УДК 620.9 DOI: 10.34031/ES.2022.2.003

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ И РЕСУРСНЫЕ ЗАТРАТЫ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ФИЛЬТРОВ УМЯГЧЕНИЯ НА УРАЛЬСКОЙ ВОДЕ

Бушуев А.Н.

НФ НИТУ «МИСиС», г. Новотроицк

Аннотация

Рассмотрены основные моменты проведения регенерации Na-катионитовых фильтров первой ступени с предвключенными «голодными» Н-катионитовыми фильтрами в условиях работы на уральской воде при заборе в районе города Орск Оренбургской области. Произведена оценка энергетических и ресурсных расходов на фильтроцикл и регенерацию Na-катионитового фильтра в условиях работы на уральской воде. Произведена оценка расхода энергоресурсов на регенерацию «голодных» Н-катионитовых фильтров, работающих в качестве первой ступени в цепочке химической очистки уральской воды на предприятии. Функционально показана зависимость удельного расхода соли, как материального ресурса, на регенерацию Na-катионитового фильтра по отношению к величине фильтроцикла. Также проанализирован удельный расход серной кислоты, используемой на «голодную» регенерацию Н-катионитовых фильтров, установленных в начале цепочки водоочистки. Усреднение всех показателей работы Н-катионитовых и Na-катионитовых фильтров производилось выборочно по 12 месяцам за последние 3 года эксплуатации фильтров. Анализ особенностей работы данных фильтров на уральской воде производился под условия использования сульфоугля в «голодных» Н-катионитовых фильтрах и катионита КУ-2-8 в Na-катионитовых фильтрах.

Ключевые слова: *водоподготовка, водород-катионитовый фильтр, ионообменная очистка, натрий-катионитовый фильтр, регенерация, фильтроцикл, энергопотребление.*

ENERGY AND RESOURCE COSTS DURING THE OPERATION OF SOFTENING FILTERS ON URAL WATER

Anton Bushuev

The Branch of National Research and Technology University “MISA”

Abstract

The main points of the regeneration of Na-cationite filters of the first stage with pre-connected "hungry" H-cationite filters in the conditions of operation on the Ural water at the intake near the city of Orsk, Orenburg region, are considered. The energy and resource costs of the filter cycle and the regeneration of the Na-cationite filter in the conditions of operation on the Ural water are estimated. The estimation of energy consumption for the regeneration of "hungry" H-cationite filters operating as the first stage in the chain of chemical purification of Ural water at the enterprise was made. The dependence of the specific consumption of salt, as a material resource, on the regeneration of the Na-cationite filter in relation to the size of the filter cycle is functionally shown. The specific consumption of sulfuric acid used for the "hungry" regeneration of H-cationite filters installed at the beginning of the water treatment chain is also analyzed. Averaging of all performance indicators of H-cationite and Na-cationite filters was carried out selectively for 12 months over the last 3 years of filter operation. The analysis of the features of the operation of these filters on Ural water was carried out under the conditions of using sulfocarbon in "hungry" H-cationite filters and KU-2-8 kathionite in Na-cationite filters.

Keywords: *water treatment, hydrogen-cationite filter, ion exchange purification, sodium-cationite filter, regeneration, filter cycle, energy consumption.*

Введение

Абсолютно на всех производственных установках химической очистки воды присутствует узел умягчения воды, снижающий жесткость исходной воды до требуемых значений, определяемых непосредственно потребителем очищенной воды [1]. Умягчение может осуществляться либо использованием мембранных технологий, либо ионообменных [1,2]. В большинстве случаев в наиболее простых схемах водоочистки в качестве узла умягчения используются Na-катионитовые фильтры, соединенные в схеме в одну или две ступени. В отдельных случаях, в зависимости от исходных параметров умягчаемой воды, в узел умягчения также могут входить Н-катионитовые фильтры с «голодной» регенерацией, подключенные в цепочку перед Na-катионитовыми фильтрами с регенерацией раствором соли NaCl [1, 3]. Подобная схема, также называемая схемой с «голодной» регенерацией, применена на участке химводоочистки нефтеперерабатывающего завода ПАО «Орскнефтеоргсинтез». Схема характеризуется расходом кислоты на регенерацию фильтра, близким к теоретически требуемому. Принципиальная схема цепочки водоочистки представлена на рис. 1.

