

СТАТЬИ

УДК 544.72

СОРБЦИОННОЕ ИЗВЛЕЧЕНИЕ ИОНОВ ЦВЕТНЫХ МЕТАЛЛОВ ИЗ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСТВОРОВ КАТИОНИТОМ КУ-2-8 И ЕГО ЗАРУБЕЖНЫМИ АНАЛОГАМИ**Авфуква Л.С., Белова Т.П.***Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук, Петропавловск-Камчатский, e-mail: nigtc@nigtc.ru*

Данная статья посвящена анализу литературных данных по сорбционному извлечению ионов цветных металлов из многокомпонентных растворов универсальным сульфокатионитом КУ-2-8 (Россия) и его зарубежными аналогами. Ионный обмен широко применяется в технологии химического разделения, извлечения, удаления, концентрирования ионов цветных, благородных и редких металлов. Это связано с распространением методов, использующих различные ионообменные смолы, которые незаменимы во многих областях химической промышленности. В мире производится большое количество ионообменников, имеющих матрицу, представляющую собой сополимер стирола и дивинилбензола. В качестве функциональных групп в смоле присутствуют сульфогруппы $-SO_3H$. В Германии это Lewatit S-100 (Lewatit Monoplus S-100), в Англии – Purolite C-100, в США – Amberlite IR-120, Amberjet 1200, Dowex HCR-S/S, Dowex Marathon C. В статье представлена сравнительная характеристика сильноокислотных сульфокатионитов и показана сорбционная активность катионитов по отношению к ионам цветных металлов, содержащихся в многокомпонентных растворах. Показано, что сульфокатиониты широко применяются для извлечения цветных металлов из сточных вод металлургических предприятий различного происхождения: шахтных, рудничных, карьерных, подотвалных. Представлены данные по сорбционной переработке и концентрированию продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд и кислотного выщелачивания руд. В статье содержатся данные по сорбции ионов цветных металлов из сульфатных, хлоридных, аммиакатных и фосфатных растворов. Установлено, что катионит КУ-2-8 и его зарубежные аналоги могут быть широко использованы для извлечения и концентрирования ионов цветных металлов из растворов различного состава. К достоинствам можно отнести высокую скорость обмена, в связи с доступностью сульфогрупп, к недостаткам – низкую избирательность сорбции.

Ключевые слова: многокомпонентные растворы, обменная емкость, сорбция, сульфокатионит, цветные металлы**SORPTION OF NON-FERROUS METALS IONS RECOVERY FROM MULTICOMPONENT SOLUTIONS BY KU-2-8 CATION EXCHANGER AND ITS FOREIGN ANALOGUES****Avfukova L.S., Belova T.P.***Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Petropavlovsk-Kamchatsky, e-mail: nigtc@nigtc.ru*

This article dedicates of analysis of literature data for sorption recovery of non-ferrous ions from multicomponent solution by universal KU-2-8 sulfonic cation exchanger (Russia) and its foreign analogues. Ion exchange is widely used on technology chemical separation, recovery, removal, concentration of non-ferrous metals, precious and rare metals. This is due to proliferation of methods using various ion exchange resins, which are indispensable in many fields of chemical industry. A large amount of ion exchangers having of matrix that is a styrene copolymer and divinylbenzene produced in the world. The $-SO_3H$ sulphonic-acid group are present as functional groups in the resin. In Germany is это Lewatit S-100 (Lewatit Monoplus S-100), in England is Purolite C-100, in USA are Amberlite IR-120, Amberjet 1200, Dowex HCR-S/S and Dowex Marathon C. The article presents a comparative analysis of strongly acidic sulfonic cation exchangers and shows the sorption activity of cation exchangers with respect to non-ferrous metal ions contained in multicomponent solutions. It was shown that sulfonic cation exchangers are widely used for recovery of non-ferrous metals from waste water from metallurgical enterprises of various origins: shaft, ore, quarry, underspoil. The data on sorption processing and concentration of productive solutions of bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores and acid leaching of ores it was presents. The data on sorption of non-ferrous metals from sulfate, chloride, ammoniates and phosphate solutions contained in article. It was established that KU-2-8 cation exchanger and its foreign analogues can be widely used for recovery and concentration of non-ferrous metal ions from solutions of various compositions. The advantages include a high exchange rate, due to the availability of sulfo groups and the disadvantages of low sorption selectivity.

