УДК 661.471.64

ИЗВЛЕЧЕНИЕ ЙОДА ИЗ ПОДЗЕМНЫХ ВОД ХИМИЧЕСКИМИ И ЭЛЕКТРОСОРБЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

Бегманов Сафар Нурмаматович

доцент Навоийского государственного горно-технологического университета PhD.

Annotatsiya. Lazurniy, Kruk va Umid konlarining yer osti suvlari kimyoviy tarkibini o‘rganish hamda ularning tarkibidagi yod va unga hamroh komponentlarning miqdorini aniqlash maqsadida kompleks tadqiqotlar olib borildi. Tahlil natijalariga ko‘ra, yodning eng yuqori konsentratsiyasi Kruk va Umid konlarining suvlarida aniqlanib, ularning miqdori mos ravishda 21,8 va 55,20 mg/l ni tashkil etadi. Qo‘shimcha ravishda, natriy gipoxlorit va faol xlor kabi turli oksidlovchi reagentlarning yodid-ionlarning molekulyar yodga aylanish jarayoniga ta’siri o‘rganildi. Tajriba ma’lumotlari shuni ko‘rsatdiki, reaksiya intensivligi harorat, muhitning kislotaliligi (pH) va qo‘llanilgan oksidlovchi moddalarning konsentratsiyasiga bevosita bog‘liq. Bundan tashqari, tabiiy yer osti suvlardan yodni ajratib olishda elektrosorbsiya usulini qo‘llash xususiyatlari ko‘rib chiqildi. Bunda sorbent sifatida Norit RO NMU-20 markali faollashtirilgan ko‘mir hamda AM-2B markali ion-almashuvchi material ishlatildi. Olingan natijalar ushbu yondashuvning laboratoriya va yarim sanoat sinovlarida samaradorligini tasdiqladi hamda uni amaliyotga joriy etish istiqboli mavjudligini ko‘rsatdi.

Kalit so‘zlar: yod, elektrosorbsiya, yer osti suvlari, izoamil spirti, sorbentlar, artezian havzalari, elektroliz, barbatirlash, ekstragent.

Аннотация. Проведено комплексное исследование химического состава подземных вод месторождений Лазурный, Крук и Умид с целью определения содержания йода и сопутствующих компонентов. В результате анализа выявлено, что максимальные концентрации йода зафиксированы в водах месторождений Крук и Умид, где их значения составляют соответственно 21,8 и 55,20 мг/л. Дополнительно изучено влияние различных окислительных реагентов — гипохлорита натрия и активного хлора — на процесс превращения иодид-ионов в молекулярный йод. Экспериментальные данные показали, что интенсивность реакции напрямую зависит от температуры, кислотности (pH) и концентрации используемых окислителей. Кроме того, рассмотрены особенности применения электросорбционного метода выделения йода из природных подземных вод с использованием в качестве сорбентов активированного угля марки Norit RO NMU-20 и ионообменного материала АМ-2Б. Полученные результаты подтвердили эффективность данного подхода при лабораторных и полупромышленных испытаниях, что

ISSN 3030-3907

демонстрирует его перспективность для дальнейшего практического внедрения.

Ключевые слова: йод, электросорбция, подземные воды, изоамиловый спирт, сорбенты, артезианские бассейны, электролиз, барбатирование, экстрагент.

Annotation. A comprehensive study of the chemical composition of underground waters from the Lazurny, Kruk, and Umid deposits was carried out to determine the content of iodine and associated components. The analysis revealed that the highest iodine concentrations were recorded in the waters of the Kruk and Umid deposits, amounting to 21.8 and 55.20 mg/L, respectively. In addition, the influence of various oxidizing agents — sodium hypochlorite and active chlorine — on the oxidation process of iodide ions into molecular iodine was investigated. Experimental data showed that the reaction intensity directly depends on temperature, acidity (pH), and the concentration of oxidizers used. Furthermore, the features of applying the electrosorption method for extracting iodine from natural underground waters were examined, using activated carbon of the Norit RO NMU-20 grade and the ion-exchange resin AM-2B as sorbents. The obtained results confirmed the effectiveness of this approach in laboratory and semi-industrial experiments, demonstrating its potential for further practical implementation.

Keywords: iodine, electrosorption, underground waters, isoamyl alcohol, sorbents, artesian basins, electrolysis, bubbling, extractant.