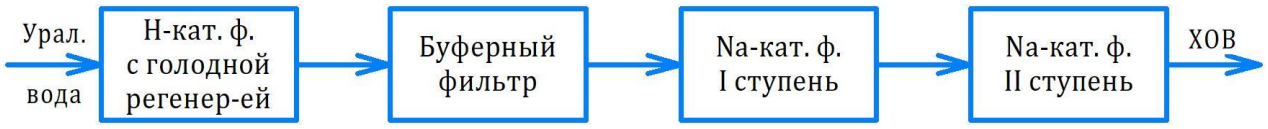

Рис. 1. Принципиальная схема водоочистки ПАО «Орскнефтеоргсинтез»

Водоснабжение предприятия ведется водой из реки Урал, являющейся одним из основных источников сырой воды в Оренбургской области. Большинство показателей уральской воды практически стабильно на протяжении года, значительные колебания наблюдаются весной в паводок. Прежде всего, стоит отметить, что особенности процесса Н-катионирования с «голодной» регенерацией зависят в большей степени от химического состава исходной воды, который и определяет оптимальные условия проведения процесса. С целью уменьшения колебания щелочности воды после водород-катионитовых фильтров на предприятии установлены саморегенерируемые буферные фильтры, также загруженные сульфоуглем. Высвобождаемая в процессе водород-катионирования углекислота удаляется в декарбонизаторе. Для более глубокого умягчения на третьей и четвертой ступенях обработки используется умягчение на сильнокислотном катионите в Na-форме.

Материалы и методы

Усредненные значения основных показателей уральской воды на вводе в систему:
– общая жесткость – 4,5 мг-экв/кг;
– общая щелочность – 3,1 мг-экв/кг;
– кальций Ca^{2+} - 59,8 мг/кг;
– магний Mg^{2+} - 6,3 мг/кг;
- величина pH=8,0.

Катионный состав уральской воды может быть выражен следующим образом [4]: 1≤А≤10 и 0≤К≤1, где показатель катионного К состава воды выражаются, в свою очередь[1, 4]:

$$K=Na^{+}/(Ca^{2+}+Mg^{2+}) \quad (1)$$

Согласно данным за последние 10 лет на протяжении круглого года для уральской воды в данном регионе всегда справедливо соотношение Ж/Щ>1,0. При таком со-

отношении предвключенные фильтры с «голодной» регенерацией снижают только карбонатную жесткость, определяемую бикарбонат-ионами HCO_3^- [5, 6]. «Голодная» регенерация Н-катионитовых фильтров, работающих в паре с Na-катионитовыми, на предприятии ведется 1,5 %-м раствором серной кислоты.

Na-катионитовые фильтры I-й ступени в рассматриваемой схеме базированы на фильтрах типа ФиПа-1-3,0-0,6, загруженных высокоосновным катионитом марки КУ-2-8 в объеме 13,5 м3.

В общем случае режим работы Na-катионитового фильтра может быть охарактеризован показателем снижения жесткости ΔЖ [6]:

$$\Delta Ж = Ж_o^{вх} - Ж_o^{вых}, \quad (2)$$

Эффективность работы Na-катионитового фильтра также может быть определена вторым показателем S, отображающим удельный расход соли (г/м^3) в регенерационном растворе на единицу фильтроцикла, т.е. на 1 м^3. Показатель для рассматриваемых Na-катионитовых фильтров лежит в достаточно широком числовом диапазоне - от 190 до 220 г/м^3, в отдельных случаях доходя до более высоких и низких значений, и его зависимость от ΔЖ приблизительно может быть выражена линейной функцией:

$$\Delta S(\Delta Ж)=82{,}3\cdot\Delta Ж+50{,}1. \quad (3)$$

Фильтроцикл Na-катионитового фильтра с предустановленным Н-катионитовым фильтром с «голодной» регенерацией при работе на уральской воде лежит в пределах от 5500 до 7000 м^3. Данный интервал в последние 5 лет практически постоянен.

