

УДК 66.011:66.023

ИОНООБМЕННАЯ ОЧИСТКА ВОДЫ ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ В АППАРАТАХ ПЕРИОДИЧЕСКОГО И НЕПРЕРЫВНОГО ДЕЙСТВИЯ

С.В. Натареев, Д.Е.Захаров, Н.А. Лапшин

Ивановский государственный химико-технологический университет

Проведен анализ работы ионообменных аппаратов периодического и непрерывного действия для очистки воды от ионов тяжелых металлов. Для сравнения были выбраны аппараты периодического действия с неподвижным вертикальным, горизонтальным и кольцевым слоем ионита, а также непрерывно действующие аппараты: однокамерный ионообменный аппарат с псевдооживленным слоем ионита, аппарат с секционированным псевдооживленным слоем ионита и пульсационная колонна с провальными тарелками КРИЗМ. Эффективность работы аппаратов оценивали по следующим показателям: удельная производительность аппарата, степень очистки воды, степень использования обменной емкости ионита и другим показателям. Отмечены достоинства и недостатки работы ионообменных аппаратов. Даны рекомендации по повышению эффективности работы аппаратов.

Ключевые слова: ионообменный аппарат, технология очистки воды, ионы тяжелых металлов.

Несомненными преимуществами ионообменных аппаратов для проведения процессов очистки воды от ионов тяжелых металлов являются их возможность получать глубоко обессоленную воду и возвращать извлеченные из воды ценные металлы в технологический процесс. Эффективность проведения ионного обмена во многом определяется конструктивным оформлением данного процесса. При выборе конструкции аппарата необходимо учитывать целый ряд различных показателей, которые можно разделить на технологические, экономические и экологические. На первом этапе выбор ионообменного аппарата может быть выполнен по таблице «Показатели для предварительного выбора аппарата», приведенной в работе [1]. Здесь же приводятся технические характеристики и области применения некоторых промышленных типов ионообменных аппаратов. Из приведенных данных видно, что на выбор аппарата существенное влияние оказывают состав и расход обрабатываемой воды, режим её поступления на очистку, качество очищенной воды, физико-химическими свойствами ионита, капиталь-

ные и эксплуатационные затраты и другие факторы. При сопоставлении характеристик аппаратов необходимо, чтобы они работали в ионообменных системах, близких по фазовому составу и концентрациям. С учетом данных рекомендаций для сравнения эффективности работы ионообменного оборудования были выбраны аппараты периодического действия с неподвижным вертикальным, горизонтальным и кольцевым слоем ионита, а также непрерывно действующие аппараты: однокамерный ионообменный аппарат с псевдооживленным слоем ионита, аппарат с секционированным псевдооживленным слоем ионита и пульсационная колонна с провальными тарелками КРИЗМ.

Аппарат с неподвижным вертикальным слоем ионита (рис. 1) представлял собой цилиндрический корпус 1 диаметром 0,026 м, внутри которого на опорной решетке 2 располагался слой ионита высотой 0,3 м [2]. Исходный раствор подавался в верхней части аппарата с помощью распределительного устройства 3. Раствор, проходя сверху вниз через неподвижный слой ионита, очищался

от ионов тяжелых металлов, а затем удалялся через штуцер 4, расположенный в нижней части аппарата. Для опытов использовали катионит КУ–2–8 в Н–форме. Концентрация исходного раствора хлористого цинка составляла 0,05 н.

В горизонтальном адсорбере (рис.2) корпус аппарата 1 имел диаметр 0,1 м и длину 0,26 м. Высота слоя ионита в аппарате составляла 0,35 м. Слой ионита ограничен снизу опорной решеткой, а сверху – диаметром аппарата [3]. Исследование процесса ионного обмена заключалось в пропускании сверху вниз через неподвижный слой катионита LewatitS–100 в Н - форме исходного раствора сульфата меди с концентрацией 0,05 н. Сильнокислотный катионит LewatitS–100(Германия) является аналогом отечественного катионита КУ–2–8 [4].