Введение

Йод является химическим элементом, который в природных условиях встречается практически во всех компонентах биосферы — в горных породах, почвенном покрове, природных водах, а также в организмах животных, растений и человека.

Изучение закономерностей распределения йода в природе началось с фундаментальных исследований академика В. И. Вернадского, который одним из первых установил наличие этого элемента в морских и речных водах, а также в составе некоторых минералов. Согласно его расчётам, общее количество йода, сосредоточенное в земной коре, оценивается в пределах 10^{13}–10^{14} тонн [1].

Значительный вклад в исследование распространения соединений йода внёс академик А.Е.Ферсман. В своих трудах он показал, что заметные концентрации йода обнаруживаются в осадочных и магматических породах, почвах, водных источниках и живых системах [2].

Повышенное внимание к изучению йода связано с исключительной биологической значимостью этого элемента для функционирования живых

ISSN 3030-3907

организмов. Особенно остро вопрос обеспеченности йодом стал рассматриваться после установления взаимосвязи между его дефицитом и развитием эндемического зоба — заболевания, распространённого среди населения горных и болотистых регионов [3].

Минералы, для которых йод выступает основным структурным компонентом, встречаются крайне редко. Обычно он входит в состав природных галогенидов серебра и меди, которые обнаружены в отдельных месторождениях серебряных руд. Кроме того, известен редкий минерал лаутарит — $Ca(IO_3)_2$, найденный в нитратных месторождениях Южной Америки [4].

Проведено исследование содержания йода в горючих сланцах Кохта-Ярвинского месторождения (кукерсит) и в продуктах их последующей переработки. Средние значения концентрации йода в образцах кукерсита составляют $(0{,}57–0{,}75)\times10^{-3}$%. На основании анализа полученных данных авторы пришли к выводу, что использование данного вида горючих сланцев в качестве альтернативного источника йода для промышленного извлечения экономически нецелесообразно [5].

Промышленные подземные воды отличаются значительным распространением по территории и обладают крупными эксплуатационными запасами. Эти воды, как правило, представляют собой сложные многокомпонентные системы, которые могут рассматриваться как потенциальное сырьё для комплексного извлечения ряда ценных химических элементов, включая йод и бром.

В период независимого развития Узбекистана на нескольких месторождениях — Гуртепа (Наманганская область), Ханкыз (Ферганская область), Хаудак и Кокайты (Сурхандарьинская область), а также Крук (Бухарская область) — были внедрены опытно-промышленные установки, предназначенные для добычи йода методом воздушной десорбции. Несмотря на положительные результаты, у данного метода имеются существенные недостатки: для окисления иодид-ионов требуется использование свободного хлора, который, во-первых, токсичен, а во-вторых, труднодоступен и дорогостоящ. В результате по ряду технических и экономических причин указанные установки в настоящее время не функционируют.

Потребность промышленности Узбекистана в кристаллическом йоде превышает 50 тонн в год и полностью покрывается за счёт импорта из Чили, Японии и Туркменистана. Между тем на территории страны имеются значительные запасы попутных вод нефтяных месторождений, содержащих йод, однако их промышленная переработка и систематическая добыча пока не налажены.

ISSN 3030-3907

ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

Согласно данным из различных литературных источников, на территории Бухарской, Кашкадарьинской и Ферганской областей Республики Узбекистан располагается значительное количество подземных вод, а также сопутствующих нефтяных и гидротермальных вод. Изучением этих вод занимались многие научные исследователи. В частности, такие ученые, как А.С. Хасанов, И.А. Умбаров, Е.А. Шаповалова и С.А. Бакиев, проводили работы, посвященные извлечению ценных элементов из состава подземных вод. Так, Саиднасим Бакиев исследовал структуру, направление потоков и химический состав подземных бассейнов, тогда как Иброхим Умбаров сосредоточил внимание на определении количественного и качественного состава подземных вод республики, а также на выделении элемента йода.

Для получения йода был проведён анализ состава ряда водных источников, по которым осуществлялись дополнительные научные исследования. К числу таких источников относятся месторождения «Умид», «Крук» и некоторые другие. В частности, на территории Кашкадарьинской области, в Мубарекском районе, в пределах месторождения «Умид» было установлено присутствие иодид-ионов в составе высокоминерализованных подземных вод, формирование которых связано с нефтяными пластами, залегающими на глубине от 300 до 3500 метров.