Зависимость удельной доли соли S и коэффициента избытка соли k от количества поглощенных ионов жесткости g (г-экв) за месяц с удовлетворительной точностью аппроксимируются функциями:

$$k(g)=6{,}872\cdot g^{-0{,}13}, \quad (4)$$

$$S(g)=2{,}97\cdot10^{-8}\cdot g^2-2{,}58\cdot10^{-3}\cdot g+265{,}16. \quad (5)$$

Анализируя данные за 3 года можно проследить некоторую линейную зависимость возрастания фильтроцикла от расхода воды на отмывку. Однако данный показатель начинает снижаться в среднем после 74 м^3. Каждые 5 лет производится корректировка оптимального расхода воды на отмывку Na-катионитовых фильтров 1-й ступени. В последние годы эксплуатации расход 8-ми % раствора составляет 72 м^3 при часовом расходе 60 м^3/ч.

Энергетические затраты при эксплуатации данных фильтров включают в себя затрату электроэнергии на привод подающих насосов, насосов обратной промывки, насосов регенерации и насосов отмывки. В рассматриваемой схеме обратная промывка и отмывка осуществляется одним насосом. При анализировании энергетических затрат рост перепада давления на фильтре в силу его незначительности не учитывается. Усредненные расходы энергоносителей на процесс регенерации фильтра приведены в табл. 1.

Продолжительная эксплуатация «голодных» фильтров на уральской воде, загруженных сульфоуглем, дает следующие регенерационные показатели:

- фильтроцикл составляет от 100 до 130 м^3 на 1 м^3 катионита, при этом обменная емкость Е катионита лежит, примерно, в пределах от 240 до 320 г-экв/м^3.

- в период паводка понижение жесткости уральской воды ведет к увеличению фильтроцикла до 150-180 м^3 на 1 м^3 катионита. При этом обменная емкость Е остается в прежних числовых пределах.

Таблица 1

Расходы энергоносителей на регенерацию Na-катионитовых фильтров

Технический процесс	Продолжительность, мин	Расход воды, м³/ч	Мощность привода, кВт	Затраченная энергия, кВт·ч	Затраченный объем воды, м³
Обратная промывка (взрыхление)	5	100	75	6,3	8,3
Регенерация	35	30	30	17,5	17,5
Отмывка	72	60	60	72	72,0
Приготовление раствора	45	30	30	22,5	-
Итого	160	-	-	118,3	97,8

Удельный расход серной кислоты (в пересчет на 100 % концентрацию) на 1 м³ воды по экспериментальным результатам для Н-катионитовых «голодных» фильтров описывается уравнением:

$$q(v)=0{,}1353\cdot v^3-3{,}7868\cdot v^2+35{,}155\cdot v-98{,}264, \quad (6)$$

где v – количество серной кислоты на 1 м³ катионита.

Составляющие энергетических затрат на эксплуатацию Н-катионитовых фильтров с «голодной» регенерацией серной кислотой аналогично включают затраты электроэнергии на взрыхление, регенерацию и отмывку (табл.2).

Таблица 2

Расходы энергоносителей на «голодную» регенерацию Н-катионитовых фильтров

Технический процесс	Продолжительность, мин	Расход воды, м³/ч	Мощность привода, кВт	Затраченная энергия, кВт·ч	Затраченный объем воды, м³
Обратная промывка (взрыхление)	7	80	60	7,0	9,3
Регенерация	22	40	30	11,0	14,7
Отмывка	25	40	60	25,0	16,7
Перекачивание серной кислоты	1	-	20	0,3	-
Итого	55	-	-	43,3	40,7

Энергетические затраты на приготовление регенерационного раствора отсутствуют, поскольку смешение серной концентрированной кислоты с водой осуществляется эжекционным способом непосредственно в трубопроводе за регенерационным насосом.