Keywords: multicomponent solutions, exchange capacity, sorption, sulfonic cation exchangers, non-ferrous metals

Цветные металлы играют исключительно важную роль в жизни современного человека. Спрос на цветные металлы имеет устойчивую тенденцию к возрастанию. Эти металлы широко используют в производстве сталей и сплавов. Никель применяют

при легировании сталей, для достижения улучшенных прочностных и жаропрочностных характеристик. Никель и кобальт являются важными стратегическими металлами. Медь нашла широкое применение в энергетической промышленности благо-

даря высоким показателям тепло- и электропроводности. Запасы никеля сосредоточены в основном в латеритных и сульфидных рудах. В сульфидных рудах наряду с никелем содержатся медь и кобальт. Россия занимает четвертое место в мире по запасам никеля. Переработка кобальт-медно-никелевых руд ведется пирометаллургическими и гидрометаллургическими методами. При этом важная роль отводится полноте извлечения металлов из рудного и техногенного сырья в готовые продукты и сохранению экологии в районах горно-перерабатывающих предприятий. В настоящий момент вопрос загрязнения биосферы в районах металлургических предприятий остается нерешенным. Современная металлургия стремится к превращению производства цветных металлов в безотходное или малоотходное.

Гидрометаллургические способы имеют существенное значение в совершенствовании методов производства цветных металлов на современном уровне развития технологии. Эффективность и область применения гидрометаллургических процессов постоянно возрастают. Это заметно по разработке и внедрению в последние годы новых сорбционных методов извлечения, удаления, концентрирования и разделения металлов и их соединений, процессов осаждения и выделения металлов из растворов. В результате процессов выщелачивания формируются растворы различного состава: продуктивные растворы, промывные растворы и сточные воды. Концентрация металлов в растворах колеблется в широких пределах [1–3].

Ионный обмен широко применяется в технологии химического разделения, извлечения, удаления, концентрирования ионов цветных металлов. Это связано с распространением методов, использующих различные ионообменные смолы, которые незаменимы во многих областях химической промышленности. Можно извлекать и обогащать тяжелые, благородные и редкие металлы [4; 5] из сложных технологических растворов с высоким выходом при использовании ионообменных сорбентов.

Для разделения, выделения и удаления цветных металлов из растворов различного состава перспективной представляется сорбция с использованием сильнокислотного сульфокатионита КУ-2-8 и его зарубежных аналогов. Однако процесс сорбции ионов цветных металлов катионитом КУ-2-8 из многокомпонентных растворов остается недостаточно изученным.

Целью настоящей работы является обобщение данных, опубликованных в отечественной и зарубежной литературе, по сорбции цветных металлов сульфокатионитом КУ-2-8 и его аналогами.

Сульфокатиониты производят во многих странах: Германии, Англии, США, Италии, Венгрии, Китае и др. В России производят катионит КУ-2-8. Сульфокатиониты разных производителей имеют практически одинаковую статическую обменную емкость (СОЕ), однако динамическая обменная емкость (ДОЕ) у отдельных их марок может различаться до 100 мг-экв/см³. В таблице представлена сравнительная характеристика сильнокислотного сульфокатионита КУ-2-8 и некоторых его зарубежных аналогов.

Большое количество публикаций посвящено очистке сточных и промывных вод предприятий, в которых цветные металлы присутствуют в концентрациях, многократно превышающих значения ПДК. Первостепенная роль здесь принадлежит сорбционным методам. Катионит КУ-2-8 используют в двух формах: в водородной (H⁺-форме) и натриевой (Na⁺-форме). Сорбцию проводят из сульфатных [8; 9], хлоридных [10], фосфатных [11], аммиачных [12] и других растворов. Описаны [13] процессы сорбции и десорбции ионов Cu²⁺, Zn²⁺ и Ni²⁺ на катионите КУ-2-8 в H⁺-форме из сульфатных модельных растворов, которые имитируют сточные и промывные воды металлообработывающих предприятий. Наибольшее значение общей обменной динамической емкости ионообменника было достигнуто при пропуске через сорбционную колонну модельных растворов концентрацией 0,02 н и составило в среднем 2140 мг-экв/дм³. Наиболее эффективной оказалась десорбция ионов тяжелых металлов 10%-ной серной кислотой. После проведения исследований была предложена технологическая схема очистки промывной воды от ионов тяжелых металлов, в том числе меди, цинка и никеля.