Таблица 1

Химический состав воды в месторождениях Лазурный, Крук и Умид

№	Наименование компонентов	Содержание компонентов в месторождениях, мг/л		
		Лазурный	Крук	Умид
1	Ca^{+2}	11,1	3006,0	150
2	Mg^{+2}	66,3	851,2	70
3	Na^{+}	-	24295,5	1069,56
4	K^{+}	-	517,5	1069,56
5	Ba^{+2}	4,6	-	-
6	Sr^{+2}	59,2	-	-
7	Zn^{+2}	-	-	0,24
8	SiO_2	261,8	-	-
9	Mn^{+2}	0,91	0,34	0,55
10	Ni^{+2}	0,009	3,10	4,64
11	Pb^{+2}	0,044	2,23	2,8
12	Al^{+3}	-	0,02	0,34
13	Cu^{+2}	-	0,22	0,30
14	Fe^{+2}	1,4	-	-

ISSN 3030-3907

15	Fe^{+3}	-	2,58	0,14
16	Mo^{+2}	-	0,30	1,065
17	Co^{+2}	-	4,06	6,19
18	Cr^{+3}	-	0,13	0,14
19	F^{-}	-	0,66	1,39
20	I^{-}	1,0-1,2	21,8	55,20
21	Br_2	-	-	-
22	Br^{-}	20-90	198,9	436,80
23	NO^{3-}	-	0,37	0,06
24	NO^{2-}	0,015	0,24	0,01
25	Cl^{-}	7200	45376,0	1280,00
26	HCO_3^{-}	-	500,36	8,20
27	SO_4^{2-}	51,0	255,19	5,31
28	pH	7,5	7,7	7,7

В связи с этим были проведены исследования по определению химического состава подземных вод месторождений Умид и Крук, расположенных в Караулбазарском районе Бухарской области, а также месторождения Лазурный в Навоийской области. Результаты аналитических испытаний сведены в таблицу 1.

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что среди исследованных подземных вод наибольшие концентрации йода и брома зафиксированы в месторождениях Умид и Крук. Содержание данных элементов составляет соответственно 55,20 и 436,8 мг/л для месторождения Умид, а также 21,8 и 198,9 мг/л для Крука. Таким образом, именно эти водоносные горизонты могут рассматриваться как наиболее перспективные источники для дальнейшего извлечения йода и брома.

Как отмечено в работе [6], характер протекания процесса окисления иодид-ионов в молекулярный йод под воздействием различных окислителей носит динамический и предельный характер, то есть скорость реакции возрастает лишь до определённого значения, после чего стабилизируется.

Согласно данным таблицы 2, максимальный эффект окисления достигается при использовании гипохлорита натрия (NaClO) при соблюдении стехиометрического соотношения реагирующих компонентов. Экспериментально установлено, что понижение значения pH среды способствует увеличению степени перехода иодид-ионов в элементарный йод. На практике гипохлорит натрия является наиболее удобным и безопасным окислителем, что объясняется его доступностью и

ISSN 3030-3907

промышленным производством в виде 19%-ного водного раствора на предприятии АО «Навоиазот».

При исследовании температурного влияния на процесс окисления было определено, что оптимальный температурный диапазон для данной системы составляет 25–30 °C (рис. 1). Наблюдаемый экстремальный характер зависимости скорости окисления от температуры можно объяснить тем, что при повышении температуры до 28 °C скорость реакции возрастает, однако при дальнейшем нагревании доминирующим становится процесс испарения йода из системы, что приводит к снижению эффективности окисления.

На следующем этапе работы был детально изучен процесс выделения йода из рассола. Учитывая хорошую растворимость йода в спиртах, была рассмотрена возможность применения изоамилового спирта (марки «чистый») — широко используемого в промышленности органического экстрагента, не смешивающегося с водой.

В таблице 3 приведены экспериментальные данные, показывающие зависимость степени извлечения йода от числа циклов экстракции с использованием изоамилового спирта. Как видно, насыщение экстрагента происходит уже после трёх циклов, что требует проведения его регенерации путём перегонки перед повторным применением. Этот технологический этап характеризуется значительными энергетическими затратами и частичной потерей растворителя в процессе перегонки. Кроме того, использование изоамилового спирта сопряжено с повышенной пожарной опасностью, поскольку данное соединение относится к категории легко воспламеняющихся жидкостей.

Кроме того, в рамках проведённых исследований была рассмотрена возможность использования свободного хлора, производимого на АО «Навоиазот», в качестве окислителя при извлечении йода из подземных вод.