Результаты

Суммарная продолжительность регенерационного процесса Н-катионитового фильтра с «голодной» регенерацией составляет 55 минут (без учета времени на переключения и запуск насосов) против 160 минут у Na-катионитовых. Суммарное потребление электроэнергии на регенерацию одного фильтра составляет порядка 40…45 кВт·ч. Доля, приходящаяся непосредственно на саму регенерацию – около 25 %. При учете потерь давления в трубной обвязке фильтра полный расход электроэнергии повышается на 5 %.

Изменением расходов электроэнергии и воды на регенерацию Na-катионитовых фильтров в зависимости от фильтроцикла можно пренебречь. Средняя потребляемая мощность подающим насосом при его недозагрузке за вычетом электрических затрат на преодоление потерь в трубной обвязке фильтра составляет порядка 30…35 кВт при усредненном расходе через фильтр 50 м^3/ч. Таким образом, полный расход электроэнергии на 1 фильтроцикл лежит в пределах 4000…4800 кВт·ч, удельный показатель составляет 0,72…0,75 кВт·ч/м^3. Доля, приходящаяся на регенерацию – 2,4…2,5 %. При учете потерь давления в трубной обвязке фильтра полный расход электроэнергии повышается на 8,5 %.

Была организована краткосрочная корректировка режима регенерации с повышением концентрации соли в регенерационном растворе до 10,5 % и сокращением расхода регенерационного раствора до 16 м^3 и времени процесса регенерации до 30 мин. Согласно проведенным замерам мощности электропривода насоса в данном режиме суммарный расход электроэнергии на регенерацию снизился до 114 кВт·ч, так как корректировки в другие стадии регенерации не вводились.

По результатам десяти регенераций данная корректировка привела к незначительным увеличениям фильтроцикла на 3,5 % и увеличению на 10,5 % показателя избытка соли.

Для устранения отрицательных результатов, обусловленных ростом избытка соли, необходимо увеличение длительности самого процесса регенерации с возможным замачиванием на короткий период до 5 минут и последующим увеличением длительности отмывки на 10 %. Однако данные мероприятия приведут к увеличению доли энергетических затрат на регенерацию до 3 %.

Если оценивать узел умягчения в целом, как цепочка из «голодных» Н-катионитовых фильтров и двух ступеней Na-катионитовых, то он, может быть, в будущем заменен мембранными установками, позволяющими значительно сократить занимаемую площадь и позволяющие автоматизировать процесс фильтрации и промывки. На том же предприятии ПАО «Орскнефтеоргсинтез» есть опыт эксплуатации такой системы водоочистки, работающей также на уральской воде. Однако, данные технологии по-прежнему сталкиваются с проблемой дороговизны их обслуживания [2, 7], что замедляет процесс их внедрения в технологии при уже имеющемся ионообменном оборудовании.

Выводы (Conclusion)

На основе проведенных экспериментов и приведенных данных по энергетическим и ресурсным затратам можно сделать вывод, что при использовании сульфоугля в Н-катионитовых фильтрах с «голодной» регенерацией, работающих на уральской воде, наиболее оптимальным по концентрации является регенерационный раствор 1,5 % при расходе серной кислоты 93 % на одну «голодную» регенерацию в 190…195 л.

Также, можно сделать вывод, что в рассматриваемых условиях работы фильтров умягчения на уральской воде принятая концентрация соли 7,8…8,0 % в регенерационном растворе является наиболее оптимальной при значительной наработке катионита КУ-2-8, обусловленной тем, что ежегодная досыпка нового катионита составляет не более 10 %, а полная замена катионита не осуществлялась за последние 10 лет эксплуатации. Увеличение концентрации регенерационного раствора не снижает показатель удельного расхода электроэнергии, но увеличивает удельную долю соли (г/т), что отрицательно с экономической точки зрения.