Кольцевой адсорбер (рис. 3) состоял из цилиндрического корпуса 1 и плоской крышки 2. Внутри аппарата были установлены внутренняя 3 и наружная 4 цилиндрические решетки, между которыми находился неподвижный слой ионита. Исходный раствор подавался через штуцер 5 и проходил через кольцевой слой ионита в направлении от наружной решетки 4 к внутренней 3. Очищенный раствор удалялся в верхней части аппарата с помощью штуцера 6. Аппарат имел следующие характеристики: диаметр аппарата - 0,2 м; высота аппарата – 0,25 м; диаметр внутренней решетки – 0,05 м; диаметр наружной решетки – 0,11 м; высота слоя ионита в аппарате – 0,13 м; толщина кольцевого слоя ионита в аппарате – 0,03 м [5]. В качестве ионообменного материала использовали катионит LewatitS–100 в Н–форме. Концентрация исходного раствора сульфата меди составляла 0,05 н.

В односекционном аппарате с псевдооживленным слоем ионита (рис. 4) очищаемый раствор непрерывно двигался в корпусе 1 снизу вверх, поддерживая находящийся на распределительной ре-

шетке 2 слой ионита в псевдооживленном состоянии. Исходный раствор подавался в аппарат через штуцер 3, а очищенный раствор отводился из аппарата через штуцер 6. Отрегенерированный ионит поступал в аппарат по трубе 4, а отработанный ионит удалялся из аппарата через трубу 5. Для проведения опытов был изготовлен лабораторный ионообменный аппарат с цилиндрическим корпусом диаметром 0,08 м и коническим днищем. В нижней части корпуса аппарата располагалась распределительная решетка толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м с диаметром отверстий $2 \cdot 10^{-3}$ м и проходным сечением 20,6%. Высота псевдооживленного слоя ионита в аппарате составляла 0,12 м. В верхней части аппарата располагалась камера для разделения твердой и жидкой фаз, представлявшая собой цилиндр диаметром 0,15 м и высотой 0,1 м, соединенный с корпусом аппарата конической обечайкой [6-8]. В аппарате проводили исследование процесса ионного обмена в системе катионит КУ–2–8(Н–форма) – раствор $ZnCl_2$. Концентрация водного раствора хлористого цинка составляла $5,1 \cdot 10^{-3}$ н.

Тарельчатая колонна с псевдооживленным слоем ионита была изготовлена прямоугольного сечения размером $0,075 \times 0,02$ м. Аппарат имел шесть распределительных тарелок 2 толщиной $3 \cdot 10^{-3}$ м с раззенкованными отверстиями диаметром $1,6 \cdot 10^{-3}$ м и проходным сечением 1,88%. Ионит подавался в аппарат через верхнюю трубу. Движение ионита с одной тарелки на ниже расположенную осуществлялось через переточные стаканы 3, образованными вертикальными планками, удаленными от стенок аппарата на 0,055 м. Нижний срез вертикальной планки был удален от распределительной тарелки на 0,015 м. Высота порога, определяющая высоту псевдооживленного слоя смолы на тарелке, принималась 0,03 м. Очищаемый раствор последовательно проходил снизу вверх через распределитель-

тельные тарелки, поддерживая находящиеся на них слой ионита в псевдооживленном состоянии. Отвод отработанного ионита проводили через штуцер в нижней части аппарата [9]. При проведении экспериментальных исследований использовали катионит КУ–2–8 (Н–форма) и 0,01 н раствор хлористого цинка.

Пульсационный ионообменный аппарат (рис.6) представлял собой вертикальный корпус 1, к нижней части которого был присоединен пневматический пульсатор 3. По высоте колонны на равном расстоянии друг от друга располага-

лись тарелки 2 типа КРИЗМ, которые задерживали ионит при движении раствора вверх, но пропускали ионит вниз при изменении направления раствора на нисходящий. При каждой подаче импульса происходил перенос ионита с одной тарелки на другую. Для анализа были использованы экспериментальные [10] и расчетные [11-12] данные по очистке воды от ионов никеля на катионите КУ–2–8 (Н–форма) в пульсационной колонне диаметром 0,2 м с 20 провальными тарелками с проходным сечением 10 %.