В работе [14] авторы изучали адсорбцию ионов тяжелых металлов (Cu²⁺, Cd²⁺, Pb²⁺) из водных растворов (исследуемые концентрации 0,1–1,0 М) при разных температурах (293–323 К) на сорбентах КБ-4, КУ-1, КУ-2-8, Amberlite, сульфоугле и целлюлозе. Авторы сделали вывод о достаточности высоких сорбционных достоинствах катионитов, благодаря найденным значениям сорбционной емкости по ионам Cu²⁺, Cd²⁺ и Pb²⁺.

Характеристика сильнокислотных сульфокатионитов [6, 7]

№	Название сорбента	Плотность, г/мл	Статическая обменная емкость, ммоль-экв/см ³ , не менее	Динамическая обменная емкость, ммоль-экв/м ³ , не менее	Максимальная рабочая температура (t _{max}), °С	Страна-производитель
1	Катионит КУ-2-8	0,75 – 0,90 (Na ⁺ и H ⁺ форма)	1,80 (H ⁺ форма) 1,90 (Na ⁺ форма)	526	130	Россия
2	Катионит Amberlite IR-120	0,78–0,86 (Na ⁺ форма) 0,80 (H ⁺ форма)	≥ 1,80 (H ⁺ форма) ≥ 2,00 (Na ⁺ форма)	420–480	135	США
3	Катионит Amberjet 1200	1,26 – 1,30 (Na ⁺ форма) 1,18 – 1,22 (H ⁺ форма)	≥ 2,00 (Na ⁺ форма)	470	135	США
4	Катионит Dowex HCR-S/S	1,30 (Na ⁺ форма)	1,90 (Na ⁺ форма)	–	120	США
5	Катионит Dowex Marathon C	1,28 (Na ⁺ форма) 1,20 (H ⁺ форма)	1,80 (H ⁺ форма) 2,0 (Na ⁺ форма)	450	120	США
6	Катионит Lewatit S-100 (Lewatit Monoplus S-100)	1,28 (Na ⁺ форма) 1,22 (H ⁺ форма)	1,80 (H ⁺ форма) 2,0 (Na ⁺ форма)	490	120	Германия
7	Катионит Purolite C-100	1,29 (Na ⁺ форма) 1,20 (H ⁺ форма)	2,0 (Na ⁺ форма)	410–430	120	Великобритания

Alyüz и Veli [15] исследовали кинетику и равновесие ионного обмена для удаления никеля и цинка из водного раствора с использованием смолы Dowex HCR S/S, являющейся сульфокатионитом. Было установлено, что удаление катионов Ni^{2+} и Zn^{2+} хорошо согласуется с кинетикой реакции второго порядка. Проведена сравнительная характеристика удаления меди из водных растворов сильными сульфокатионитными смолами Dowex HCR S/S и Dowex Marathon C. Были рассмотрены такие параметры, как время контакта катионит–раствор, масса катионита, концентрация меди в растворе, pH. Результаты показали, что изотермы в координатах уравнений Фрейндлиха и Ленгмюра являются линейными. Полученная из изотермы адсорбции Ленгмюра константа равновесия меди была рассчитана как 1,81 для Dowex HCR S/S и 4,71 для Dowex Marathon C. Были представлены коэффициенты разделения и коэффициенты распределения меди для Dowex HCR S/S и Dowex Marathon C.

Концентрирование ионов меди (II) из раствора сульфата меди (II), концентрацией меди в нем 25 мкмоль/дм³ проведено на колонке с катионитом КУ-2-8 в динамическом режиме [16]. В качестве регенерирующих растворов рассматривались 5%-ные растворы серной и соляной кислот. Авторы установили, что такой способ регенерации может быть перспективен для отделения меди, а не для получения более концентрированного раствора, чем исходный. Регенерация колонок происходит со 100%-ным выходом ионов меди (II).

