

ПОДБОР СИСТЕМЫ ХИМИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ ВОДЫ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ РАБОТЫ ПАРОВОГО ПРЯМОТОЧНОГО КОТЛА ЗМЕЕВИКОВОГО ТИПА

Е.В. Соломин, solominev@susu.ru

С.И. Кускарбекова, kuskarbekovasi@susu.ru

Д.В. Бехтерев, dmitriy.behtereve@mail.ru

А.А. Ершов, sanyayershov2000@yandex.ru

Д.У. Зулкарнаев, slendan@mail.ru

Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия

Аннотация. По сравнению с водогрейными и барабанными паровыми котлами для бесперебойной работы прямоточных паровых котлов змеевикового типа требуется улучшенное качество питательной воды, чего трудно добиться с помощью обычных фильтров. Риск образования отложений на поверхности змеевика из-за плохого качества исходной жидкости вынуждает подбирать наилучший метод химической очистки воды с учётом реальных условий эксплуатации передвижной парогенераторной установки. Рассмотрение наиболее распространённых методов химической очистки воды и моделирование течения теплоносителя по змеевиковым трубам помогает определиться с составляющими установки для химической подготовки питательной воды. В статье представлены результаты расчётов фильтров различных типов для очистки воды, которые предназначены для обеспечения нормативных химических показателей теплоносителя, и результаты моделирования коаксиального змеевика при движении химически очищенной и исходной воды. Предложен оптимальный вариант химической очистки питательной воды, а также обоснование выбранного варианта.

Ключевые слова: установка обратного осмоса, Na-катионитовый фильтр, электромагнитное воздействие, образование отложений, паровой прямоточный котёл, коаксиальный змеевик

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

Для цитирования: Подбор системы химической очистки воды для совершенствования работы парового прямоточного котла змеевикового типа / Е.В. Соломин, С.И. Кускарбекова, Д.В. Бехтерев и др. // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2023. Т. 23, № 1. С. 99–105. DOI: 10.14529/power230110

Original article
DOI: 10.14529/power230110

THE CHEMICAL WATER TREATMENT FOR IMPROVING COIL-TYPE DIRECT-FLOW STEAM GENERATORS

E.V. Solomin, solominev@susu.ru

S.I. Kuskarbekova, kuskarbekovasi@susu.ru

D.V. Bekhterev, dmitriy.behtereve@mail.ru

A.A. Ershov, sanyayershov2000@yandex.ru

D.U. Zulkarnaev, slendan@mail.ru

South Ural State University, Chelyabinsk, Russia

Abstract. Compared to boilers and drum steam generators, the uninterrupted operation of coil-type direct-flow steam generators requires improved feed water quality, which is difficult to achieve with conventional filters. The risk of deposits forming on the coil surface due to the poor quality of the water requires the best method of chemical water treatment, taking into account the operating conditions of the steam generator. The consideration of the most common methods of chemical water treatment and the modeling of the heat carrier flow through the coil pipes helps determine the chemical preparation of feed water. The article presents the results for water filters of various types, which are designed to ensure the normative chemical parameters of the coolant and the results of the modeling of the coaxial coil during the movement of chemically purified and source water. The optimal chemical purification of feed water is given.

Keywords: reverse osmosis installation, Na-cationite filter, electromagnetic effect, sediment formation, direct-flow steam generator, coaxial coil

Acknowledgments. The study was supported by the Russian Science Foundation grant No. 22-19-20011, <https://rscf.ru/project/22-19-20011/>.

For citation: Solomin E.V., Kuskarbekova S.I., Bekhterev D.V., Ershov A.A., Zulkarnaev D.U. The chemical water treatment for improving coil-type direct-flow steam generators. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Power Engineering*. 2023;23(1):99–105. (In Russ.) DOI: 10.14529/power230110

Введение

Химическая подготовка воды играет важнейшую роль в исправной работе любого котельного агрегата. Данная операция предназначена для обеспечения строго регламентированных показателей качества питательной воды.

Для разных видов котельных агрегатов существуют различные требования по химическим показателям воды. Для прямоточных котельных агрегатов определены жёсткие требования по качеству воды [1]. Это связано с тем, что в таких котлах отсутствует продувка поверхностей нагрева.