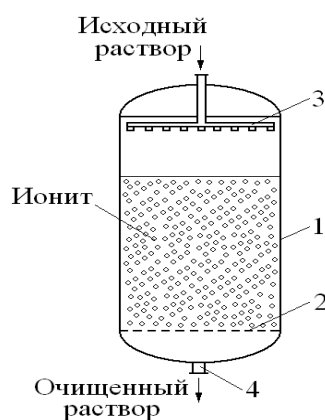


Рис. 1. Аппарат с неподвижным вертикальным слоем ионита:

1 – корпус; 2 – опорная решетка; 3 – распределительное устройство; 4 – штуцер для вывода раствора

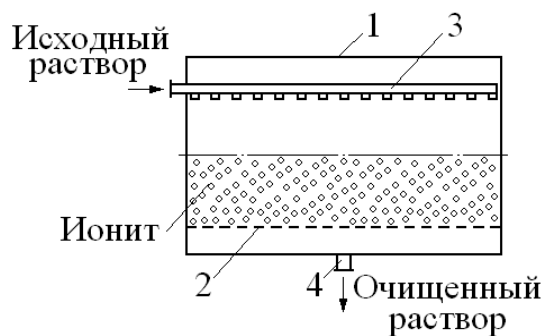


Рис. 2. Аппарат с неподвижным горизонтальным слоем ионита:

1 – корпус; 2 – опорная решетка; 3 – распределительное устройство; 4 – штуцер для вывода раствора

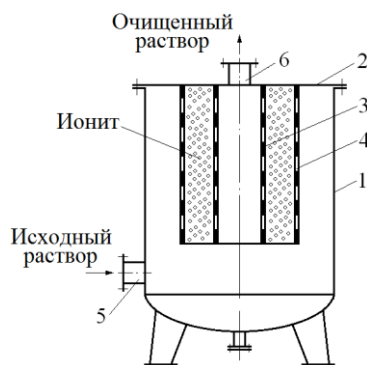


Рис. 3. Аппарат с кольцевым неподвижным слоем ионита:

1 – корпус; 2 – крышка; 3 – решетка внутренняя; 4 – решетка наружная; 5 – штуцер для ввода раствора; 6 – штуцер для вывода раствора

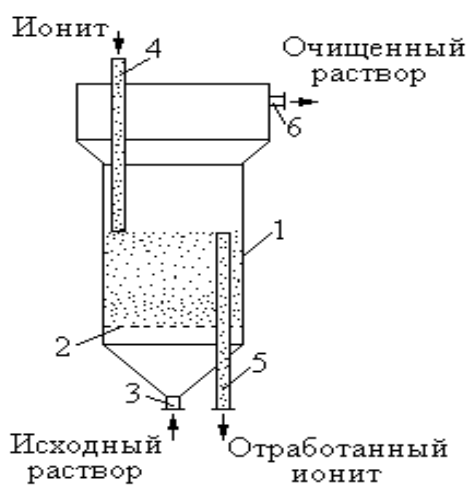


Рис. 4. Односекционный аппарат с псевдооживленным слоем ионита:

1 – корпус, 2 – распределительная решетка, 3, 6 – патрубки, 4, 5 – трубы

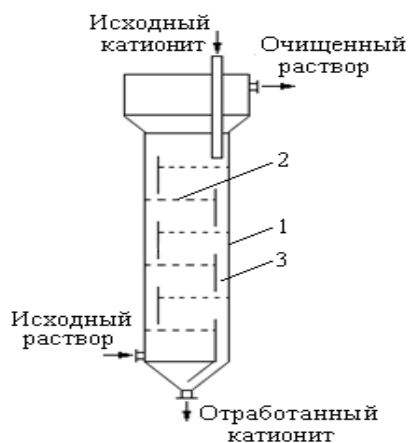


Рис. 5. Тарельчатая колонна с псевдооживленным слоем ионита:

1 – корпус, 2 – тарелка, 3 – переточный стакан

Сравнительную оценку эффективности работы ионообменных аппаратов проводили по величине удельной произ-

$$q = \frac{Q}{S_a}, \quad \frac{\text{м}^3}{\text{м}^2 \cdot \text{ч}}, \quad (1)$$

где Q – производительность аппарата по очищаемой воде, $\text{м}^3/\text{ч}$; S_a – площадь поперечного сечения аппарата, м^2 .