Использование катионообменной смолы Amberlite IR-120, аналога КУ-2-8, для извлечения меди из сульфатного раствора, содержащего 0,3–0,7 мг/мл меди, показало практически полное 99,99% извлечение. Установлено, что механизм адсорбции меди следует изотерме Ленгмюра и соответствует кинетике второго порядка [17]. Адсорбционная способность катионообменной смолы Amberlite IR-120 по отношению к ионам Ni (II) из модельного раствора, содержащего 440 мг/л никеля, рассчитанная по модели Ленгмюра, составила 49,75 мг/г [18]. Необходимым условием явилось поддержание значений pH, при которых не происходит химического осаждения гидроксида никеля $Ni(OH)_2$. При этом подчеркивается, что сорбция ионов Ni (II) на смоле является сложной и включает более одного механизма. При выявлении сродства ионов металлов к H^+ -форме ионита Amberlite

IR-120 установлено, что ряд имеет вид: $Cu^{2+} > Zn^{2+} > Cd^{2+} > H^+$. Таким образом, Amberlite IR-120 имеет большой потенциал для удаления тяжелых металлов из промышленных сточных вод или шламов, содержащих тяжелые металлы.

Другим аналогом катионита КУ-2-8 является Purolite C-100. Было установлено [19] адсорбционное поведение его по отношению к Ce (IV), Fe (III) и Pb (II), содержащимся в загрязненных сточных водах. Авторами было подтверждено, что явления адсорбции зависят от плотности заряда и диаметра гидратированного иона. Согласно исследованиям равновесия, последовательность ионов металлов может быть представлена как: $Ce (IV) > Fe (III) > Pb (II)$.

Еще одним аналогом катионообменной смолы КУ-2-8 является сильнокислотная катионообменная смола Lewatit S-100 (Lewatit Monoplus S-100) производства Германии. Извлечение ионов Cs^+ и Co^{2+} из индивидуальных и смешанных водных хлоридных растворов в динамических условиях этой смолой представлено в работе [10]. Результаты показали, что цезий и кобальт могут быть эффективно удалены с помощью Lewatit S100 в диапазоне pH = 4–7. Показано, что большее сродство смолы проявляет к Cs^+ , чем Co^{2+} . Это может быть связано с меньшим радиусом гидратированных ионов Cs^+ , чем Co^{2+} . Лучшие результаты были получены при глубине слоя 3 см при скорости потока 3 мл/мин как для Cs^+ , так и для Co^{2+} .

В литературе имеются немногочисленные сведения по применению сульфокатионитов для сорбции цветных металлов из аммиакатных растворов. Например, изучена сорбция меди из нейтральных и щелочных аммиаксодержащих растворов и промывных вод композиционным сорбентом Dowex Maraton C–гидроксид железа [12]. Образование устойчивых комплексов меди с аммиаком позволяет проводить сорбцию при pH = 10,2. Динамическая обменная емкость композиционного сорбента в 2,5–3,0 раза превышает аналогичные значения для Dowex Maraton C в Na^+ -форме в контрольных опытах. Десорбцию меди с композиционного сорбента проводили 10%-ной серной кислотой. Полнота десорбции составила 96–98%. Полученные результаты могут быть использованы для разработки эффективных технологических схем сорбционной очистки от меди различных медьсодержащих сточных вод, pH которых находится в диапазоне 5,0–11,0.

Извлечение из промывных вод гальванических производств ионов цинка и кадмия представлено в работе [20]. Экспериментально установлено, что адсорбция ионов цинка и кадмия на сульфокатионите КУ-2-8 значительно выше, чем на карбоксильном катионите КБ-4. Емкость КУ-2-8 равна 4,5–5 мг-экв/г. Катионит КУ-2-8 имеет наиболее выгодное взаимное расположение и расстояние функциональных групп для замещения ионов Na^+ на ионы Cd^{2+} и Zn^{2+} . Еще одним плюсом является то, что сульфокислотные группы катионита диссоциируют в широком диапазоне pH раствора. На основании этого сделан вывод, что наиболее эффективным является универсальный сильнокислотный катионит КУ-2-8, динамическая ионообменная емкость которого значительно выше, чем карбоксильного катионита КБ-4 и амфотерного АНКБ-35.