Основными химическими показателями воды являются жёсткость, щёлочность, водородный показатель (рН), содержание нефтепродуктов, фенолов, а также химических элементов, таких как магний, кальций, натрий, железо [2].

Несоблюдение требований по химическому составу воды или отсутствие системы химводоочистки (далее по тексту – ХВО) может привести к загрязнению поверхностей нагрева котла, коррозии и выходу из строя агрегата [3].

На рис. 1 показаны эксплуатационные отложения на внутренних стенках труб змеевика парового прямоточного котла, эксплуатируемого в реальных условиях на кустовой площадке месторождения нефти Варьёган (ХМАО) [4].



Рис. 1. Загрязнение змеевика при ненадлежащем качестве питательной воды

Fig. 1. Coil contamination with poor quality feed water

Вследствие наличия данных загрязнений бесперебойная работа данного агрегата и получение качественного пара не представляются возможными. Стоит отметить, что вода перед подачей в котёл проходила химическую очистку, однако данная процедура оказалась неэффективной из-за плохого качества исходной воды [5].

Постановка задачи

В процессе работы прямоточного парового котла змеевикового типа следует найти наиболее проблемные места, в которых будут появляться загрязнения поверхности змеевиковых труб. При расчёте и выборе системы ХВО необходимо учитывать характер движения воды и пара, который сказывается на местах отложений внутри коаксиальных труб.

Моделирование системы химической водоподготовки прямоточного парового котла змеевикового типа заключается в наблюдении за изменением скорости течения воды в змеевике, который помещён в цилиндр, при использовании системы ХВО и при её отсутствии. Данная модель показывает появление загрязнений во время течения воды и парообразования внутри змеевика.

Для подбора и проектирования системы ХВО, которая будет обеспечивать требуемые химические показатели воды на входе в паровой прямоточный котёл змеевикового типа, необходимо выполнить следующие задачи:

- 1) обработка экспериментальных данных с реальной установки прямоточного парового котла и моделирование течения воды внутри змеевиковых труб при наличии системы ХВО и при её отсутствии;
- 2) подбор нескольких оптимальных вариантов системы ХВО;
- 3) расчёт систем ХВО;
- 4) предложение наилучшего варианта по результатам предыдущих действий;
- 5) рассмотрение практического применения выбранной системы ХВО в реальных условиях.

Теоретическая часть

Для выбора элементов системы ХВО следует сравнить следующие варианты: установка Na-катионитового фильтра, установка обратного осмоса, установка электромагнитного воздействия на воду. Все эти методы исправно и эффективно применяются для очистки воды в бытовых и промышленных условиях, а также являются доступными для потребителей и производственных предприятий.

Принцип работы Na-катионитового фильтра основан на реакции ионного обмена, в результате которой натрий-катионит занимает место ионов кальция и магния, тем самым происходит умягчение воды. Такой тип фильтра может обеспечить минимальную жёсткость 0,1 мг-экв/л [6]. Традиционно данная установка состоит из двух баков-осветлителей и двух Na-катионитовых фильтров. Метод Na-катионирования эффективно применяется в составе системы ХВО для барабанных паровых котлов.

Очистка воды от примесей в установке обратного осмоса происходит за счёт приложения давления со стороны протекающей исходной воды в обратноосмотической мембране. Также обработка воды происходит в механических и сорбционных фильтрах, через которые вода протекает перед мембраной. Степень очистки обратноосмотической мембраны от солей жёсткости составляет 96,2 % [7], степень очистки сорбционного угольного фильтра от нефтепродуктов и от щелочно-земельных металлов равна 95 % [8].

Сущность метода электромагнитного воздействия на воду состоит в кристаллизации в толще водяного потока накипеобразующих элементов, таких как примеси кальция, магния и железа. При этом соли жёсткости уносятся с потоком воды, а появившиеся ранее отложения удаляются [9]. После проведения метода электромагнитной очистки воды следует провести обезжелезивание путём упрощённой аэрации, так как после электромагнитного воздействия на воду повышается содержание железа. Селективность установки обезжелезивания составляет 96,6 % [10]. Преимуществами установки электромагнитного воздействия на воду являются простота монтажа и эксплуатации, небольшой расход электроэнергии, минимальное количество осаждаемых солей магния и кальция на поверхностях нагрева.