Для кольцевого адсорбера величина S_a рассчитывалась как средняя ариф-

метическая величина от значения площади цилиндрической поверхности наружной решетки и значения площади цилиндрической поверхности внутренней решетки аппарата.

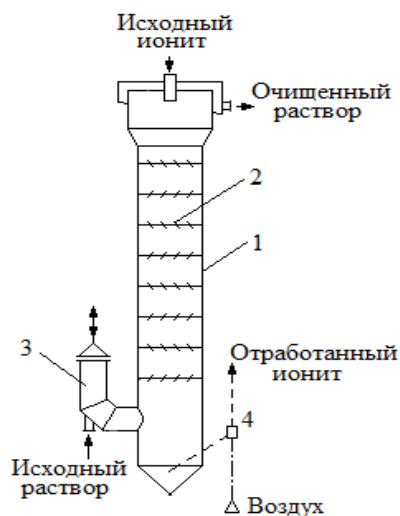


Рис. 6. Тарельчатая колонна с транспортной пульсацией:

1 – корпус, 2 – тарелка КРИЗМ, 3 – пульсационное устройство, 4 – эрлифт

Для горизонтального адсорбера величина S_a рассчитывалась как средняя арифметическая величина от значения площади поверхности верхнего слоя ионита, расположенного на уровне диаметра аппарата, и значения площади поверх-

ности опорной решетки, на которой находится слой ионита.

Для расчета единовременной загрузки катионита в аппаратах использовали следующие формулы.

А) аппарат с неподвижным вертикальным слоем ионита:

$$\bar{m} = \frac{HS_a}{\bar{V}_{уд}}, \quad (2)$$

где \bar{m} – единовременная загрузка ионита в аппарат, кг; $\bar{V}_{уд}$ – удельный объем неподвижного слоя ионита в на-

бухшем состоянии, $\text{м}^3/\text{кг}$; H – высота плотного слоя ионита в аппарате, м.

Значение $\bar{V}_{уд}$ для катионита КУ–2–8 составляло $2,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{кг}$ [13].

Б) аппарат с неподвижным горизонтальным слоем ионита:

$$\bar{m} = \left(\frac{S_{г.а}}{2} - S_{сегм} \right) \frac{L}{\bar{V}_{уд}} = \left[\frac{\pi D_a^2}{8} - \frac{D_a^2}{8} \left(\pi \frac{\alpha}{180} - \sin \alpha \right) \right] \frac{L}{\bar{V}_{уд}}, \quad (3)$$

где $S_{г.а}$ – площадь поперечного сечения аппарата, m^2 ; $S_{сегм}$ – площадь сегмента, образованного корпусом аппарата

и опорной решеткой, m^2 ; L – длина аппарата, m ; α – центральный угол сегмента, град.

В) аппарат с кольцевым неподвижным слоем ионита:

$$\bar{m} = \pi (R_1^2 - R_2^2) \frac{H}{\bar{V}_{уд}}, \quad (4)$$

где R_1 – радиус наружной решетки, m ; R_2 – радиус внутренней решетки, m .

При расчете единовременной загрузки катионита в односекционном ап-

парате с псевдооживленным слоем ионита сначала находили высоту плотного слоя ионита, используя уравнение:

$$H(1 - \varepsilon) = H_{п.с}(1 - \varepsilon_{п.с}), \quad (5)$$

где $H_{п.с}$ – высота псевдооживленного слоя ионита, m ; ε и $\varepsilon_{п.с}$ – порозность плотного и псевдооживленного слоя ионита соответственно.