Экспериментально подтверждено сорбционное извлечение никеля и кобальта из фосфатных растворов катионитом КУ-2-8 и их отделение от железа посредством селективного элюирования. Даже при достаточно высокой концентрации железа (III) в исходном растворе (22,9 г/л) оно плохо сорбируется. При степени сорбции никеля и кобальта 92–96%, сорбция железа (III) составляет 1–3%, в случае полной сорбции никеля и кобальта – 6% железа [11].

Удаление хрома (III) из растворов, имитирующих сточные воды кожевенного производства, с помощью сульфокатионита Amberjet 1200 в Na^+ -форме, имеющей дивинил-стирольную матрицу [21]. Средняя эффективность удаления ионов хрома (III) на лабораторных установках составляла 98,70% и 89,24%, средняя эффективность десорбции составляла 81,56% и 92,50%. Сульфокатионит Amberjet 1200 в Na^+ -форме, имеющей однородный размер частиц, позволяет удалять ионы хрома (III) из синтетических сточных вод кожевенного производства и проводить окислительную регенерацию перекисью водорода в щелочных средах.

В работе [8] авторами рассмотрена возможность применения сульфокатионита Amberjet 1200 в Na^+ -форме для удаления тяжелых металлов в реакторах периодического действия с псевдоожиженным слоем. Кинетика ионного обмена изучалась при различных исходных концентрациях металлов и скоростях подачи воздуха. Для приготовления модельных растворов использовали сульфат никеля (II) и нитрат свинца (II). В экспериментальных исследо-

ваниях было достигнуто 98% и 99% удаление ионов Ni^{2+} и Pb^{2+} .

Большую проблему представляют собой хвостохранилища горно-обогатительных комбинатов. В настоящее время первичное извлечение полезных компонентов из руд не является полным. Накопление отходов в хвостохранилищах возрастает с каждым годом, увеличивается объем стоков, содержащих большие концентрации цветных металлов. Остро стоит проблема повышения коэффициента извлечения и комплексности использования природных ресурсов.

Моделирование образования сточных вод хвостохранилищ, проведенное в перколяционном режиме [22], показало, что в раствор переходят такие металлы, как цинк, медь, кобальт и железо. Предложено извлекать ионы металлов сильнокислотным катионитом КУ-2-8 в Na^+ - и H^+ -формах. При pH исходного раствора выше 3,5 степень удерживания ионов металлов составляет 97–100%. Сорбцию металлов из стоков хвостохранилищ контролируют также в динамических условиях. По сравнению с исходной концентрацией наблюдается практически полное удерживание этих металлов. Динамическая обменная емкость для меди – 1,75, цинка – 22,1, железа – 1,6, кальция – 36,19, магния – 22,0, кобальта – 21 мг/г. Десорбцию металлов из смолы КУ-2-8 проводили с помощью разной концентрации H_2SO_4 , HCl и NaCl . Авторы на основании экспериментальных исследований пришли к выводу, что десорбция раствором NaCl имеет ряд преимуществ по сравнению с растворами H_2SO_4 и HCl кислот.

Для извлечения никеля из растворов сернокислотного выщелачивания шлама, образующегося на установках никелирования/хромирования методом сорбции на ионообменных смолах, изучали в работе [9]. Недостатком сернокислотного выщелачивания является отсутствие выраженной селективности извлечения никеля, хрома и железа. В качестве сорбентов для поглощения никеля при совместном его нахождении с хромом в растворе использовали КУ-2-8, Lewatit TP207, Purolite C104, Purolite S930. Статическая обменная емкость (г/г) КУ-2-8 по никелю составила – 0,044, по хрому – 0,027.