Процесс выделения йода из вод нефтяных месторождений с применением газообразного хлора реализуется по следующей технологической схеме [7]. Предварительно исходная вода подвергается подкислению раствором соляной кислоты до значения pH = 2. После этого через подкисленную среду пропускают поток хлора со скоростью $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ м³/с, что обеспечивает окисление иодид-ионов до элементарного йода. Образующийся йод экстрагируется органическим растворителем — изоамиловым спиртом, в результате чего достигается степень извлечения порядка 72,2%.

Несмотря на определённую эффективность данного метода, его практическое применение ограничено. Основными недостатками являются относительно низкий выход целевого продукта, а также необходимость

ISSN 3030-3907

использования свободного хлора и серной кислоты, которые, с одной стороны, токсичны и требуют строгого соблюдения мер безопасности, а с другой — не всегда доступны в нужных объёмах.

В связи с этим возникает необходимость разработки альтернативных технологических подходов, обеспечивающих более высокие показатели извлечения йода при одновременном снижении затрат и минимальном воздействии на окружающую среду. Перспективными в данном направлении считаются методы, исключающие применение агрессивных химических реагентов и основанные на физико-химических принципах сорбции или электросорбции.

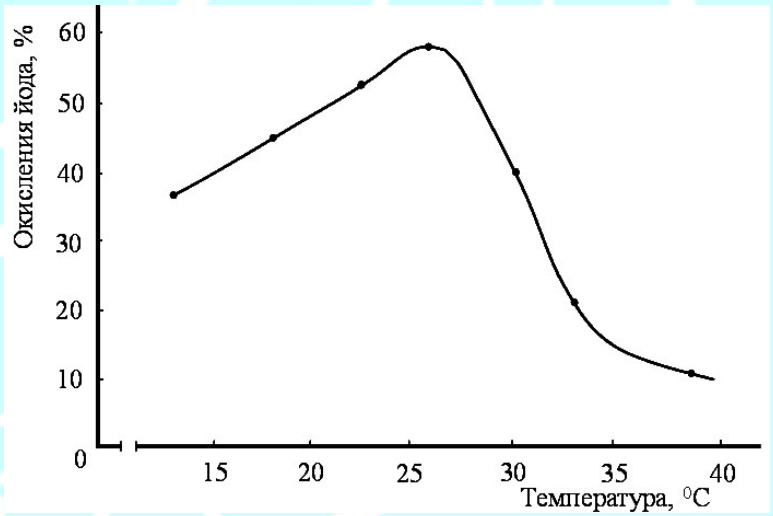


Рис.1. Зависимость температуры системы на процесс окисления йодида иона (pH=3, окислитель NaClO)

В ходе исследований нами была рассмотрена и экспериментально проверена электросорбционная технология выделения йода из природных рассолов.

Для проведения опытов была использована специально сконструированная лабораторная установка, совмещающая функции сорбционной колонки и проточного электролизёра. Конструктивно установка представляет собой цилиндрический корпус, нижняя часть которого оснащена графитовым электродом. На поверхность электрода помещён слой активированного угля марки Norit RO NMU 20, предварительно тщательно прессованный с целью увеличения плотности и улучшения контактных свойств.

Над слоем угля установлен медный катод, что обеспечивает формирование электродной системы, необходимой для протекания электросорбционного процесса. Такое конструктивное решение позволяет одновременно осуществлять процессы электролиза и сорбции, повышая эффективность извлечения йода из солевых растворов природного происхождения.

ISSN 3030-3907

Таблица 2

Влияние концентрации окислителей на процесс перехода йодидов в йод ($V_{общ}$ =100 мл, $C_{йода}$=55,2 мг/л, T=25-30°C, $t_{окис}$= 3 час.)

№ п/п	Окислитель		pH	Концентрация йода, мг/л	Окисление йода, %
	Наименование	Концентрация, мг/мл			
1	NaClO	0,228	5,0	8,17	14,80
2	NaClO	0,456	5,0	12,88	23,33
3	NaClO	0,684	5,0	17,69	32,05
4	NaClO	0,912	5,0	21,11	38,24
5	NaClO	1,140	5,0	26,40	47,83

В качестве примера можно привести следующий опыт. При использовании 200 г активированного угля марки Norit RO NMU-20 в качестве сорбента из гидротермальной воды месторождения «Умид», содержащей от 50 до 55 мг йодид-ионов в каждом литре, было зафиксировано поглощение примерно 370 мг йода.