Библиографический список

1. Громогласов А.А., Копылов А.С., Пильщиков А.П. Водоподготовка: процессы и аппараты. М.: Энергоатомиздат, 1990. 272 с.
2. Ларин Б.М., Юрчевский Е.Б. Проблемы реализации ионообменных и мембранных технологий обработки воды в энергетике // Теплоэнергетика. 2019. №10. С. 63-73. EDN: XQBXXY DOI: 10.1134/S0040363619100035
3. Лифшиц О.В. Справочник по водоподготовке котельных установок. М.: Энергия, 1976. 288 с.
4. Применение слабокислотных катионитов в технологии подготовки воды / Э.Г. Амосова, П.И. Долгополов, С.П. Журавлев, Д.Г. Малахов // Сантехника. 2003. № 6. С. 4-8.
5. Технико-экономическая оценка методов обработки и утилизации минерализованных сточных вод промышленных и отопительных котельных / Э.Г. Амосова, Р.И. Гутникова, О.Ю. Кузнецов и др. // Водоснабжение и санитарная техника. 1981. № 8. С. 3-5.
6. Кишневский В.А., Кишневский Е.В. Анализ изменения состава регенерационных растворов в процессе регенерации ионитов // Труды Одесского политехнического университета. 2007. №. 2 (28). С. 76-79. EDN: NUNHFL
7. Проблемы модернизации систем водоподготовки Российских ТЭЦ / Е.Н. Бушуев, А.Б. Ларин, Н.А. Еремина, А.Ю. Логинова // Энергосбережение и водоподготовка. 2021. №4. С. 4-9. EDN: FRHECC

References

1. Gromoglasov, A. A., Kopylov, A. S., & Pilshchikov, A. P. (1990). *Vodopodgotovka: protsessy i apparaty: uchebnoye posobiye dlya vuzov* [*Water treatment: processes and devices: textbookfor universities*]. Energoatomizdat. [In Russian]
2. Larin B.M., Yurchevsky E.B. (2019). Problemy realizatsii ionoobmennykh i membrannykh tekhnologiy obrabotki vody v energetike [Problems of Implementation of Ion-Exchange and Membrane Water Treatment Technologies in the Energy Industry]. *Thermal Engineering, 66(10)*, 744-749. https://doi.org/10.1134/S0040363619100035. [In Russian]
3. Lifshits, O. V. (1976). *Spravochnik po vodopodgotovke kotel'nykh ustanovok* [*Handbook on water treatment of boiler plants*]. Energia. [In Russian]
4. Amosova, E. G., Dolgopolov, P. I., Zhuravlev, S. P., & Malakhov, D. G. (2003). Primeneniye slabokislotnykh kationitov v tekhnologii podgotovki vody [The use of weak acid cationites in water treatment technology]. *Santekhnika, 6,* 4-8. [In Russian]
5. Amosova, E. G., Gutnikova, R. I., Kuznetsov, O. YU., Zabolotnaya, T. A., & Zhuravlev, P. I. (1981). Tekhniko-ekonomicheskaya otsenka metodov obrabotki i utilizatsii mineralizovannykh stochnykh vod promyshlennykh i otopitel'nykh kotel'nykh [Technical and economic assessment of methods of treatment and utilization of mineralized wastewater of industrial and heating boiler houses]. *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika, 8*, 3-5. [In Russian]
6. Kishnevsky, V. A., & Kishnevsky, E. V. (2007). Analiz izmeneniya sostava regeneratsionnykh rastvorov v protsesse regeneratsii ionitov [Analysis of changes in the composition of regeneration solutions in the process of ionite regeneration]. *Trudy Odesskogo politekhnicheskogo universiteta, 2 (28),* 76-79. [In Russian]
7. Bushuev, E. N., Larin, A. B., Eremina, N. A., & Loginova, A. Yu. (2021). Problemy modernizatsii sistem vodopodgotovki Rossiyskikh TETS [Problems of modernization of water treatment systems of Russian thermal power plants]. *Energosberezhenie i vodopodgotovka, 4,* 4-9. [In Russian]

Сведения об авторе

Бушуев Антон Николаевич, канд. техн. наук.
Новотроицкий филиал НИТУ «МИСиС». SPIN-код: 1455-8590.

Author about

Anton N. Bushuev, Candidate of Technical Sciences (PhD).
The branch of National Research Technological University "MISA"