Затем по формуле (2) находили значения \bar{m} .

Значение единовременной загрузки ионита в тарельчатой колонне с переточными стаканами находили как сумму масс ионита на всех тарелках и в пере-

$$\eta = 1 - \frac{C_{вых}}{C_{вх}}, \quad (6)$$

где $C_{вх}$, $C_{вых}$ – концентрация ионов тяжелых металлов в исходной и очищенной воде соответственно, $кг-экв/м^3$.

точных стаканах. При этом принимали, что ионит на тарелках и в перетоках находится в плотном неподвижном состоянии.

В тарельчатой колонне с транспортной пульсацией значение \bar{m} находили как сумму масс плотных набухших слоев ионита на всех тарелках аппарата.

Степень очистки воды определяли по формуле:

Степень использования обменной емкости ионита находили по формулам:

а) в аппаратах периодического действия:

$$\bar{\eta} = \frac{Q(C_{вх} - C_{вых})\tau}{E_0 \bar{V}} 100, \quad \%; \quad (7)$$

б) в аппаратах непрерывного действия:

$$\bar{\eta} = \frac{Q(C_{вх} - C_{вых})}{Q(E_0 - C_{вых})} 100, \quad \%; \quad (8)$$

где E_0 – динамическая обменная емкость ионита, кг-экв/м³; \bar{Q} – производительность аппарата по иониту, м³/с; \bar{V} – объем ионита в аппарате, м³; τ – время процесса, с.

Сопоставление технических характеристик работы ионообменных аппаратов приведено в таблицах 1 и 2. Из приведенных данных, видно, что использование тарельчатой и пульсационной колонн непрерывного действия с секционированным слоем ионита позволяет вести процесс ионообменной очистки растворов от ионов тяжелых металлов с относительно небольшой единовременной загрузкой ионита и очищать воду до степени не менее 86% при использовании обменной емкости ионита в среднем на 80%. При этом удельная производительность этих аппаратов является достаточно высокой и составляет, например, для пульсационной колонны 39,6 м³/(м²·ч).

Несколько худшие показатели работы по сравнению с тарельчатой колонной имеет односекционный аппарат с псевдооживленным слоем ионита, поскольку высокая степень очистки раствора, равная 88%, достигается при использовании обменной емкости катионита только на 64%.

Весьма эффективен аппарат с вертикальным неподвижным слоем ионита, поскольку при проведении процесса очистки воды, до проскока сорбируемых ионов меди в фильтрате, обменная емкость ионита используется на 65%. Примерно одинаковые характеристики имеют горизонтальный и кольцевой адсорберы. При относительно высокой степени очистки воды, равной 96%, обменная емкость ионита используется в данных аппаратах не более чем на 52%. Следует отметить, что горизонтальный и кольцевой адсорберы могут применяться для ионообменной очистки как значительных, так и небольших объемов воды с переменной исходной концентрацией сорбируемых ионов. Эти аппараты по сравнению с вертикаль-

ным ионитовым фильтром, имеют большую площадь контакта между ионитом и очищаемой водой. Для повышения эффективности работы данных аппаратов целесообразно применить известные рекомендации для вертикального ионитового фильтра [13,14]: 1) проводить очистку воды по схеме с двумя последовательно соединенными аппаратами, при которой в первом, по ходу движения раствора аппарате, максимально используется обменная емкость ионита, а во втором аппарате ионообменный процесс проводят до требуемой степени очистки воды; 2) осуществлять противоточную регенерацию неподвижного слоя ионита, по которому регенерационный раствор подается противотоком к направлению движения очищаемой воды; 3) повторно использовать регенерационный раствор, отобранный на последних стадиях восстановления обменной емкости ионита; 4) восстанавливать обменную емкость катионита не более чем на 75–80 % и др.