После завершения стадии сорбции направление электрического тока в системе было изменено на противоположное. При этом при силе тока 20 мА и приложенном напряжении 2 В наблюдалось полное высвобождение адсорбированного йода с поверхности угольного слоя в раствор в форме йодид-ионов.

Таким образом, полученные результаты подтверждают возможность эффективного регенерирования сорбента и возврата йода в раствор без значительных потерь вещества, что делает электросорбционную технологию перспективной для практического применения.

Таблица 3

Извлечение йода из попутных вод при различных количествах циклов использования изоамилового спирта ($C_{исх}$=55,2 мг/л, t=3 час, окислитель NaClO, извлекающий реагент - изоамиловый спирт)

№	Цикл извлечения	Количество изоамилового спирта, г	Объем технического р-ра, мл	T, °C	Извлечение, %
1	1	10	100	25	43,08
	2	10	100	28	51,70
	3	10	100	30	37,15

Процесс сорбции наглядно иллюстрируется с помощью кривых сорбции, отражающих характер изменения концентрации йодид-ионов в фильтрате в зависимости от объема прошедшего через колонку раствора.

ISSN 3030-3907

Одновременно строится вторая зависимость — кривая динамической обменной ёмкости сорбента (активного угля) по отношению к йоду от того же объема пропущенного раствора. Эти графические зависимости (рис. 2 и 3) позволяют визуализировать ход процесса сорбции и наглядно оценить эффективность работы угольного слоя как сорбционного материала.

Основополагающая концепция данного метода может быть разъяснена следующими положениями. Поскольку активированный уголь характеризуется способностью проводить электрический ток, он, будучи предварительно насыщенным иодом, способен выполнять функции катода в электролитической системе. Это позволяет реализовать процесс восстановления элементарного йода до иодид-ионов путем пропускания через систему строго дозированного количества электричества.