Основными показателями качества питьевой воды являются площадь фильтрования, скорость фильтрации, жёсткость и содержание катионов щелочных, щелочно-земельных металлов и нефтепродуктов. Жёсткость исходной воды составляет 6,85 мг-экв/л, содержание ионов натрия – 45,58 мг-экв/л, содержание нефтепродуктов – 0,7 мг-экв/л, содержание ионов железа – 0,362 мг-экв/л [11].

Требуемые показатели качества воды после системы ХВО: жёсткость 12–15 мкг-экв/л, содержание ионов натрия 5 мкг-экв/л, содержание нефтепродуктов 0,1 мг-экв/л, содержание ионов железа 10 мкг-экв/л [1, 12].

Содержание нефтепродуктов и катионов железа после проведения электромагнитного воздействия и упрощённой аэрации вычисляется по формуле

$$C_{\text{Fe(о)}} = C_{\text{Fe(и)}} \cdot (1 - 0,966), \quad (1)$$

где $C_{\text{Fe(о)}}$ – содержание нефтепродуктов и катионов железа в воде после проведения электромагнитного воздействия и упрощённой аэрации, мг/л;

$C_{\text{Fe(и)}}$ – содержание нефтепродуктов и катионов железа в исходной воде из скважины, мг/л.

Одной из основных характеристик любого фильтра является площадь фильтрования. Площадь фильтрования любой очистной установки определяется по формуле

$$F = \frac{Q \cdot \alpha}{w_n}, \quad (2)$$

где Q – производительность фильтра по осветлённой воде, м³/ч;

α – коэффициент, учитывающий расход воды на собственные нужды фильтров;

w_n – скорость фильтрования при нормальном режиме работы фильтра.

Практическая часть

При расчёте и подборе системы ХВО необходимо учитывать характер движения воды и пара, который сказывается на местах отложений загрязнений внутри коаксиальных труб [4].

Результаты проведённых расчётов установок Na-катионирования, обратного осмоса и электромагнитного воздействия представлены в таблице, а также приведено сравнение характеристик показателей качества воды после проведения выше изложенных методов.

На рис. 2а показано движение воды в змеевике при отсутствии системы ХВО. В данном случае происходит значительное загрязнение змеевика из-за соблюдения нормативных показателей качества воды. При образовании отложений шероховатость змеевиковых труб увеличивается, следовательно, скорость движения воды внутри трубы уменьшается и стремится к нулю. В определённый момент течение теплоносителя и парообразование прекращаются.

На рис. 2б представлено движение воды в змеевиковых трубах при применении системы

Сравнение характеристик установок Na-катионирования, обратного осмоса и электромагнитного воздействия
The characteristics of Na-cation, reverse osmosis, and electromagnetic exposure filters

| Показатель | Установка Na-катионирования | Установка обратного осмоса | Установка электромагнитного воздействия |
|---|-----------------------------|----------------------------|---|
| Общая площадь фильтрования, м ² | 1,72 | 0,873 | 0,381 |
| Скорость фильтрации, м/ч | 5 | 8 | 5,72 |
| Жёсткость после очистки, мкг-экв/л | 100 | 1,3 | 100 |
| Содержание нефтепродуктов после очистки, мг-экв/л | 0,1 | 0,04 | 0,05 |
| Содержание натрия после очистки, мкг-экв/л | 100 | 45,58 | 227,9 |
| Содержание железа после очистки, мкг-экв/л | 0,9 | 0,9 | 12 |