Представляет интерес процесс катионообменного выщелачивания катионитом КУ-2-8 в водородной форме [23], при котором кислота не вводится в систему, а генерируется в ходе ионного обмена, т. е. один и тот же реагент – катионит является

и поставщиком расходуемых ионов водорода, и сорбентом, накапливающим выщелачиваемые ионы. За три стадии прямого катионообменного выщелачивания катионитом КУ-2-8 извлекается 46% никеля, а в ходе кислотного растворения достигается 94%-ное выщелачивание никеля. Селективность никеля при катионообменном выщелачивании выше, чем при кислотном. Коэффициент разделения никеля и железа составляет – 270 при катионообменном выщелачивании. Это в 3 раза выше, чем при кислотном выщелачивании. Следовательно, это позволит снизить расход кислоты на первой ступени комбинированной переработки окисленных никелевых руд и получить более чистые продуктивные растворы.

Экспериментальные исследования по сорбционному концентрированию продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд проводятся в НИГТЦ ДВО РАН. Нами показано [1], что при сорбции в статических условиях с применением Na^+ -формы КУ-2-8 извлекается до 90% никеля за три цикла сорбции. За пять циклов сорбции из продуктивных растворов извлекается до 97,3% цветных металлов и железа натриевой формой ионообменной смолы КУ-2-8 и до 95,6% водородной формой [2].

Установлено [3], что суммарная сорбционная емкость катионита КУ-2-8 в натриевой форме в результате последовательной противоточной сорбции составляет – 6,56 мг-экв/г. Определено необходимое количество ступеней для практически полного извлечения никеля, меди и кобальта из растворов сложного состава. Экспериментальные данные по сорбции и десорбции цветных металлов и железа из продуктивных растворов БХВ кобальт-медно-никелевых руд в динамическом режиме с применением катионита КУ-2-8 показали, что применение динамического метода оправданно при содержании никеля менее 2,0 г/л [24]. Удаление железа из сорбционной колонны происходит под действием сульфата никеля, применяемого в качестве вытеснителя. Показано, что наиболее эффективной является десорбция никеля при чередовании статического и динамического режимов.

Заключение

Анализ литературных данных показывает, что в настоящее время проводится большое количество исследований по разработке технологических схем сорбционного извлечения цветных металлов из многоком-

понентных растворов. Однако из-за сложного состава многокомпонентных растворов вопрос сорбционной переработки остается недостаточно изученным.

Для извлечения цветных металлов из многокомпонентных растворов в различных диапазонах концентраций могут быть использованы сульфокатионит КУ-2-8 и его зарубежные аналоги. Преимуществом катионитов является возможность их использования в широком диапазоне $\text{pH} = 0-14$. Процесс регенерации прост и не требует дорогих реактивов. Способность использовать сорбент многократно обеспечивает его экономичность и перспективность.

К главным недостаткам следует отнести низкую селективность по отношению к цветным металлам при их совместном присутствии.

Список литературы / References

1. Белова Т.П., Ратчина Т.И., Ершова Л.С. Сорбционное извлечение никеля из продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № S32. С. 303–309.
2. Belova T.P., Ratchina T.I., Ershova L.S. Sorption nickel recovery from productive solutions of bacterial-chemical leaching of cobalt-copper-nickel ores // Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal). 2017. No. S32. P. 303–309 (in Russian).
3. Белова Т.П., Ершова Л.С. Сорбция цветных металлов из продуктивных растворов БХВ катионитом КУ-2-8 // Естественные и технические науки. 2018. № 4 (118). С. 98–102.
4. Belova T.P., Ershova L.S. Sorption of non-ferrous metals from productive solutions of BCHL by KU-2-8 // Estestvennyye i tekhnicheskie nauki. 2018. No. 4 (118). P. 98–102 (in Russian).
5. Белова Т.П. Экспериментальные данные переработки продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд методом последовательной сорбции // Камчатка-7: Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) (специальный выпуск 57). 2018. № 12. С. 148–153.
6. Belova T.P. Experimental data of productive solutions processing of bacterialchemical leaching of cobalt-copper-nickel ores by the method of sequential sorption // Kamchatka-7: Gornyj informacionno-analiticheskij byulleten' (nauchno-tekhnicheskij zhurnal) (special'nyj vypusk 57). 2018. No. 12. P. 148–153 (in Russian).
7. Белова Т.П., Ратчина Т.И. Исследование сорбции лития катионитом КУ-2-8 из модельных растворов, имитирующих геотермальные теплоносители в динамическом режиме // Записки горного института. 2020. Т. 242. С. 197–201.
8. Belova T.P., Ratchina T.I. Research of lithium sorption by KU-2-8 cation exchanger from model solutions simulating geothermal fluids in the dynamic mode // Zapiski gornogo instituta. 2020. Vol. 242. P. 197–201 (in Russian).
9. Belova T.P., Selivanova O.N. Adsorption of metal ions by sorbents composed of marine alga saccharina bongardiana and poriferous aluminosilicates Journal of Environmental Science and Engineering. 2012. Vol. 1. No. 4. P. 514–521.
10. Water Treatment and Purification – Lenntech. [Electronic resource]. URL: <https://www.lenntech.com/> (date of access: 08.05.2021).
11. Алексеева Т.В., Якубович Ю.В., Мусарова Г.М. Основные требования к применению ионитов на водоподготовительных установках тепловых электростанций. Технологические рекомендации по диагностике их качества и выбору. СТО ВТИ 37.002-2005. Челябинск, 2006.

