

УДК 550.4+553.7+556.114

Г.В. Попов

**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ИЗВЛЕЧЕНИЯ
БОРА ИЗ ТЕПЛОНОСИТЕЛЕЙ ГЕОТЕРМАЛЬНЫХ
МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Рассмотрены основные методы извлечения бора из природных теплоносителей геотермальных месторождений, которые можно разделить на два класса: сорбционные и мембранные. Представлены основные характеристики процессов, достоинства и недостатки методов.

Ключевые слова: бор, извлечение, сорбция, ионообменные смолы, геотермальный теплоноситель.

Сорбция является основным методом извлечения бора, не требующим сложных технических решений [1]. Исследования сорбции бора ведутся на разных сорбентах: оксидах металлов, природных и синтезированных глинистых материалах, целлюлозе и активированном угле, ионообменных смолах [1–11].

Наилучшей сорбционной емкостью по отношению к бору обладают диоксид циркония (ZrO_2) и оксид алюминия (Al_2O_3) [1,3,4]. В работе [1] в качестве сорбента использовали золу, полученную на электростанции после сжигания бурого угля. Выявлено, что наименьшей сорбирующей способностью обладает зола при $pH=8,5$. Равновесие было достигнуто спустя 24 часа. Степень извлечения составила 65,5 %. Другим видом сорбента, используемым для извлечения бора, являются слоистые двойные гидроксиды. Они представляют собой широко распространенную группу минералов в природе [2].

Более распространенным видом сорбентов для извлечения бора из природных теплоносителей геотермальных месторождений являются хелатирующие смолы [2,4,5,9]. Среди борселективных ионитов можно выделить PUROUTE S-108 (Purolite), BSR-1 (Dow Chemical) и Amberlit IRA – 743 [2,3]. Иониты представляют собой макропористые анионообменные смолы на полистирольной основе, имеющие в качестве функциональных

групп аминоккомплексы, которые обладают высокой селективностью и емкостью по отношению к бору [2,3]. Смолы эффективно работают в растворах при pH=6–10 в широком интервале концентраций бора, при температуре до 60°C. Было исследовано две хелатирующие смолы: Diaion CRB02 и P (VbNMDG), последнюю из которых синтезировали в лаборатории [4]. Степень извлечения составила 98 %. Смола P (VbNMDG) обладает большей сорбционной способностью и может применяться в мембранных методах извлечения бора [4]. Было предложено совместить в процессе извлечения бора из природного теплоносителя геотермального месторождения мембранный метод и метод ионного обмена, с использованием борселективных смол [5].

Для извлечения бора из геотермального теплоносителя месторождения Кизилдере использовали две хелатирующие смолы: Diaion CRB02 и Dowex (XUS 43594.00), при pH=8,6 и концентрации бора 10,75 мг/л [3]. При непрерывном перемешивании в течение 48 часов и температуре 30°C наблюдали максимальное извлечение бора. Было выявлено, что уменьшение размера частиц смолы ведет к увеличению сорбционной способности.

Другим способом извлечения бора из геотермального теплоносителя является электрокоагуляция. В работе [6] использовали алюминиевые электроды. Максимальная степень извлечения 95 % была достигнута при pH=8,0. Недостатком алюминиевых электродов является то, что в процессе остается осадочный алюминий, который трудно извлечь из раствора. В работе [7] использовали цинковый электрод. При pH=7 и плотности тока 0,2 А/дм², получили степень извлечения 93,2 % [7]. Авторы [8] предлагают извлечение бора соосаждением боратионов с гидроксидом магния.

В жидкостной экстракции для извлечения бора в основном применяют поли-спиртовые растворители [9]. Авторы [10] считают экстракционно-сорбционную технологию перспективным методом извлечения бора. Была исследована экстракция бора n-октиловым спиртом, с последующей реэкстракцией раствора карбонатом натрия [10]. Реэкстрактор нейтрализовали кислотой, с последующим возвращением его на стадию экстракции.

Таблица 1

Сравнение методов извлечения бора

Метод	Достоинства	Недостатки	Степень извлечения
Электродиализ	Низкое давление, высокая степень очистки	Большое количество ионов хлора, контроль рН	До 99 %
Обратный осмос	Селективен в щелочной среде, эффективное разделение боратов	Большие значения давления, частый ремонт установок; контроль рН	До 98 %
Электродионизация	Эффективное извлечение ионов бора	Осаждение гидроксидов, дорогостоящие электроды	До 96 %
Адсорбция	Возможность извлекать при меньших концентрациях	Регенерация сорбентов кислотой и щелочью	Более 65 %
Сорбция ионитами	Высокая селективность к бору, снижение времени контакта	Дорогостоящие смолы, маленькая площадь поверхности	Более 95 %
Электрокоагуляция	Сокращение времени процесса	Высокое потребление энергии	До 96 %
Экстракция	Дешевые и доступные реагенты	Плохая химическая и термическая стабильность	До 95 %

В работе [11] приводятся прогнозные данные по ресурсам запаса бора геотермальных месторождений Камчатки. Паужетское месторождение является перспективным по извлечению бора, содержание H_3BO_3 составляет 3187,8 т/год [11].