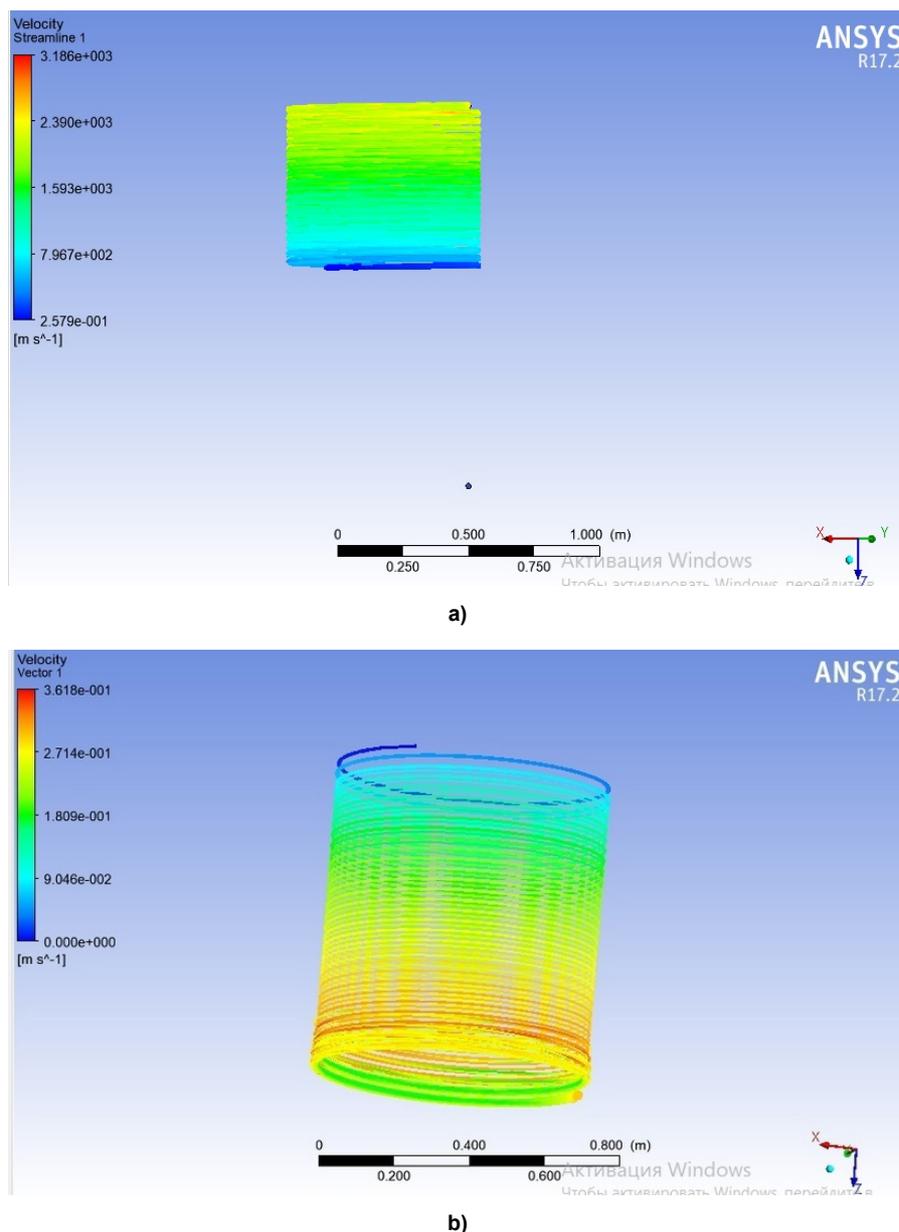


Рис. 2. Результаты моделирования течения теплоносителя в змеевике:
а – без применения системы ХВО; б – при применении системы ХВО
Fig. 2. Results of modeling the coolant flow in the coil:
a – without CWTS; b – with CWTS

ХВО, а именно установки обратного осмоса. Если перед подачей теплоносителя в котёл использовать систему химической подготовки воды, то количество отложений на поверхностях змеевика будет значительно меньше, и установка будет работать продолжительное время без перебоев.

Для того чтобы показать влияние загрязнённости змеевика на скорость течения жидкости, в нем была спроектирована гидравлическая модель движения жидкости с использованием операционной среды ANSYS.

Изначально была спроектирована геометрическая модель змеевика высотой 563 мм и общим диаметром 302 мм из труб диаметром $D/d = 14/12$ мм.

После построения геометрической модели змеевика была создана его конечно-элементная (дискретная) модель.

Следующим этапом оказалось задание условий течения жидкости, а также всех граничащих условий. Были заданы скорости жидкости на входе и выходе из змеевика, механические параметры змеевика, а также химический состав воды [13]. При расчётах была использована k - ϵ модель турбулентности. Для описания турбулентных величин в ней используется система двух нелинейных диффузионных уравнений: для массовой плотности турбулентной энергии k и скорости диссипации турбулентной энергии ϵ .

После введения всех требуемых для решения параметров был произведен запуск расчёта модели, результаты которого были записаны в базу данных. Результат был представлен в виде гидравлической модели движения жидкости в змеевиках. Для наглядности была представлена гидравлическая модель движения жидкости в чистом змеевике (рис. 2b), а также загрязненном (рис. 2a).