Перспективы развития ионообменной технологии, несомненно, определяются необходимостью получения новых ионитов с высокими механическими, сорбционными и кинетическими свойствами, создания высокопроизводительного оборудования, а также совершенствования режимов работы существующих аппаратов. Из анализа технических характеристик ионообменных аппаратов можно выделить следующие мероприятия, позволяющие добиться лучших показателей их работы:

- 1) организация противоточного движения ионита и раствора;
- 2) реализация развитого гидродинамического режима, обеспечивающего равномерное распределение фаз в аппарате и устранение застойных зон;
- 3) увеличение поверхности контакта между ионитом и раствором;
- 4) секционирование рабочего объема аппарата для исключения обратного перемешивания фаз;

5) применение эффективного разделения ионита и раствора при их переходе из одной секции в другую;

б) снижение удельного потребления ионита;

7) автоматизация работы аппарата с применением средств самонастройки на оптимальный режим и др.

Таблица 1

Технические характеристики работы ионообменных аппаратов периодического действия

Наименование показателя	Вертикальный адсорбер	Горизонтальный адсорбер	Кольцевой адсорбер
Ионообменная система	Катионит КУ–2–8(Н) – раствор ZnCl ₂	Катионит LewatitS–100(Н) – раствор CuSO ₄	Катионит LewatitS–100(Н) – раствор CuSO ₄
$Q \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{с}$	0,03	0,33	0,33
$C_{\text{вх}} \cdot 10^2, \text{ кг-экв}/\text{м}^3$	5	5	5
$E_0, \text{ кг-экв}/\text{м}^3$	1,65	1,8	1,78
$\bar{m}, \text{ кг}$	0,06	0,43	0,35
$q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	20,38	5,8	3,6
$\eta, \%$	97	96	96
$\bar{\eta}, \%$	65	54	52

Таблица 2

Технические характеристики работы ионообменных аппаратов непрерывного действия

Наименование показателя	Односекционный-аппарат с псевдоожиженным слоем ионита	Тарельчатая колонна с псевдоожиженным слоем ионита	Пульсационная колонна непрерывного действия
Ионообменная система	Катионит КУ–2–8(Н) – раствор ZnCl ₂	Катионит КУ–2–8(Н) – раствор ZnCl ₂	Катионит КУ–2–8(Н) – раствор NiSO ₄
$Q \cdot 10^4, \text{ м}^3/\text{с}$	0,21	4,6	3,49
$\bar{Q} \cdot 10^7, \text{ м}^3/\text{с}$	1,42	0,363	6,1
$C_{\text{вх}} \cdot 10^2, \text{ кг-экв}/\text{м}^3$	0,51	1	0,187
$E_0, \text{ кг-экв}/\text{м}^3$	1,25	1,4	1,16
$\bar{m}, \text{ кг}$	0,136	0,08	4,73
$q, \text{ м}^3/(\text{м}^2 \cdot \text{ч})$	15	13,8	39,6
$\eta, \%$	88	93	86
$\bar{\eta}, \%$	64	84	79

Используя данные таблицы «Показатели для предварительного выбора аппарата» [1], можно также дать оценку и

анализ экономической эффективности рассмотренного ионообменного оборудования.

Например, капитальные затраты для изготовления аппаратов периодического действия с неподвижным слоем ионита имеют оценку «5 – стоимость небольшая», а для аппаратов непрерывного действия эта оценка находится в интервале от «3» до «2», что соответствует «высокой стоимости» и «очень высокой стоимости». Однако эксплуатационные расходы на реагенты и электроэнергию в аппаратах периодического действия значительно выше, чем в аппаратах непрерывного действия.