В последние годы были разработаны гибридные установки по извлечению бора из гидротермальных растворов [2,3,5,10]. Гибридные методы включают достоинства всех методов (табл. 1) и позволяют уменьшить время сорбции и сократить энергетические затраты. При выборе метода для извлечения бора из геотермального теплоносителя следует учитывать физико-химические свойства раствора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Polowczyk I., Ulatowska J., Kozlecki T., Bastrzyk A., Sawinski W. Studies on removal of boron from aqueous solution by fly ash agglomerates // *Desalination*, 310 (2013), pp. 93–101.
2. Wang B., Guo X., Bai P. Removal technology of boron dissolved in aqueous solutions – A review // *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 444 (2014), pp. 338–344.
3. Recepoglu O., Beker U. A preliminary study on boron removal from Kizildere / Turkey geothermal waste water // *Geothermics*, 40 (1991), pp. 83–89.
4. Santander P., Rivas B.L., Urbano B.F., Ipek I.Y., Ozkula G., Arda M., Yuksel M., Bryjak M., Kozlecki T., Kabay N. Removal of boron from geothermal water by a novel boron selective resin // *Desalination*, 310 (2013), pp. 102–108.
5. Yilmaz-Ipek I., Kabay N., Ozdural A. R. Non-equilibrium sorption modeling for boron removal from geothermal water using sorption–microfiltration hybrid method // *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 50 (2011), pp. 599–607.
6. Yilmaz A.E., Boncukcuoglu R., Kocakerim M.M., Yilmaz M.T., Paluluoglu C. Boron removal from geothermal waters by electrocoagulation // *Journal of Hazardous Materials*, 153 (2008), pp. 146–151.
7. Vasudevan S., Lakshmi J., Sozhan G. Electrochemically assisted coagulation for the removal of boron from water using zinc anode // *Desalination*, 310 (2013), pp. 122–129.
8. Уланов Н.М., Корчик Н.М., Рогов О.В., Омельчук В.П. Селективное извлечение ценных компонентов из природных вод // Извлечение минеральных компонентов из геотермальных растворов: Тезисы докладов. – Петропавловск-Камчатский, 2005, С.56–60.
9. Tagliabue M., Reverberi A.P., Bagatin R. Boron removal from water: needs, challenges and perspectives // *Journal of Cleaner Production*, 77(2014), pp. 56–64.
10. Авраменко В.А., Добржанский В.Г., Медков М.А., Юдаков А.А. Экстракционно–сорбционная технология извлечения бора из термальных источников Паужетского гидротермального месторождения // Извлечение минеральных компонентов из геотермальных растворов: Тезисы докладов. – Петропавловск-Камчатский, 2005, С.33–35.
11. Трухин Ю.П. Геохимия современных геотермальных процессов и перспективные геотехнологии. – М.: Наука, 2003. – 376 с. **ГИАН**

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Попов Григорий Васильевич – младший научный сотрудник, аспирант, nigtc@kscnet.ru, Научно-исследовательский геотехнологический центр Дальневосточного отделения Российской академии наук.



UDC 550.4+553.7+556.114

**MODERN METHODS AND RECIPE EXTRACTION OF BORON FROM
THE COOLANTS GEOTHERMAL DEPOSITS**

Popov G.V., Junior Research scientist, Graduate Student, nigtc@kscnet.ru, Research Geotechnological Center, Far Eastern Branch of Russian Academy of Sciences, Russia.

The basic methods extraction of boron from the natural coolants geothermal deposits, which can be divided into two groups: sorption and membrane. The main properties of the processes, advantages and disadvantages of the methods.

Key words: boron, extraction, sorption, ion exchange resins, geothermal coolants.

REFERENCES

8. Ulanov N.M., Korchik N.M., Rogov O.V., Omel'chuk V.P. *Tezisy dokladov* (Abstracts. Petropavlovsk–Kamchatskij, 2005, pp. 56–60.
10. Avramenko V.A., Dobrzhanskij V.G., Medkov M.A., Yudakov A.A. *Tezisy dokladov* (Abstracts. Petropavlovsk–Kamchatskij, 2005, pp. 33–35.
11. Trukhin Y.P. *The geochemistry of modern geothermal processes and advanced geotechnology* (Geochemistry of modern geothermal processes and Geotechnology perspective). Moscow: Science, 2003. 376 p.