Моделирование переноса и осаждения примесей в змеевике позволило выявить влияние загрязненности змеевика на скорость жидкости внутри змеевика, а также установить при какой степени загрязненности движение внутри змеевика становится невозможным [14].

Исходя из результатов расчётов систем ХВО и моделирования течения жидкости внутри змеевиковых труб, можно сказать, что для бесперебойной работы прямоточного парового котла змеевикового типа и подачи качественного пара необходима компактная установка системы ХВО, чтобы обеспечить нормативные химические показатели питательной воды, а также для удовлетворения потребностей нефтедобывающей, автотранспортной, железнодорожной промышленности, а также строительства и медицины. Наиболее подходящим вариантом из рассмотренных является установка обратного осмоса, так как химические показатели после очистки воды в этой установке практически полностью соответствуют нормативным значениям [1, 12], а установки На-катионирования и электромагнитного воздействия не могут обеспечить надлежащее качество воды для рассматриваемого котельного агрегата [15–17]. Установка обратного осмоса может быть использована в реальных условиях при работающей передвижной котельной установке. При подготовке воды в выбранной системе ХВО топливо расходуется в рациональном количестве, потери с уходящими газами стремятся к нулю, КПД прямоточного парового котла змеевикового типа соответствует номинальному и, тем самым, ППУ работает энергоэффективно.

Прямоточный паровой котёл змеевикового типа входит в состав передвижной парогенераторной установки (далее – ППУ). Данная установка применяется в основном в нефтедобывающей промышленности. Пар применяется для очистки нефтедобывающего оборудования, трубопроводов, цистерн, трубозапорной арматуры и для деаэрации ископаемого сырья [5]. В медицине пар, вырабатываемый в ППУ, требуется для осуществления термических процедур, такие как ингаляционная терапия, парафинотерапия, глинолечение и т. п. [11]. Также ППУ нашла своё применение в сельском хозяйстве для припарки кормов, таких как фасоль, люпин, масличные, также для очистки и уборки помещений. В железнодорожной и автотранспортной промышленности мобильная парогенераторная установка применяется для разогрева цистерн. В строительстве ППУ нашла применение в разогреве бетона, кладочных смесей и асфальта для более быстрого процесса постройки [8].

Заключение

В ходе решения поставленных задач было выполнено следующее.

1. Произведены расчёты установок На-катионирования, обратного осмоса и электромагнитного воздействия и представлены их результаты.

2. Представлена геометрическая модель змеевика парового прямоточного котла, с помощью которого можно следить за скоростью воды в коаксиальных трубах при наличии системы ХВО и при её отсутствии.

3. Сделан выбор в пользу установки обратного осмоса как наиболее приемлемого для парового прямоточного котла змеевикового типа как с точки зрения качества питательной воды, так и с точки зрения практического применения вместе с передвижной парогенераторной установкой в реальных условиях.

Список литературы

1. Приложение № 3 к Федеральным нормам и правилам в области промышленной безопасности «Правила промышленной безопасности опасных производственных объектов, на которых используется оборудование, работающее под избыточным давлением», утвержденным приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору № 116. М.: Изд-во стандартов, 2014. 254 с.
2. Typical scenarios of possible accidents in the stockroom of chemical water treatment of thermal power stations / T.G. Korotkova, S.A. Bushumov, S.Y. Ksandopulo, N.V. Solonnikova // Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University. 2017. DOI: 10.21515/1990-4665-131-131
3. Полозов М.Б. Учебно-методическое пособие «Экология нефтегазодобывающего комплекса». Ижевск: Изд-во «Удмуртский университет», 2012. 174 с.
4. Дудкин М.М., Осинцев К.В., Кускарбекова С.И. Опытное исследование работы парового котла змеевикового типа при эксплуатации на северном нефтяном месторождении // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2019. Т. 19, № 4. С. 14–25. DOI: 10.14529/power190402
5. Опытное исследование аэро- и гидравлической систем прямоточного котла на лабораторном стенде путем внедрения автоматического управления устройствами и сбора данных / К.В. Осинцев, С.И. Кускарбекова, Н.В. Савостеенко, Н.М. Максимов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2022. Т. 22, № 2. С. 92–103. DOI: 10.14529/power220209

6. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Энергия, 1976. 288 с.
7. Черкасов, С.В. Обратный осмос. Теория и практика применения. Очистка воды // Мировые водные технологии. 2009. Р. 1–38.
8. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей / Е.В. Веприкова, Е.А. Терещенко, Н.В. Чесноков и др. // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. 2010. Vol. 3 (3). С. 285–304.
9. Беликов, С.Е. Водоподготовка: Справочник / под ред. д.т.н., действительного члена Академии промышленной экологии С.Е. Беликова. М.: Аква-Терм, 2007. 240 с.
10. Физико-химические основы процессов очистки воды: учеб. пособие / А.Ф. Никифоров, А.С. Кутергин, И.Н. Липунов и др. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. 164 с.
11. Научный медицинский вестник Югры / под редакцией д.м.н. Ф.И. Петровского. Ханты-Мансийск: Информационно-издательский центр БУ «Ханты-Мансийская государственная медицинская академия», 2018. 86 с.
12. Передвижная парогенераторная установка серии Unisteam-M, Unisteam-ME на шасси грузового автомобиля: руководство по эксплуатации ПУ1-1600.100 РЭ. Миасс: ООО «Завод паровых установок Юнистим», 2018. 53 с.
13. Wesley E.W., Boero V.J., Houston F. Biological treatment of High TDS wastewater // Proceedings of the Water Environment Federation. 2001. Vol. 3. P. 66–73. DOI: 10.2175/193864701785019353
14. Долина Л.Ф. Новые методы и оборудование для обеззараживания сточных вод и природных вод. Днепропетровск: Континент, 2003. 218 с. ISBN 996-7086-29-2.
15. Flippin H., Cuomo L., Petersen L. Radically Increasing Treatment Facility Capacity of Low-Rate Anaerobic Treatment System with Minimal Investment // Proceedings of the Water Environment Federation. 2013. Vol. 10. P. 5216–5222. DOI: 10.2175/193864713813692496
16. Flippin H., Boero V.J., Rhoades R. Enhanced activated sludge treatment of high strength bio-inhibitory industrial wastewater // Proceedings of the Water Environment Federation. 2004. Vol. 6. P. 598–607. DOI: 10.2175/193864704784106138
17. Automation and control of water treatment plant for defluoridation] / S. Dubey, M. Agarwal, A. Gupta et al. // International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration. 2016. Vol. 4 (26). P. 6–11. DOI: 10.19101/IJATEE.2017.426002

References

1. Prilozhenie № 3 k Federal'nym normam i pravilam v oblasti promyshlennoy bezopasnosti "Pravila promyshlennoy bezopasnosti opasnykh proizvodstvennykh ob"ektov, na kotorykh ispol'zuetsya oborudovanie, rabotayushchee pod izbytochnym davleniem", utverzhdenym prikazom Federal'noy sluzhby po ekologicheskomu, tekhnologicheskomu i atomnomu nadzoru № 116 [Appendix No. 3 to the Federal Norms and Rules in the field of industrial Safety "Rules of industrial safety of hazardous production facilities where equipment operating under excessive pressure is used", approved by Order of the Federal Service for Environmental, Technological and Nuclear Supervision No. 116]. Moscow: Izdatel'stvo standartov; 2014. 254 p. (In Russ.)
2. Korotkova T.G., Bushumov S.A., Ksandopulo S.Y., Solomnikova N.V. Typical scenarios of possible accidents in the stockroom of chemical water treatment of thermal power stations. *Polythematic Online Scientific Journal of Kuban State Agrarian University*. 2017. DOI: 10.21515/1990-4665-131-131
3. Polozov M.B. *Uchebno-metodicheskoe posobie "Ekologiya neftegazodoby-vayushchego kompleksa"* [Ecology of the oil and gas production complex]. Izhevsk: Udmurt State University Publ.; 2012. 174 p. (In Russ.)
4. 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 Russ.) DOI: 10.14529/power190402
5. Osintsev K.V., Kuskarbekova S.I., Savosteenko N.V., Maksimov N.M. Experimental study of aeroand 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 Russ.) DOI: 10.14529/power220209
6. Lifshits O.V. *Spravochnik po vodopodgotovke kotel'nyh ustanovok* [Handbook on water treatment of boiler units]. Moscow: Energiya Publ.; 1976. 288 p. (In Russ.)
7. Cherkasov S.V. [Reverse osmosis. Theory and practice of application. Water purification]. In: *World water technologies*. 2009. P. 1–38. (In Russ.)
8. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V., Shchipko M.L., Kuznetsov B N. Features of water purification from petroleum products using petroleum sorbents, filter materials, and activated carbons. *Journal of Siberian federal university. Chemistry*. 2010;3(3):285–304. (In Russ.)

