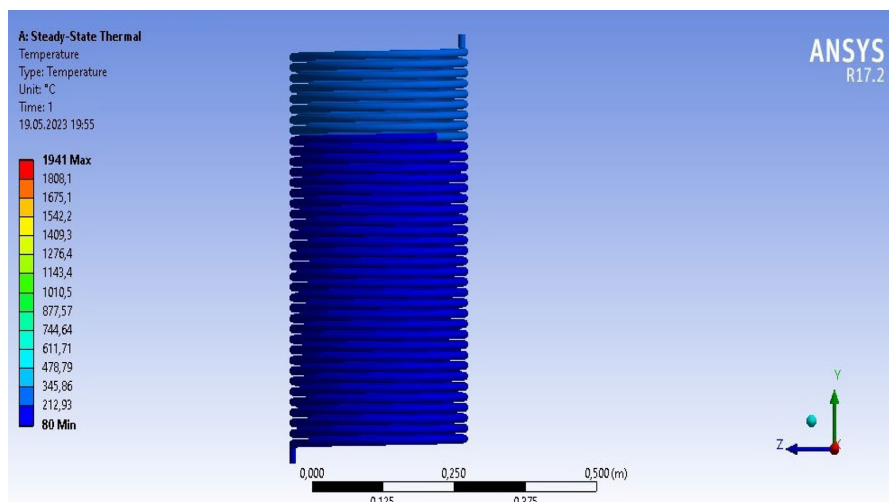


Рис. 5. Нагревание воды в змеевике при несвоевременном переключении с режима «умягчение» на режим «взрыхление»

Fig. 5. Heating of water in the coil in case of untimely switching from the “softening” mode to the “loosening” mode

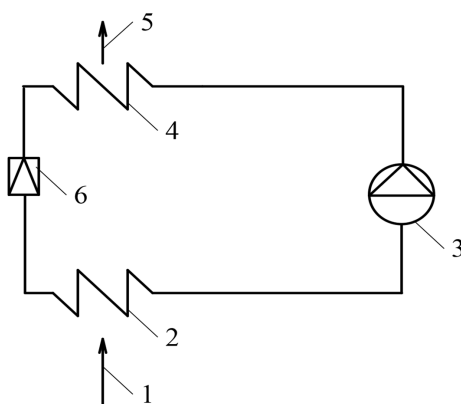


Рис. 6. Принципиальная схема работы теплового насоса: 1 – сбросная вода (низкопотенциальный источник теплоты), 2 – испаритель, 3 – компрессор, 4 – конденсатор, 5 – нагретая исходная (или очищенная) вода, 6 – редукционный клапан (дрозсель)

Fig. 6. Schematic diagram of the heat pump operation: 1 – waste water (low-potential heat source), 2 – evaporator, 3 – compressor, 4 – condenser, 5 – heated source (or purified) water, 6 – pressure reducing valve (throttle)

Предлагаемое авторами решение по совершенствованию технологии очистки воды решает проблемы теплового загрязнения окружающей среды в северных районах страны.

Заключение

Данное исследование показало, каким образом можно рассчитать и спрогнозировать момент либо переключения с режима умягчения воды на режим взрыхления катионита, либо переключения на резервный фильтр для конкретной установки системы ХВО и котельного агрегата. Были сделаны выводы о последствиях несвоевременного переключения режимов си-

стемы ХВО. По итогам данных расчётов и прогнозов можно составить режимную карту Натрионитового фильтра, которая поможет персоналу сохранить установку систему ХВО в работоспособном состоянии, продлив тем самым срок эксплуатации.

Список литературы / References

[1] Дудкин М. М., Осинцев К. В., Кускарбекова С. И. Опытное исследование работы парового котла змеевикового типа при эксплуатации на северном нефтяном месторождении, *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*, 2019, 19(4), 14–25 [Dudkin M. M., Osintsev K. V., Kuskarbekova S. I. Experimental investigation of coil type steam generator performance when used in north oil fields. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. «Power Engineering»*, 2019, 19(4), 14–25 (In Rus.)]