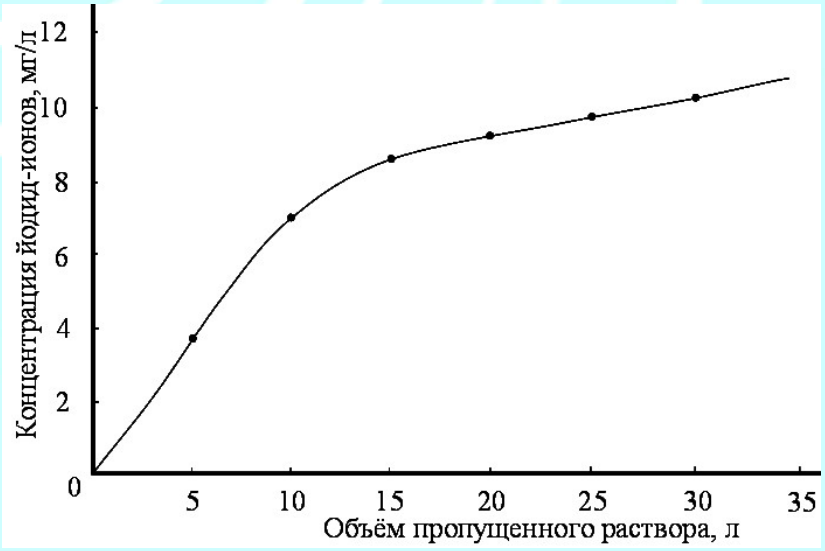


Рис.2. Выходная кривая сорбции йода из естественных растворов с CI= 10 мг/л

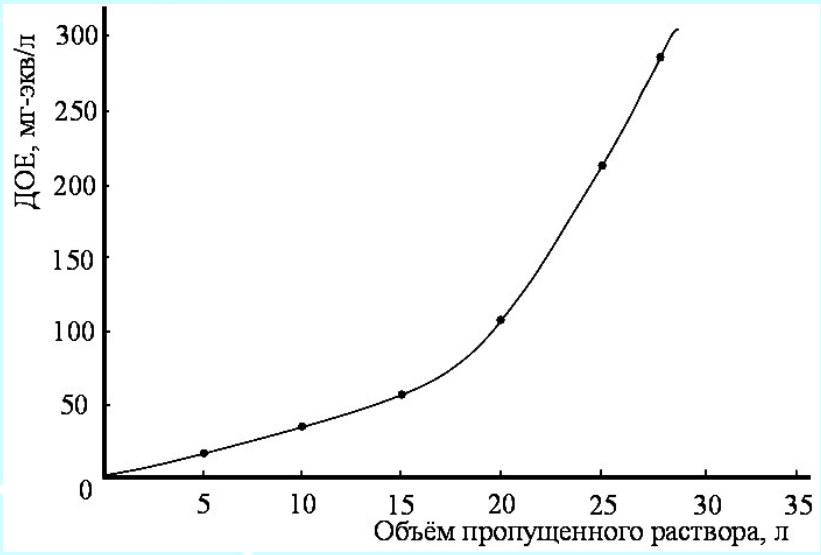


Рис.3. Зависимость динамической обменной емкости сорбента Norit RO NMU-20 от объема пропущенного раствора

ISSN 3030-3907

Если при этом использовать дополнительный (вспомогательный) электрод, материал которого подобран таким образом, чтобы исключить возникновение значительных скачков потенциала на его поверхности, то энергетические затраты процесса будут определяться в первую очередь потенциалом, необходимым для восстановления йода до иодидной формы.

Схематическое представление протекающих на электродах электрохимических реакций и механизмов взаимодействия компонентов приведено на рисунке 4, где отображены основные стадии электрохимического преобразования и распределения потенциалов в системе.

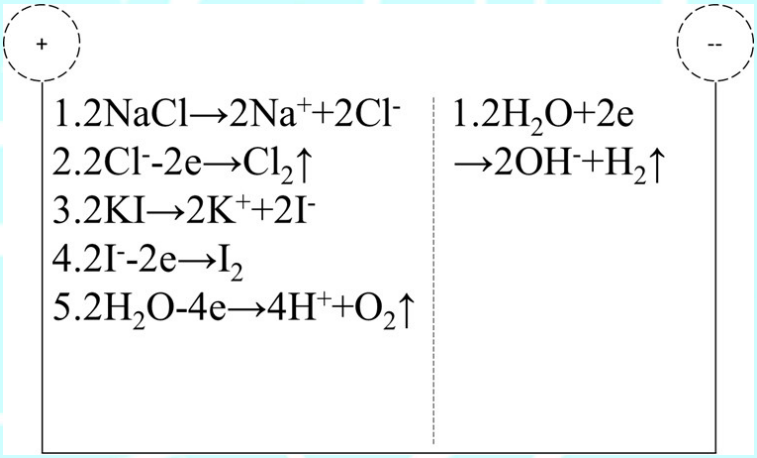


Рис.4. Схема электросорбционных процессов, протекающих на электродах

Анализ представленной схемы показывает, что в анодной зоне электролизера в результате разложения воды выделяются свободные катионы водорода. Их присутствие способствует формированию кислой среды, необходимой для эффективного протекания процесса окисления йодид-ионов. В этих условиях йодиды подвергаются электрохимическому окислению с образованием молекулярного йода, который далее сорбируется на поверхности активированного угля.

Следует отметить, что помимо водорода, на аноде также выделяются хлор и кислород, играющие роль дополнительных окислителей, усиливающих степень превращения йодидов. После завершения процесса сорбции раствор проходит через катодную область электролизера, где происходит нейтрализация кислой среды за счёт взаимодействия с гидроксид-ионами, выделяющимися из воды на катоде.

Полученные экспериментальные данные лабораторных испытаний сведены в таблицу 4, где отражены основные параметры процесса и его эффективность. Таким образом, проведённые исследования подтвердили возможность выделения йода электросорбционным методом за счёт одновременного подкисления раствора, электрохимического окисления

ISSN 3030-3907

йодидов до элементарного йода и его сорбции на угольном сорбенте в анодном пространстве электролизера.

Таблица 4

Данные по электросорбционному извлечению йода на лабораторной установке

Показатель	**Опыт**
Продолжительность электролиза, ч	75
Пропущенное кол-во электричества, А-ч	6
Сила тока, мА	0,20-0,30
Напряжение, В	1,5-2,0
Потребляемая мощность, кВт-ч	0,012
pH электролита (нач./кон.)	7,5/6,5
Содержание I- в исходном растворе, мг/л	55,0-70,0
Выход по току I-, %	92,2

Таблица 5

Наиболее перспективные месторождения для организации промышленной добычи йода из подземных вод