- Alekseeva T.V., Yakubovich Yu.V., Musarova G.M. Basic requirements for use of ion exchangers in water treatment plants of thermal power plants. Technological recommendations for diagnosis of their quality and selection. STO VTI 37.002-2005. Chelyabinsk, 2006. (in Russian).
8. Taghreed Zewail, Nibal Yousef. Kinetic study of heavy metal ions removal by ion exchange in batch conical air spouted bed. Alexandria Engineering Journal. 2015. P. 8.
9. Makoskaya O.Yu., Kostromin K.S., Bryantseva N.I. Hydrometallurgical Technology for Processing of Galvanic Sludges. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 969. P. 6.
10. El-Naggar M.R., El-Kamash A. M., Haneen Abdel Salam Ibrahim. Sorptive Removal of Cesium and Cobalt Ions in a Fixed bed Column Using Lewatit S100 Cation Exchange Resin. Arab Journal of Nuclear Science and Applications. 2014. Vol. 47 (2). P. 77–93.
11. Patrushev V.V., Chubarov A.V., Smirnov I.I., Shulakov P.G. Co-processing of Copper and Nickel Ores from Noril'sk Deposits and the Apatites from Maymecha-Kotuy Province. Chemistry for Sustainable Development. 2003. Vol. 11. P. 395–405.
12. Марков В.Ф., Формазюк Н.И., Маскаева Л.Н., Макурин Ю.Н., Степановских Е.И. Извлечение меди (II) из промышленных стоков с помощью композиционного сорбента сильноокислотный катионит–гидроксид железа // Международный научный журнал «Альтернативная энергетика и экология» АЭЭ. 2007. № 3 (47). С. 144–149.
- Markov V.F., Formazyuk N.I., Maskaeva L.N., Makurin Yu.N., Stepanovskikh E.I. Removal of copper (II) from industrial waste water using combination sorbent comprising strong-acid cation resin and iron hydroxide // Mezhduнародny nauchnyj zhurnal «Аl'ternativnaya energetika i ekologiya» АЕЕ. 2007. No. 3 (47). P. 144–149. (in Russian).
13. Koliehova A., Trokhymenko H., Magas N. Extraction of Cu^{2+} , Zn^{2+} and Ni^{2+} cations from industrial wastewater by ionite KU-2-8. Ecology and environmental technology. 2019. No. 5/3 (49). P. 22–27.
14. Смирнова Л.Г., Смирнов А.К. Особенности сорбции тяжелых металлов катионитами // Современные проблемы естественных наук и медицины: сборник статей Всероссийской научной конференции (г. Йошкар-Ола, 18–20 мая 2020 г.). Йошкар-Ола: Изд-во Марийский государственный университет, 2020. С. 392–393.
- Smirnova L.G., Smirnov A.K. Propriety of sorption of heavy metals by cationites // Sovremennye problemy estestvennyh nauk i mediciny: sbornik statej Vserossijskoj nauchnoj konferencii (g. Jshkar-Ola, 18–20 maya 2020 g.). Jshkar-Ola: Izd-vo Marijskij gosudarstvennyj universitet, 2020. P. 392–393 (in Russian).
15. Alyüz B., Veli S. Kinetics and Equilibrium Studies for the Removal of nickel and zinc from aqueous solutions by ion exchange resins. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 167. Is. 1–3. P. 482–488.