9. Belikov S.E. *Vodopodgotovka: Spravochnik* [Water treatment. Handbook]. Moscow: Aqua-Term Publ.; 2007. 240 p. (In Russ.)
10. Nikiforov A.F., Kutergin A.S., Lyapunov I.N., Pervova I.G. *Fiziko-khimicheskie osnovy protsessov oshistki vody: ucheb. posobie* [Physico-chemical fundamentals of water purification processes: textbook]. Ekaterinburg: Ural Federal University Publ.; 2016. 164 p. (In Russ.)
11. *Scientific Medical Bulletin of Ugra*. Khanty-Mansiysk: State Medical Academy Publ. 2018. 86 p. (In Russ.)
12. *Peredvizhnaya parogeneratorsnaya ustanovka serii Unisteam-M, Unisteam-ME na shassi gruzovogo avtomobilya: rukovodstvo po ekspluatatsii PU1-1600.100 RE* [Mobile steam generator unit of the Unisteam-M, Unisteam-ME series on a truck chassis: operation manual PU1-1600.100 RE]. Miass: UNISTEAM. 2018. 53 p. (In Russ.)
13. Wesley E.W., Boero V.J., Houston F. Biological treatment of High TDS wastewater. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2001;3:66–73. DOI: 10.2175/193864701785019353
14. Dolina L.F. *Novye metody i oborudovanie dlya obezrazhivaniya stochnykh vod i prirodnnykh vod* [New methods and equipment for disinfection of wastewater and natural waters]. Dnepropetrovsk: Kontinent Publ. 2003. 218 p. (In Russ.)
15. Flippin H., Cuomo L., Petersen L. Radically Increasing Treatment Facility Capacity of Low-Rate Anaerobic Treatment System with Minimal Investment. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2013(10):5216–5222. DOI: 10.2175/193864713813692496
16. Flippin H., Boero V.J., Rhoades R. Enhanced activated sludge treatment of high strength bio-inhibitory industrial wastewater. *Proceedings of the Water Environment Federation*. 2004(6):598–607. DOI: 10.2175/193864704784106138
17. Dubey S., Agarwal M., Gupta A., Dohare R., Upadhyaya S. Automation and control of water treatment plant for defluoridation. *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*. 2016;4(26):6–11 DOI: 10.19101/IJATEE.2017.426002

Информация об авторах

Соломин Евгений Викторович, д-р техн. наук, проф. кафедры электрических станций, сетей и систем электроснабжения», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия, solominev@susu.ru.

Кускарбекова Сулпан Ириковна, старший преподаватель кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; kuskarbekovasi@susu.ru.

Бехтерев Дмитрий Владимирович, магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; dmitriy.bekhterev@mail.ru.

Ершов Александр Александрович, магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; sanyayershov2000@yandex.ru.

Зулкарнаев Данил Уралович, магистрант кафедры промышленной теплоэнергетики, Южно-Уральский государственный университет, Челябинск, Россия; slendan@mail.ru

Information about the authors

Evgeniy V. Solomin, Dr. Sci. (Eng.), Prof. of the Department of Electric Power Generation Stations, Networks and Supply Systems, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; solominev@susu.ru.

Sulpan I. Kuskarbekova, Senior Lecturer of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; kuskarbekovasi@susu.ru.

Dmitriy V. Bekhterev, Master's Student of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; dmitriy.bekhterev@mail.ru.

Aleksandr A. Ershov, Master's Student of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; sanyayershov2000@yandex.ru.

Danil U. Zulkarnaev, Master's Student of the Department of Industrial Heat Power Engineering, South Ural State University, Chelyabinsk, Russia; slendan@mail.ru.

Статья поступила в редакцию 12.10.2022; одобрена после рецензирования 19.12.2022; принята к публикации 19.12.2022.

The article was submitted 12.10.2022; approved after review 19.12.2022; accepted for publication 19.12.2022.