Выводы. Выбор конструкции ионообменного аппарата является важным и ответственным этапом. Полученные данные по удельной производительности, загрузке ионита и другим показателям показывают существенные преимущества колонных ионообменных аппаратов непрерывного действия по сравнению с аппаратами с неподвижным слоем ионита. Однако для очистки воды от ионов тяжелых металлов могут успешно применяться аппараты периодического действия. В настоящее время нет единого критерия, позволяющего четко рекомендовать тот или ионный тип аппарата для заданных условий его эксплуатации. К выбору аппарата в большинстве случаев приходится подходить индивидуально на основе сопоставления их технико-экономических показателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Иониты в химической технологии / Отв. ред. Б.П. Никольский и П.Г. Романков. Л.: Химия, 1982. 416 с.
2. Слизнева Т.Е., Натарева С.В. Математическое моделирование ионного обмена в аппарате со стационарным слоем зернистого ионита // Теоретические основы химической технологии. 2004. Т. 38. № 2. С. 181–184.
3. Дубкова Е.А., Натарева С.В., Никифорова Т.Е., Харченко И.С. Математическое описание процесса ионообменного извлечения тяжелых металлов на природном и синтетическом сорбентах // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2013. Т. 56. № 11. С. 124–127.
4. Новый справочник химика и технолога. Сырье и продукты промышленности органических и неорганических веществ. Ч. II. СПб.: АНО НПО «Профессионал», 2007. 1142 с.
5. Натарева С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е., Натарева О.С. Динамика сорбции и десорбции ионов меди в кольцевом слое катионита // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 10. С. 73–76.
6. Натарева С.В., Перов Р.П., Быков А.А. Ионообменная адсорбция в однокамерном аппарате с кипящим слоем ионита // Надежность и долговечность машин и механизмов: сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию со Дня образования учебного заведения и Году пожарной охраны России, Иваново; под общ. ред. В.В. Киселева. Иваново, 2016. С. 116–120.
7. Быков А.А., Натарева О.С., Натарева С.В. Ионообменная адсорбция в однокамерном адсорбере с кипящим слоем ионита // Перспективы развития и современные проблемы образования, науки и производства: материалы Всероссийской научно-практической конференции, посвященной 50-летию города Нижнекамск: в 2-х т. Т. 1. Нижнекамск, 2016. С. 130–134.
8. Натарева С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е., Никифорова Т.Е. Ионный обмен в аппарате кипящего слоя непрерывного действия. // Известия вузов. Серия «Химия и хим. технология». 2017. Т. 60. № 2. С. 85–90.
9. Натарева С.В., Дубкова Е.А., Никифорова Т.Е., Натарева О.С., Быков А.А. Ионообменное извлечение ионов двухвалентных металлов в тарельчатой колонне со взвешенным слоем катионита // Известия вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. № 1. С. 75–80.
10. Дьяконов В.С., Михеев Л.К., Бродецкий О.А. Очистка сбросовых вод от никеля на пульсационной сорбционной колонне // Цветные металлы. 1975. № 9. С. 30–32.
11. Натарева С.В., Быков А.А., Беляев С.В. Ионообменная адсорбция ионов тяжелых металлов в пульсационной колонне // Пожарная и аварийная безопасность. 2016. № 2. С. 38–44.
12. Натарева С.В., Быков А.А., Захаров Д.Е. Ионный обмен в пульсационной колонне непрерывного действия // Вектор науки ТГУ. 2016. № 4 (38). С. 38–44.
13. Аширов А. Ионообменная очистка сточных вод, растворов и газов. Л.: Химия, 1983. 295 с.
14. Волжинский А.И., Констатнинов В.А. Регенерация ионитов. Теория процесса и расчет аппаратов. Л.: Химия, 1990. 240 с.

Рукопись поступила в редакцию 12.03.2019г.

ION EXCHANGE WATER TREATMENT FROM HEAVY METAL IONS IN THE DEVICES OF PERIODICAL AND CONTINUOUS ACTION

S. Natareev, D. Zaharov, N. Lapshin

The analysis of the operation of ion exchange apparatus of periodic and continuous action on the example of water purification from heavy metal ions has been carried out. For comparison, we selected devices of periodic action with a fixed vertical, horizontal and annular layer of ionite, as well as continuously operating devices: a single-chamber ion-exchange device with a suspended ionite layer, an apparatus with a partitioned suspended ionite layer and a pulsation column with KRIZM dips. The efficiency of the apparatus was evaluated by the following indicators: the specific productivity of the apparatus, the degree of water purification, the degree of use of the exchange capacity of the ionite and other indicators. The advantages and disadvantages of the work of ion-exchange apparatus are noted. Recommendations to improve the efficiency of the apparatus.