№	**Месторождения**	**Содержание йода, мг/л**		**Прогнозные ресурсы**	
		от	**до**	**Воды, $м^3$/сут**	**Йода, т/год**
Бухарская и Кашкадарьинская область					
1.	Крук	16	36	9282	94,5
2.	Умид	40	73	1632	16,7
3.	Северный Уртабулак	30	46	21592	321,5
4.	Джарчи	25	34	-	-
Наманганская область					
5.	Гуртепа	13	16	346 - 1296	41-194

Одной из важнейших и актуальных задач для отечественной фармацевтической, химической и пищевой отраслей сегодня является создание и развитие производств йодсодержащих соединений на основе собственных природных ресурсов. Востребованность в кристаллическом йоде для нужд различных производственных секторов в стране превышает 50 тонн ежегодно. При этом значительная часть доступных запасов йода в Узбекистане сосредоточена в подземных пластовых водах, сопровождающих нефтяные месторождения, где элемент находится в растворённом состоянии.

Согласно постановлению Президента Республики Узбекистан № ПП-2298 от 11 февраля 2025 года «О программе локализации производства готовой продукции, комплектующих изделий и материалов на 2025–2029 годы», организация промышленного выпуска кристаллического йода была

ISSN 3030-3907

определена одной из приоритетных задач государственной программы импортозамещения.

В настоящее время на территории страны йодсодержащие воды выявлены в ряде регионов — в частности, в Бухарской, Кашкадарьинской, Ферганской и Наманганской областях. Наиболее изученные и перспективные по содержанию йода месторождения — Крук, Умид, Северный Уртабулак, Джарчи, Гуртепа, Чортак и другие.

Оценка прогнозных запасов подземных вод, полученная на основе гидрогеологических исследований и данных Государственной комиссии по запасам Республики Узбекистан (ГКЗ РУз), показывает, что ресурсы артезианских бассейнов обладают значительным потенциалом промышленного освоения. По состоянию на 1 января 2010 года суммарные прогнозные запасы промышленных подземных вод нефтяных месторождений страны представлены в таблице 5.

Результаты анализа этих данных свидетельствуют, что суточный объём извлекаемой из нефтяных скважин воды составляет порядка 32,9–33,8 тыс.м³, что при соответствующей технологии может обеспечить получение до 500 тонн кристаллического йода в год.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе проведённых исследований авторами была собрана опытно-экспериментальная установка, реализующая электросорбционный метод выделения йода из природных рассолов. Данный способ обеспечивает высокий коэффициент извлечения — не менее 90 %. В качестве сорбционных материалов применялись активированный уголь и специально подобранный анионит, что позволило значительно повысить эффективность процесса.

Таким образом, внедрение электросорбционной технологии извлечения йода из пластовых вод нефтяных месторождений Узбекистана позволит не только полностью удовлетворить внутренние потребности страны в данном элементе, но и в перспективе выйти на уровень его экспорта на зарубежные рынки.

СПИСОК ИСПОЛЗОВАННЫЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вернадский В.И. Очерки геохимии. –М.: Горгеонефтиздат, 1934. 380 с.
2. Ферсман А.Е. Геохимия. –М.: Госхимиздат, 1939. 399 с.
3. Популярная библиотека химических элементов. // Под ред. Петриянова И.В. и Соколова Н.Т. -М. -1980. 130 с.
4. Ксензенко В.И, Стасиневич Д.С. Технология брома и йода. –М.: ГХИ, 1960. 303 с.

ISSN 3030-3907

5. Овчинникова И.А., Жилин А.Г., Тамачева Э.И. О возможности привлечения нового вида сырья (Кукериста) для промышленного получения йода // Синтез йода, брома и их соединения. -М. -1985. С. 29-32.
6. Мухиддинов Б.Ф., Санакулов К.С., Хасанов А.С., Вапоев Х.М. Извлечение йода из подземных вод в химических реагентах Материалы республиканской научно-технической конференции «Горно-металлургический комплекс: достижения, проблемы и перспективы инновационного развития», г.Навои, 15-16 ноября2016 г. С. 287-288.
7. Мухиддинов Б.Ф., Хасанов А.С., Вапоев Х.М., Бекманов С. Нефт конлари кудуклари сувла-ридан йод ва бромни ажратиб олиш. Материалы республиканской научно –практичес-ческой конференции «Кимё фанининг долзарб муммолари ва уни ўқитишда инновацион технологиялар», Тошкент, 30-31 марта 2016 г, С.12-13.

ISSN 3030-3907