16. Рязанова Е.В., Фокина А.И. Изучение динамики выхода ионов меди (II) из колонки с катионитом КУ-2-8 // Экология родного края: проблемы и пути их решения: материалы XIV Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (г. Киров, 16–18 апреля 2019 г.). Киров: Изд-во Вятский государственный университет, Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения РАН, 2019. С. 93–95.
- Ryazanova E.V., Fokina A.I. Study of dynamics of escape of copper (II) ions from column with cationite KU-2-8 // Ekologiya rodnogo kraja: problemy i puti ih resheniya: materialy XIV Vserossijskoj nauchno-prakticheskoy konferencii s mezhduнародnym uchastiem (g. Kirov, 16–18 aprelya 2019 g.). Kirov: Izd-vo Vyatskij gosudarstvennyj universitet, Institut biologii Komi nauchnogo centra Ural'skogo otdeleniya RAN, 2019. P. 93–95 (in Russian).
17. Kumar Jha M. Nguyen N., Le J., Jeong J., Yoo J. Adsorption of copper from the sulphate solution of low copper contents using the cationic resin Amberlite IR 120. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 164. Is. 2–3. P. 948–953.
18. Gomathi Priyaa P., Ahmed Bashab C., Ramamurthia V., Nathira Begumb S. Recovery and reuse of Ni (II) from rinse water of electroplating industries. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 163. P. 899–909.
19. Abo-Farha S.A., Abdel-Aal A.Y., Ashourb I.A., Garamon S.E. Removal of some heavy metal cations by synthetic resin Purolite C100. Journal of Hazardous Materials. 2009. Vol. 169. P. 190–194.
20. Кеймиров М.А. Очистка промывных вод гальванических производств от ионов тяжелых металлов ионообменным способом // Вестник технологического университета. 2020. Т. 23. № 12. С. 76–79.
- Kejmirov M.A. Cleaning of washing waters of electroplating plants from heavy metal ions by ion exchange method // Vestnik tekhnologicheskogo universiteta. 2020. Vol. 23. No. 12. P. 76–79 (in Russian).
21. Gulden Cetin, Sevgi Kocaoba, Goksel Akcin. Removal and Recovery of Chromium from Solutions Simulating Tannery Wastewater by Strong Acid Cation Exchanger. Journal of Chemistry. 2013. 7 p.
22. Haydarov A.A., Kashkay Ch.M., Guliyeva A.A., Huseynova A.B., Aghayev A.N., Jafarov Z.R. Recovery of precious metals from Dashkesan mineral tailings by combined methods. Azerbaijan chemical journal. 2016. No. 3. P. 121–129.
23. Пашков Г.Л., Саикова С.В., Пантелеева М.В., Саикова Д.И. Катионообменное выщелачивание окисленных никелевых руд Усть-Порожинского месторождения // Цветные металлы. 2018. № 8. С. 52–56.
- Pashkov G.L., Saikova S.V., Panteleeva M.V., Saikova D.I. Cation resin exchange leaching of oxidized nickel ores of the Ust-Porozhinskoye deposit // Tsvetnye Metally. 2018. No. 8. P. 52–56 (in Russian).
24. Белова Т.П., Ратчина Т.И. Сорбционная переработка продуктивных растворов бактериально-химического выщелачивания кобальт-медно-никелевых руд в динамическом режиме // Естественные и технические науки. 2018. № 11(125). С. 266–269.
- Belova T.P., Ratchina T.I. Sorption processing of productive solutions of bacterialchemical leaching of cobalt-copper-nickel ores in the dynamic mode // Estestvennye i tekhnicheskie nauki. 2018. No. 11(125). P. 266–269 (in Russian).