Key words: ion exchange apparatus, water purification, heavy metal ions.

References

1. Ionity v himicheskoy tekhnologii / Otv. Red. B.P. Nikol'skij, P.G. Romankov. L.: Himiya, 1982. 416 s.
2. Slizneva T.E., Natareev S.V. Matematicheskoe modelirovanie ionnogo obmena v apparate so stacionarnym sloem zernistogo ionita. Teoreticheskie osnovy himicheskoy tekhnologii. 2004. T. 38. № 2. S. 181–184.
3. Dubkova E.A., Natareev S.V., Nikiforova T.E., Harchenko I.S. Matematicheskoe opisanie processa ionnoobmennogo izvlecheniya zhelyh metallov naprirodnom sinteticheskom sorbentah. Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2013. T. 56. № 11. S. 124–127.
4. Novyjspravochnik himika i tekhnologa. Syr'eiprodukt promyshlennosti organicheskikh i neorganicheskikh veshchestv. CH. II. SPb.: ANO NPO «Professional», 2007. 1142 s.
5. Natareev S.V., Bykov A.A., Zaharov D.E., Natareev O.S. Dinamika sorbtsii i desorbtsii ionov medi v kol'cevom sloe kationita. Izvestiya vuzov. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2015. T. 58. № 10. S. 73–76.
6. Natareev S.V., Perov R.P., Bykov A. A. Ionoobmennaya adsorbtsiya v odnokamernom apparate s kipyashchimsloem ionita // Nadezhnost' idolgovechnost' mashin i mekhanizmov: sbornik materialov VII Vserossiyskaj naučaj–prakticheskaj konferentsiya, posvyashchenoj 50–letiyu so Dnya obrazovaniya i nauchnogo zavedeniya i Godu pozharnoj ohrany Rossii, Ivanovo; pod obsch. red. V.V. Kiseleva. Ivanovo, 2016. S. 116–120.
7. Bykov A.A., Natareev O.S., Natareev S.V. Ionoobmennaya adsorbtsiya v odnokamernom adsorbere s kipyashchimsloem ionita // Perspektivy razvitiya i sovremennyye problemy obrazovaniya, nauki i proizvodstva: materialy Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, posvyashchenoj 50–letiyu goroda Nizhnekamsk: v 2–h t. T. 1. Nizhnekamsk, 2016. C. 130–134.
8. Natareev S.V., Bykov A.A., Zaharov D.E., Nikiforova T.E. Ionny jobmen v apparate kipyashchegosloyanepriyvno godejstviya. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2017. T. 60. № 2. S. 85–90.
9. Natareev S.V., Dubkova A.E., Nikiforova T.E., Natareev O.S., Bykov A.A. Ionoobmennoe izvlechenie ionov divalentnyh metallov v tarel'chatoy kolonne so vzveshennym sloem kationita. Himiya i himicheskaya tekhnologiya. 2015. T. 58. № 1. S. 75–80.
10. D'yakonov V.S., Miheev L.K., Brodeckij O.A. Ochistka sbrosovykh vodotnikelyanapul'sacionnojsorbtsionnoy kolonne. Cvetnye metally. 1975. № 9. S. 30–32.
11. Natareev S.V., Bykov A.A., Belyaev S.V. Ionoobmennaya adsorbtsiya ionov zhelyh metallov v pul'sacionnoy kolonne. Pozharnaya i aviarijnaya bezopasnost'. 2016. № 2. S. 38–44.
12. Natareev S.V., Bykov A.A., Zaharov D.E. Ionny jobmen v pul'sacionnoy kolonne nepriyvno godejstviya. Vektornauki TGU. 2016. № 4 (38). C. 38–44.
13. Ashirov A. Ionoobmennaya ochistka stochnykh vod, rastvorov i gazov. L.: Himiya, 1983. 295 s.
14. Volzhinskij A.I., Konstatninov V.A. Regeneratsiya ionitov. Teoriya processa i raschet apparatov. L.: Himiya, 1990. 240 s.