[2] Осинцев К. В., Кускарбекова С. И., Савостеенко Н. В., Максимов Н. М. Опытное исследование аэро- и гидравлической систем прямоточного котла на лабораторном стенде путем внедрения автоматического управления устройствами и сбора данных, *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия «Энергетика»*, 2022, 22(2), 92–103 [Osintsev K. V., Kuskarbekova S. I., Savosteenko N. V., Maksimov N. M. Experimental study of aero-and hydraulic systems in a direct-flow boiler on a laboratory stand with the introduction of automatic control of devices and data collection. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*, 2022, 22(2), 92–103 (In Rus.)]

[3] Полозов М. Б. *Экология нефтегазодобывающего комплекса*. Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 174 [Polozov M. B. *Ecology of the oil and gas production complex*, Izhevsk: Udmurt State University Publ., 2012. 174 (In Rus.)]

[4] Кузнецов О. Ю., Афанасьева Д. А., Алябьева Д. А. Ресурсосберегающая технология регенерации натрий-катионитных фильтров, *Успехи в химии и химической технологии*, 2018, 32(12), 41–43 [Kuznetsov O. Yu., Afanasyeva D. A., Alyabyeva D. A. Resource-saving technology of regeneration of sodium-cationite filters. *Advances in chemistry and chemical technology*, 2018. 32(12). 41–43 (In Rus.)]

[5] Михайлов В. Г., Малюгин А. Н., Михайлов Г. С., Вильгельм К. Ю. Усовершенствование процесса химводоочистки на натрий-катионитных фильтрах, *Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева*, 2020, 2, 280–285 [Mikhailov V. G., Malyugin A. N., Mikhailov G. S., Wilhelm K. Yu. Improvement of the process of chemical water purification on sodium-cationite filter, *Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev*, 2020, 2, 280–285 (In Rus.)]

[6] Морозова М. А., Карасев А. А., Вязников А. В. Решение проблемы оптимизации схемы водоподготовительной установки Первомайской ТЭЦ с целью повышения эффективности производства тепловой энергии, *Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов*, 2017, 2, 163–168 [Morozova M. A., Karasev A. A., Vyaznikov A. V. Solving the problem of optimizing the scheme of the Pervomaiskaya CHPP water treatment plant in order to increase the efficiency of thermal energy production, 2017, 2, 163–168 (In Rus.)]

[7] Копылов А. С., Очков В. Ф., Чудова Ю. В. *Процессы и аппараты передовых технологий водоподготовки и их программированные расчёты*. М.: Издательский дом Московского Энергетического Института, 2009. 222 [Kopylov A. S., Ochkov V. F., Chudova Yu. V. *Processes and*

devices of advanced water treatment technologies and their programmed calculations, Moscow, Publ. of Moscow Energy Institute, 2009. 222 (In Rus.)]

[8] Лифшиц О. В. *Справочник по водоподготовке котельных установок*. Москва: Энергия, 1976. 288 [Lifshits O. V. *Handbook on water treatment of boiler units*, Moscow: Energiya Publ., 1976. 288 (In Rus.)]

[9] Никифоров А. Ф., Кутергин А. Ф., Липунов И. Н., Первова И. Г., Семенищев В. С. *Физико-химические основы процессов очистки воды*. Екатеринбург: Изд-во Уральского Федерального Университета, 2016. 164 [Nikiforov A. F., Kutergin A. F., Lyapunov I. N., Pervova I. G., Semenishchev V. S. *Physico-chemical bases of water purification processes*. Ekaterinburg, Publ. of Ural Federal University, 2016, 164 (In Rus.)]

[10] Houston F., Voero V. J., Randy R. Enhanced activated sludge treatment of high strength bio-inhibitory industrial wastewater, *Proceedings of the Water Environment Federation*, 2004, 6, 598–607.